Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Институт космических и информационных технологий

*Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта: «VI Международная научная конференция "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли"»*

# РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы VI Международной научной конференции

Красноярск, 10–13 сентября 2019 г.

Научный редактор
*Е.А. Ваганов*

Красноярск
СФУ
2019

УДК 528.8
ББК 26.0
Р326

**Редакционная коллегия:**

*Е.А. Ваганов* (науч. ред.), доктор биологических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель СФУ; *Г.М. Цибульский* (отв. ред.), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СИИ ИКИТ СФУ; *М.В. Носков*, доктор физико-математических наук, профессор; *В.Б. Кашкин*, доктор технических наук, профессор; *В.И. Харук*, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой Б-ГИС ИКИТ СФУ; *Ю.А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ» ИКИТ СФУ

Р326 **Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли** : материалы VI Междунар. науч. конф., Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. / науч. ред. Е.А. Ваганов ; отв. ред. Г.М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 368 с.

ISBN 978-5-7638-4176-3

Представлены современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования, рассмотрены модели и методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, приведены результаты мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов и явлений. Обсуждена проблематика построения и развития региональных систем дистанционного зондирования Земли из космоса и показана их роль в решении социально-экономических задач регионов.

Предназначены для специалистов в области дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологий, аспирантов, студентов, обучающихся по соответствующим профилям подготовки.

*Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.*

**УДК 528.8**
**ББК 26.0**

**Электронный вариант издания**
**см.: http://catalog.sfu-kras.ru**

ISBN 978-5-7638-4176-3

© Сибирский федеральный университет, 2019

УДК 528.8, 528-18/-79

**М.А. Бурцев[1], А.В. Кашницкий[1], Е.А. Лупян[2], А.А. Мазуров[3], И.С. Пустынский[4], Е.И. Холодов[4]**

[1] Кандидат технических наук, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[2] Доктор технических наук, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[3] Кандидат физико-математических наук,
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[4] Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ "Планета"»
e-mail: alexei@d902.iki.rssi.ru; pis@dvrcpod.ru

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРОССКАЛИБРОВКИ МЕТОДОМ СОПОСТАВЛЕНИЯ ГИСТОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ «КАНОПУС-В-ИК»

Регулярная полетная калибровка спутниковых данных имеет важное прикладное значение для обработки информации ДЗЗ. Для проведения полетной калибровки предлагается использовать в качестве эталона для кросскалибровки данных полярно-орбитальных спутников данные геостационарного спутника на примере спутников «Канопус-В-ИК» и Himawary. Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Все данные и результаты получены из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с использованием сервисов доступа к данным и их обработки ВЕГА-Science и единой системы работы со спутниковыми данными ФГБУ «НИЦ "Планета"».

*Ключевые слова: ДЗЗ, кросскалибровка, полетная калибровка, анализ гистограмм.*

Современные приборы ДЗЗ являются измерительными инструментами, данные которых используются в различного рода задачах мониторинга изменений земной поверхности, определения опасных явлений. Точность и стабильность калибровочных характеристик спутниковых приборов важны для разработки и устойчивого автоматического применения алгоритмов обработки. Во время эксплуатации космических аппаратов необходимо проводить регулярную полетную калибровку приборов, для которой применяются различные методики [1–4]. Предлагаемый к использованию метод основывается на сопоставлении гистограмм изображений съемок одной и той же поверхности Земли разными приборами с различных КА, имеющих сходные спектральные характеристики и произведенные с одинаковой геометрией съемки и в одно и то же время [5]. Один из приборов будем считать эталонным, с хорошей калибровкой. Другие приборы попытаемся откалибровать по данным эталона.

Естественно полагать, что чувствительность прибора не имеет инверсии и что величина регистрируемого прибором сигнала пропорциональна величине принимаемого от Земли потока излучения, т.е. более «яркому» объекту на Земле соответствует более сильный регистрируемый прибором сигнал. В таком случае все объекты с одинаковой яркостью должны иметь на снимках с разных приборов одинаковую площадь, что в терминах изображения означает одинаковое значение гистограммы в области, соответствующей яркости объектов.

Таким образом, построив соответствие частичных площадей гистограмм, мы получим однозначное соответствие яркостей одного изображения яркостям другого или,

© Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Пустынский И.С., Холодов Е.И., 2019

другими словами, соответствие между регистрируемыми величинами одного прибора регистрируемым величинам другого. При хорошей калибровке эталонного прибора мы получаем калибровочную таблицу для регистрируемых значений другого прибора.

Одним из трудновыполнимых моментов такой схемы является условие одномоментности съемки с одинаковой геометрией. Тем не менее при анализе снимков орбитальных и геостационарных КА можно найти приближенные выполнения как условия геометрии съемки, так и условия одновременности с точностью менее пяти минут, а при планировании съемки и более точно.

Исследование было проведено с помощью сервисов доступа к данным и их обработки ВЕГА-Science [6]. Для данных «Канопус-В-ИК» съемки полигона вблизи точки стояния геостационара Himawari предоставлены АО «Корпорация ВНИИЭМ» за 12–15 апреля 2019 г. В качестве эталона использованы данные Himawari, обработанные в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ "Планета"» [7].

Схема геометрии совместной съемки с гестационара и полярно-орбитального спутника приведена на рис. 1. На соответствующих снимках с такой геометрией выбираются участки с отличием до пяти градусов в лучах визирования геостационара и спутника на низкой орбите.

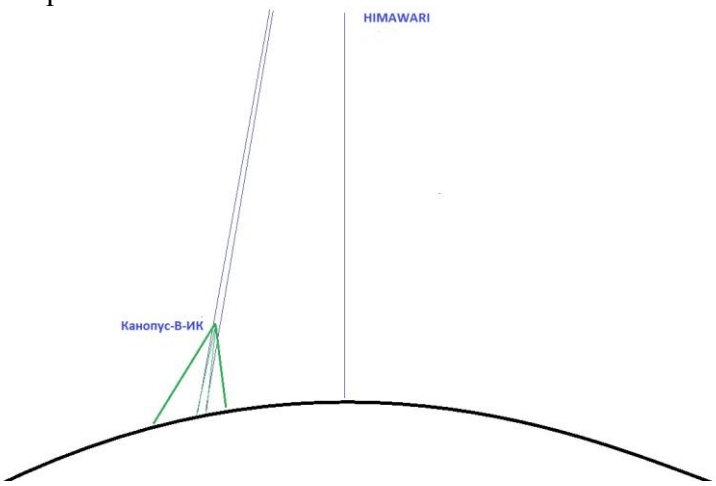



Рис. 1. Схема геометрии совместной съемки с гестационара и полярно-орбитального спутника

Снимки, произведенные с «Канопус-В-ИК», усредняются до разрешения прибора AHI спутника Himawari (эти данные используются в качестве эталонных). Далее по гистограммам изображений описанным выше методом рассчитываются калибровочные таблицы для данных «Канопус-В-ИК», прибор МСУ-ИК-СРМ.

Спектральные характеристики приборов в диапазонах 8,6 и 3,7 мкм приведены на рис. 2.

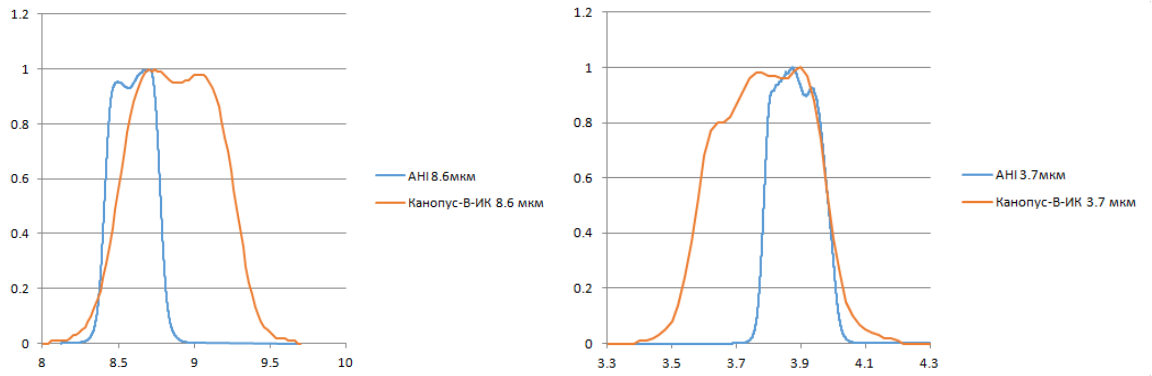



Рис. 2. Спектральные характеристики

Пример пары используемых для кросскалибровки изображений с выбранным фрагментом для анализа гистограмм приведен на рис. 3. Соответствующие гистограммы и график преобразования данных (калибровочная таблица) приведены на рис. 4.

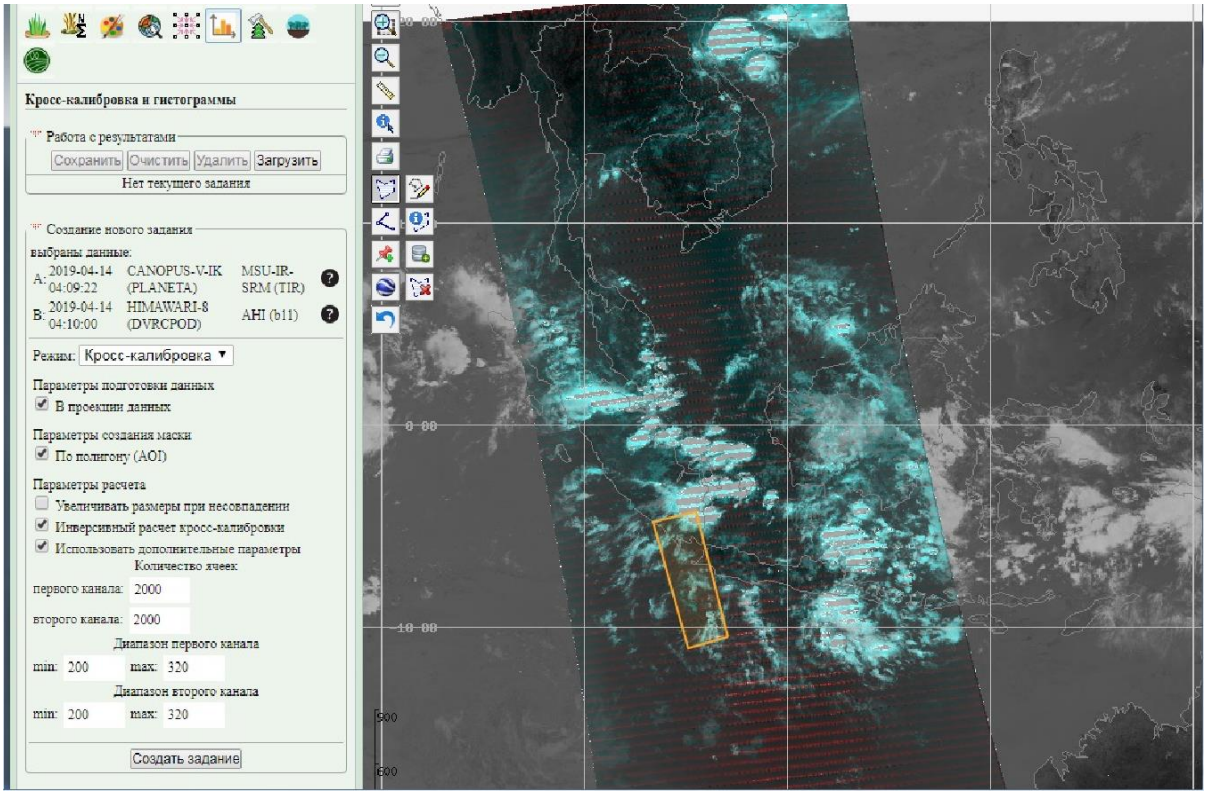
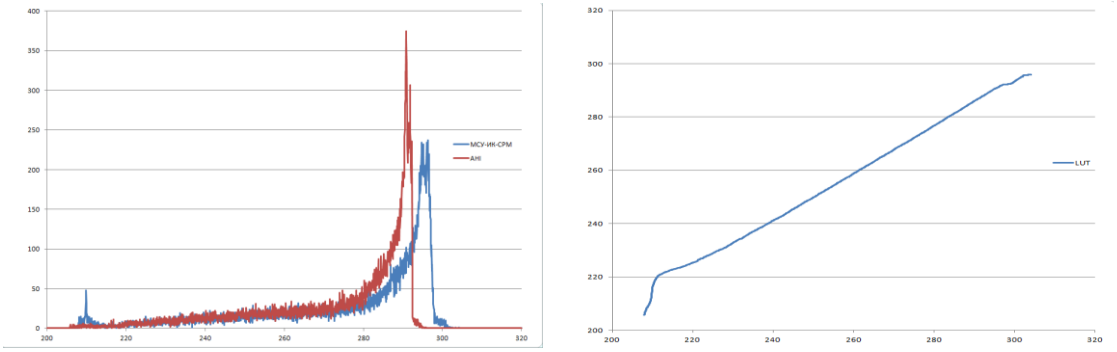



Рис. 3. Данные «Канопус-В-ИК» поверх данных Himawari
и расположение фрагмента для проведения кросскалибровки

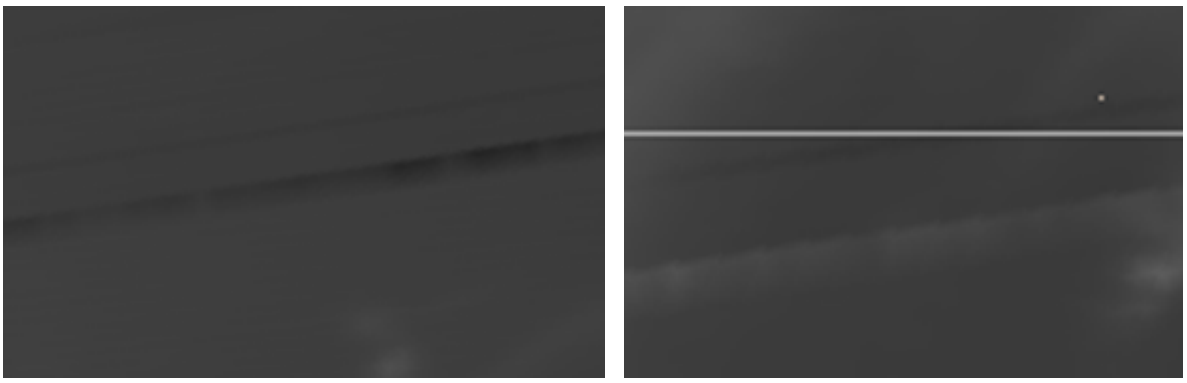



*а* *б*

Рис. 4. Гистограммы фрагмента изображений (*а*); график калибровочного преобразования (*б*)

Следует отметить ряд факторов, влияющих на предлагаемую процедуру. Данные «Канопус-В-ИК» имеют явные значительные шумы на изображении (рис. 5).

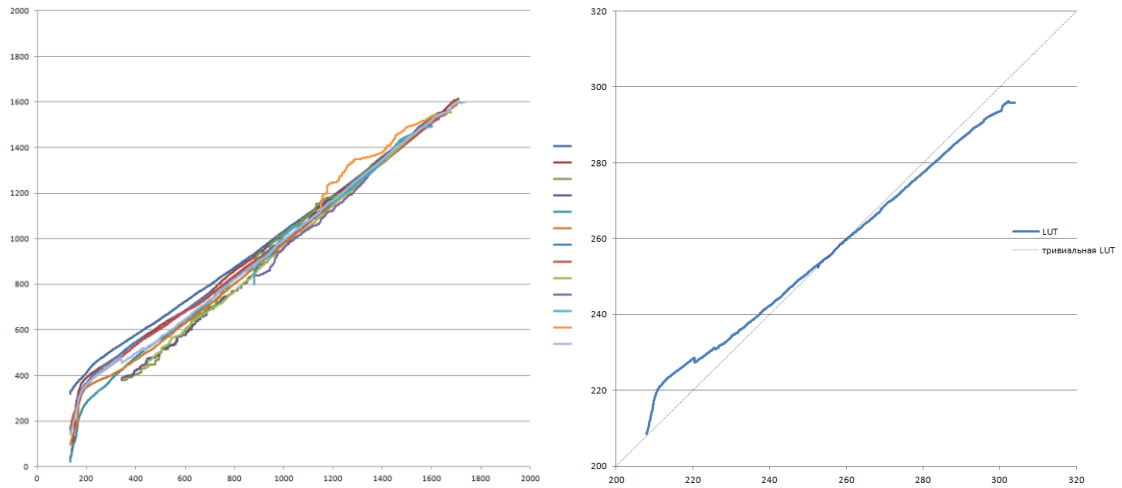
Это приводит к ошибкам в построении калибровочных таблиц. В частности, явная периодическая полоса в теплой зоне (темные и нерегулярного оттенка полоски на изображениях рис. 6, *а*, *б* завышают часть гистограммы этой области), на таблице преобразования это сказывается в верхней правой части графика калибровочной кривой с более высокими, чем реальные, значениями температуры и большей ошибке в этой области. Нерегулярные значения других сбоев на изображении (по всему диапазону значений) дают соответствующие ошибки в таблицу преобразований, особенно в местах гистограммы с малыми значениями (в более холодной области).



*а* *б*

Рис. 6. Сбойные полосы на изображении

По набору изображений построены и усреднены калибровочные таблицы (графики в относительных отсчетах приведены на рис. 7, *а* и результат усредненной таблицы в пересчете в градусы, К, – на рис 7, *б*).




*а* *б*

Рис. 7. Графики калибровочных таблиц: набора (*а*) и осредненной таблицы (*б*)

Погрешность (стандартное отклонение) составляет от 1 (теплая область) до 2,5 градуса, К (холодная область).

Следует отметить практически линейный ход калибровочной кривой, и только в районе температур 220 К и ниже происходит падение чувствительности, что на гистограмме проявляется небольшим всплеском вверх ее значений.

Достаточно большие отклонения от среднего не связаны с возможной резкой сменой погодных условий в рассматриваемых регионах в течение пяти минут. Для всех наборов данных можно построить такие же таблицы преобразований для последовательных наблюдений со спутника Himawari. Пример графика таблицы для этого случая приведен на рис 8. Видно, что он отличается от тривиального линейного преобразования изображения самого в себя, но не настолько значительно, как приведенные графики таблиц для пар изображений «Канопус-В-ИК» – калибровочных характеристик можно объяснить зашумленностью данных. При этом относительно близкий ход построенных по приведенной методике калибровочных кривых позволяет сделать вывод о более-менее стабильной работе съемочной аппаратуры и, при наличии незашумленных данных, о возможности применения данной методики для проведения кросскалибровки.

В имеющемся наборе изображений также присутствуют данные в канале 3,7 мкм. Но они настолько зашумлены (рис. 9), что в силу изложенных соображений данная методика неприменима для выполнения кросскалибровки.

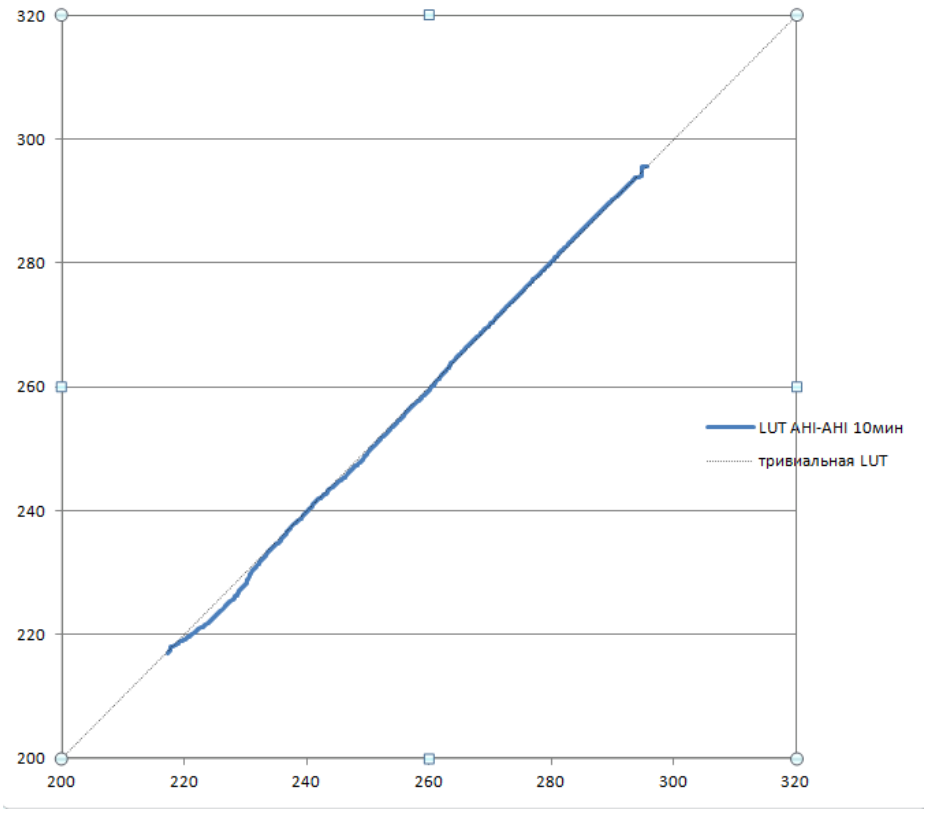



Рис. 8. Пример графика самокалибровки прибора AHI
с интервалом съемки 10 минут

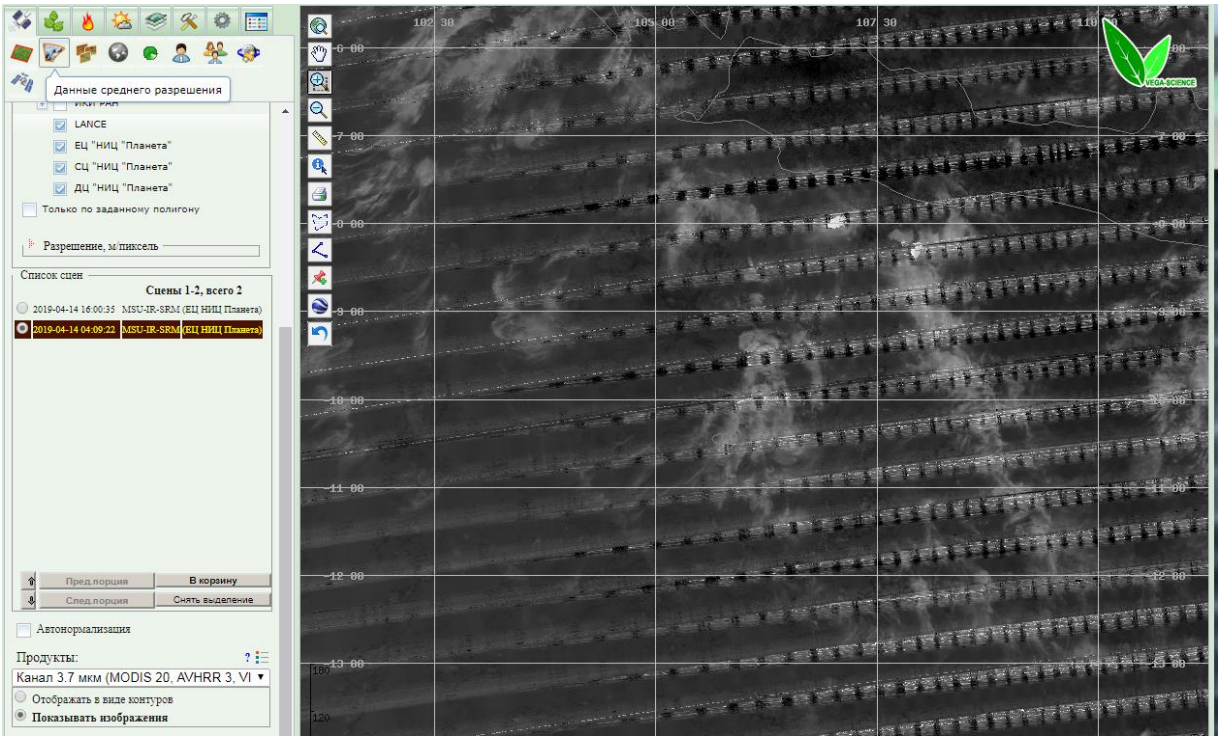



Рис. 9. пример изображения в канале 3,7 мкм «Канопус-В-ИК»

**Список литературы**

1. An overview of in-orbit radiometric calibration oftypical satellite sensors / G. Zhou, C. Li, T. Yue [et al.] // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-7/W4. 2015 International Workshop on Image and Data Fusion, 21–23 July 2015, Kona, Hawaii, USA.

2. Overview of intercalibration of satellite instruments / G. Chander, T.J. Hewison, N. Fox [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 2013. № 51 (3). P. 1056–1080.

3. A new method for cross-calibration of two satellite sensors / J.-J. Liu, Z. Li, Y.-L. Qiao [et al.] // IEEE Int. J. Remote Sensing. 10 December 2004. № 25 (23). P. 5267–5281.

4. In-Orbit radiometric calibration and stability monitoring of the PROBA-V instrument / S. Sterckx, S. Adriaensen, W. Dierckx, M. Bouvet // Remote Sens. 2016. № 8. P. 546. DOI: 10.3390/rs8070546.

5. Анализ возможности автоматической кросс-калибровки данных российских спутников методом анализа гистограмм / А.В. Кашницкий, Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018. ИКИ РАН, 2019. С. 191–197. DOI: 10.21046/rorse2018.191.

6. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

7. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «Планета» / Е.А. Лупян, О.Е. Милехин, В.Н. Антонов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97

.

УДК 528.8:528.7

**А.П. Гук**[1], **Л.Г. Евстратова**[2]
[1] Доктор технических наук, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
[2] Кандидат технических наук, Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
e-mail: lge_21@mail.ru

# ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ (С БПЛА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЕКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Современные методы цифровой фотограмметрии позволяют создавать новый вид продукции − измерительные 3D-модели, это дает по-новому представить и хранить пространственные данные: не только в виде координат, карт, но и качественного состояния, выраженного в виде изображения объекта. Реалистичность 3D-модели отражает структурную, текстурную и топологическую информацию, значительно расширяющую возможности применения методов 3D-моделирования. Рассмотрены особенности фотограмметрической обработки снимков, полученных с БПЛА. Отмечено, что современный подход к обработке снимков с БПЛА основан на предположении, что снимок является центральной проекцией местности. Это не позволяет реализовать потенциальные свойства цифровых изображений. Предложено для построения измерительных 3D-моделей по материалам БПЛА использовать комплексные методы обработки, основанные на проективных преобразованиях и центральном проектировании. В комплексе эти методы позволят более достоверно описать, учесть (с помощью адекватной математической модели условия получения снимков) искажения изображений и систематические ошибки, возникающие на разных этапах построения 3D-модели. Приведены несколько примеров экспериментальных работ по построению измерительных реалистических 3D-моделей на основе традиционной технологии.

*Ключевые слова: измерительная 3D-модель, БПЛА, фотограмметрические технологии, проективные преобразования.*

Актуальность построения измерительных 3D-моделей по материалам фотограмметрической обработки снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не вызывает сомнений. В настоящее время практически во всех сферах деятельности человека идет внедрение технологий трехмерного моделирования.

Обработка материалов съемки с БПЛА, получаемых как цифровыми метрическими, так и неметрическими камерами, для создания ортофотопланов, карт и 3D-моделей стала возможной в связи с разработкой специальных методов калибровки неметрических камер, а также совершенствованием алгоритмов их обработки, включая совместную обработку различных данных. Однако съемочные камеры постоянно совершенствуются, требуется разработка новых методик обработки снимков, получаемых такими камерами.

Несмотря на развитие новых методов обработки перекрывающихся снимков, они обладают недостатками. При практической реализации возникает достаточно много нерешенных проблем.

Под измерительной реалистичной 3D-моделью понимается 3D-модель, построенная по аэрокосмическим снимкам или по результатам лазерного сканирования, с задан-

© Гук А.П., Евстратова Л.Г., 2019

ной геометрической точностью в метрической системе координат и имеющая реальную текстуру, также позволяющая измерять координаты любых точек этой модели [1].

При построении измерительной реалистичной 3D-модели по большому количеству перекрывающихся снимков выполняется отождествление соответственных точек, в результате формируется суперплотное облако точек (количество соизмеримое с точками лазерного сканирования). Высокая плотность точек обеспечивает высокую детальность представления сложных объектов местности. Так получаем несколько миллионов и более измерений (координат точек). При фотограмметрической обработки этих снимков получают пространственную модель и текстуру для формирования 3D-моделей местности. На этом этапе необходимо выполнить классификацию суперплотного облака точек. Каждой точке объекта необходимо найти элемент изображения. Яркость элемента и изображения для точки местности (пикселя на местности) может быть взята из любого снимка, принадлежащего совокупности перекрывающихся снимков в области соответствующей точки (при построении 3D-моделей стоит задача сформировать реальную текстуру изображения).

Сегодня построение реалистичных 3D-моделей по снимкам выполняется на основе теории фотограмметрической обработки, которая базируется на предположении, что снимок является центральной проекцией местности. Для установления аналитической связи координат точек снимка и местности, использующихся для обработки снимков, полученных с центральным проектированием, используются уравнения коллинеарности. Учитывая, что практически элементы ориентирования снимков известны (определяются координаты центров проекции и угловую ориентацию всех снимков в полете), можно вычислить пространственные координаты всех точек, измеренных на перекрывающихся снимках.

Сложность построения измерительных реалистичных 3D-моделей по материалам БПЛА заключается в том, что при съемке высота фотогравирования может сильно изменяться, также могут быть большие углы наклона. При таких параметрах съемки и выполнении съемки неметрическими камерами получаются изображения с сильными геометрическими искажениями, а условия центрального проектирования при обработке не позволяют строить точные измерительные реалистичные 3D-модели. Заметим, в данном докладе рассматриваются только эти недостатки и не затронута точность измерений по цифровым снимкам и др.

Таким образом, если при обработке снимков использовать математическую модель центральной проекции, то все отклонения от принятой модели будут вносить ошибки в результаты обработки [2–4].

Другая проблема заключается в распознавании точек [5], т.е. ее принадлежности к тому или иному объекту. Задача автоматической классификации (особенно для моделирования городской территории) не решена полностью. В этом направлении выполняются интенсивные исследования как в России, так и за рубежом. Некоторые варианты фотограмметрических систем, объединенных со средствами распознавания образов объектов, уже существуют и используются при решении задач «стереозрения роботов».

В докладе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненные в области совершенствования методов построения измерительных реалистичных 3D-моделей по материалам БПЛА, основанных на комплексном использовании методов проективных преобразований и центральном проецировании. Например, при переносе на поверхность объекта используется метод прямого проектирования, при этом для каждого элемента изображения поверхности модели вписываются координаты соответствующих точек местности, и яркость пространственного элемента присваивается элементу 3D-модели [1, 2, 5]. Применение методов проективных преобразований позволит учитывать линейные преобразования снимков [6], выявлять нелинейные искажения (важно для неметрических и малоформатных камер) и, как след-

ствие, снизить накопление ошибок, возникающих при посторенние пространственной модели, значительно сократить объем машинного времени на обработку материалов. Применение в комплексе таких методов позволит достичь предельной точности, ограничиваясь лишь внутренней метрической точностью цифрового изображения [2, 4].

В качестве примера приводятся несколько измерительных 3D-моделей, описывающих городскую территорию. Построения выполнялись по изображениям, полученным неметрическими камерами с БПЛА, с применением двух методик. Для работы использовались программные обеспечения: Photomod, 3D MAX и Agisoft Photoscan. Модели являются метрическими, что позволяет измерять отдельные их элементы.

Следует обратить внимание на то, что методы фотограмметрии в настоящее время позволили производить новый продукт – измерительную (фотограмметрическую) реалистическую 3D-модель. Требуется сертификация этого продукта как стандартного продукта фотограмметрии.

В соответствии с этим разработка новых фотограмметрических технологий заключается в тестировании и калибровке технических средств, создании методики комплексирования и объединения новых программных средств, а также специализированных алгоритмов и программ для решения фотограмметрических задач.

**Список литературы**

1. Гук А.П., Лазерко М.М. Разработка методик создания 3D-моделей по аэрокосмическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения и другим данным дистанционного зондирования // Изв. вузов. Серия: Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 2. С. 32–34.

2. Гук А.П. Развитие фотограмметрических технологий на основе имманентных свойств цифровых снимков // Геодезия и картография. 2007. № 11. С. 26−29.

3. Guk A.P., Evstratova L.G. Monitoring of technical constructions using true ortho // CEUR Workshop Proceedings. 2017. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2033/51_paper.pdf.

4. Евстратова Л.Г. Разработка технологии создания цифровых карт по аэрокосмическим снимкам на основе метода свободно ориентированных моделей: дис. … канд. техн. наук. Новосибирск: ССГА, 2009. 174 с.

5. Автоматический выбор и идентификация характерных точек на разновременных разномасштабных аэрокосмических снимках // Изв. вузов. Серия: Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 2. С. 63−68.

6. Калантаров Е.И., Говоров А.В., Никишин Д.А. Результаты уравнивания блочных сетей фототриангуляции на основе аффинных и проективных преобразований // Изв. вузов. Серия: Геодезия и аэрофотосъемка. 2004. № 4. С. 44–53.

УДК 528.8.04, 528.88

**Е.В. Дмитриев[1], В.В. Козодеров[2],**
**С.А. Донской[3], П.Г. Мельник[4], С.А. Зотов[5]**

[1] Кандидат физико-математических наук, Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия, e-mail: yegor@mail.ru

[2] Доктор физико-математических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: vkozod@mail.ru

[3] Руководитель отдела ФГБУ «Рослесинфорг», Институт лесоведения РАН, e-mail: lesshii@bk.ru

[4] Кандидат сельскохозяйственных наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), e-mail: melnik_petr@bk.ru

[5] Аспирант, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), e-mail: zotov.sa@mipt.ru

# ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСОВ

В последние годы на территории Российской Федерации проводится новый масштабный вид лесоучетных работ, известный как Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ). При проведении ГИЛ формируется сеть пробных площадей (ПП) по всей территории страны, для которых проводятся подробные наземные измерения необходимых параметров. Актуализация лесотаксационных данных производится при совместном использовании измерений на ПП и методов дистанционного зондирования. В настоящей работе рассматривается задача использования мультиспектральных спутниковых изображений среднего и высокого пространственного разрешения с целью определения породного состава и возрастных классов древостоев. Для отработки методики используются тестовые участки на территории Валуйского лесничества Белгородской области, для которых имеются актуальные данные наземных обследований. Проводится сравнение информативности мультиспектральных изображений среднего и высокого пространственного разрешения для решения рассматриваемой задачи. Предложена методика совместного использования спектральных и текстурных признаков. Проведено исследование информативности текстурных признаков. Полученные результаты тематической обработки показывают эффективность предлагаемых методов при проведении работ по актуализации данных лесоустройства в рамках ГИЛ.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спутниковые изображения среднего и высокого разрешения, текстурный анализ, инвентаризация лесов.*

Ключевым видом лесоустроительных работ является таксация лесов. На ее основе устанавливаются расчетные лесосеки, обеспечивается проектирование мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов. Инвентаризация лесных территорий подразумевает проведение работ по выявлению, учету и оценке качественных и количественных характеристик древостоев. Полученная информация обеспечивает принятие обоснованных управленческих решений по использованию, охране, защите и воспроизводству лесов. В последние годы были приняты государственные программы, направленные на сокращение потерь лесного хозяйства от пожаров, вредных организмов и незаконных рубок, создание условий для рационального и интенсивного использования лесов при сохранении их экологических функций и биологического разнообразия, повышение эффективности контроля использования и воспроизводства лесов, обеспече-

© Дмитриев Е.В., Козодеров В.В., Донской С.А., Мельник П.Г., Зотов С.А., 2019

ние баланса выбытия и восстановления лесов, повышение их продуктивности и качества, а также повышение эффективности управления лесами.

В условиях современного изменения климата изменяются ареалы произрастания отдельных пород, происходят систематические сдвиги высоты полога, меняются процессы лесовозобновления. В связи с этим возникает необходимость в более частой актуализации данных лесотаксации, а также коррекции существующих закономерностей формирования и роста древостоев. Анализ результатов исследований, посвященных воздействию климата на лесные территории приведен в работе [1]. Рассмотрены задачи оценки изменений видового состава древостоев, продукционных характеристик и прочих параметров. Также в данной работе обозначены взаимосвязи традиционных исследований лесных экосистем с социально-экономическим развитием отдельных регионов для улучшения методов и инструментов используемых для инвентаризации лесов и принятия управленческих решений соответствующими органами.

Традиционно для получения информации об изменениях параметров лесных территорий используются мультиспектральные спутниковые изображения среднего разрешения (30 м), такие как Landsat TM, ETM+, OLI. Изображения высокого разрешения (с размером пикселя менее 2 м) применяются на практике преимущественно для контурного дешифрирования, обнаружения неучтенных вырубок, очагов гибели насаждений и участков, пройденных верховыми лесными пожарами. В данной работе сравниваются результаты тематической обработки изображений Lansat OLI и коммерческой спутниковой системы WorldView-2, которая содержит восьмиканальную мультиспектральную камеру с разрешением 1.84 м и панхроматическую камеру с разрешением 0.46 м.

В настоящее время спутниковые изображения WorldView-2 широко используются различными авторами при решении различных задач, связанных с определением параметров растительного покрова. Так, например, в работе [2] исследовались возможности использования изображений WorldView-2 для определения породного состава влажных субтропических лесов Южной Африки. Для проведения классификации авторы применяли метод опорных векторов, с помощью которого удалось провести распознавание трех доминантных пород деревьев на фоне различных типов растительности и почв. В данной работе делается вывод, что использование изображений высокого пространственного разрешения эффективно для проведения инвентаризации небольших территорий. Эффективность использования изображений WorldView-2 с целью определения породного состава также была продемонстрирована в работах [3, 4]. Кроме того, Изображения высокого разрешения используются для определения индекса листовой поверхности [5], обнаружения инвазивных растений [6], выделения крон отдельных деревьев [7].

Методика обработки мультиспектральных изображений состоит из нескольких этапов. Предварительная обработка представлена калибровкой, коррекцией и совмещением с наземными данными. При наличии соответствующих панхроматических изображений производится выравнивание контрастности и приведение к заданному количеству градаций серого.

Следующим этапом является выделение признаков распознаваемых объектов. Традиционно используемыми признаками являются спектральные образы. На основе наземных данных для каждого объекта формируются ансамбли спектров отраженного излучения. Полученные спектры нормализуются на соответствующие интегральные значения. При переходе от среднего пространственного разрешения к высокому становится важным учитывать изменения освещенности объекта. Так, например, лесной полог имеет достаточно сложную структуру, которую составляют перемежающиеся освещенные и затененные участи крон, а также межкроновые просветы. Спектральные характеристики излучения освещенных и затененных участков существенным образом отличаются. При этом различие между спектрами одного и того же участка с разным

освещением может быть сильнее, чем между спектрами различных пород. Для решения данной проблемы, используемые спектральные характеристики разделяются на градации по степени освещенности.

При обработке изображений высокого пространственного разрешения могут также быть использованы характерные текстурные особенности распознаваемых объектов. В настоящей работе применяется статистический подход к описанию текстур, предложенный в [8]. В данном подходе рассчитывается матрица совместной встречаемости уровней серого (МСВУС). Элементы МСВУС представляют собой частоты встречаемости градиентов яркости по заданному направлению. В качестве текстурных признаков можно использовать различные статистики, построенные на основе нормализованной МСВУС. При проведении расчетов использовались следующие параметры: автокорреляция, островершинность, асимметрия, контраст, корреляция, энтропия разности, дисперсия разности, неоднородность, энергия, энтропия, однородность, информационная мера корреляции, максимум вероятности, среднее суммы, энтропия суммы, сумма квадратов и дисперсия суммы. Определение данных параметров дано в [8].

Процедура вычисления текстурных признаков при совместной обработке мультиспектральных и панхроматических изображений состоит в следующем (рис. 1).

1. Производится совмещение мультиспектрального и панхроматического изображения тестовой территории.

2. Выбирается направление и расстояние соседства, эффективное число градаций серого, а также ширина окна. Выбор указанных параметров может существенным образом влиять на результат классификации и производится эмпирически. Число градаций серого может варьироваться в достаточно широком диапазоне. Грубое радиометрическое разрешение негативно сказывается на качестве текстурной классификации.

3. Панхроматическое изображение расширяется на половинный размер окна. Центр окна пробегает все точки панхроматического изображения, координаты которых соответствуют центрам пикселей многоспектрального изображения, и для каждой такой точки производится вычисление МСВУС и соответствующего набора текстурных признаков. Данная процедура необходима, чтобы эффективно сократить время вычислений и требуемую память. Поскольку панхроматическое изображение имеет существенно более высокое разрешение, чем многоспектральное, то вычисление текстурных признаков для всех пикселей панхроматического изображения приведет лишь к лишним вычислительным затратам и никак не повлияет на точность классификации.

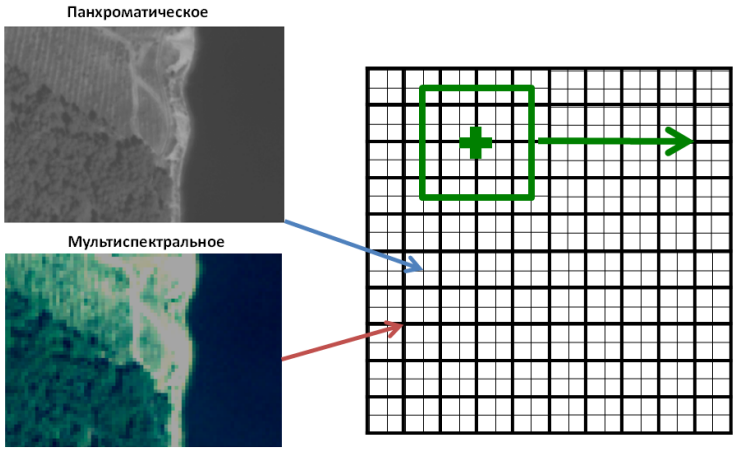



Рис. 1. Схема расчета текстурных признаков при совместной обработке мультиспектральных и панхроматических спутниковых изображений высокого пространственного разрешения

Для распознавания объектов используется модифицированный алгоритм декодирования, предложенный в работе [9]. Особенностью алгоритма является более эффек-

тивное использование имеющихся признаков при сохранении способности к обобщению. На этапе постобработки проводится коррекция результатов классификации на основе методов математической морфологии. При этом используется информация о разрешении кроны деревьев пикселями изображения. Алгоритм состоит в следующем: сначала в результатах классификации выбираются только классы, которые соответствуют породам деревьев. Для постобработки используется круговой структурный элемент. Размер элемента определяется разрешением изображения и предполагаемыми размерами крон. Классы образуют отдельные бинарные слои. Эти слои перебираются в цикле, и для каждого слоя двукратно производится операция открытия и инверсии. Далее слои суммируются и вырезаются пиксели, соответствующие выбросам.

Для отработки методики использовались снимки территории Валуйского лесничества, расположенного в юго-восточной части Белгородской области. Общая площадь лесов Белгородской области на 1 января 2016 г. составляет 247,6 тыс. га. По целевому назначению все леса Белгородской области относятся к защитным лесам. Лесистость территории Белгородской области по состоянию на 1 января 2016 г. составляет 8,6 %. Согласно наземным данным лесотаксации на территории Валуйского лесничества содержится 24 различные породы, которые доминируют хотя бы в одном выделе. Однако большую часть площади лесов составляют дубовые древостои различного возраста и полноты. Также имеется существенное количество выделов значительной площади с преобладанием сосны и осины.

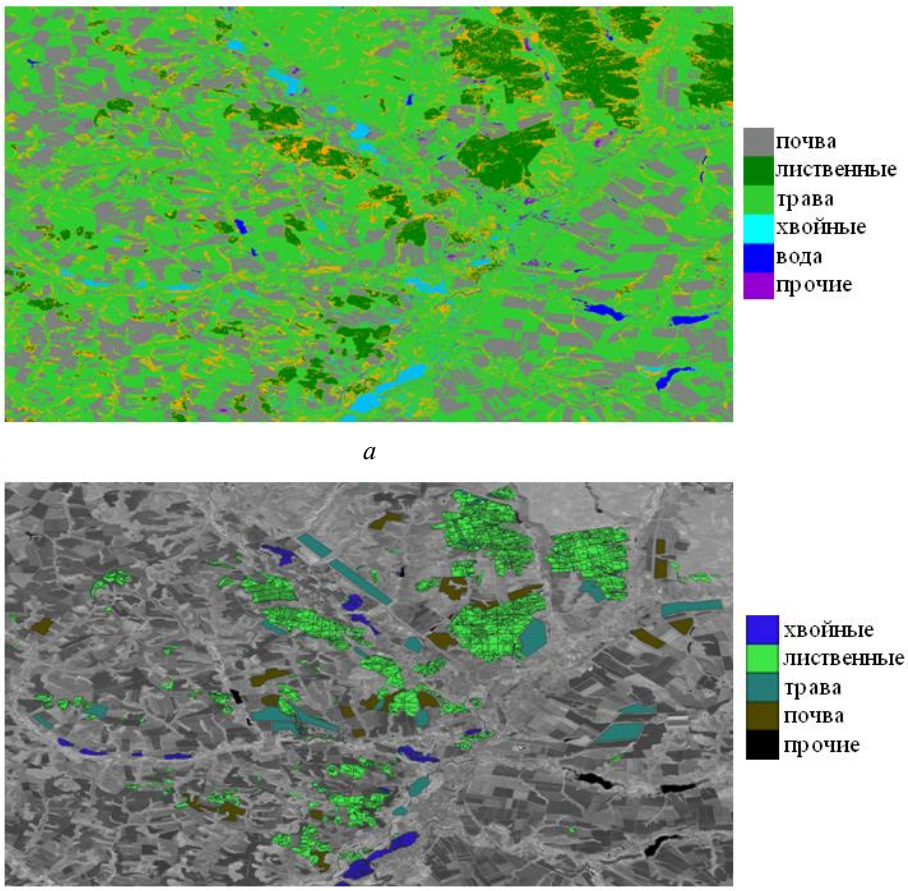



Рис. 2. Результат тематической обработки изображений Lansat-8 / OLI: *а* – классификация основных типов объектов; *б* – построение тематической карты доминирования хвойных и лиственных отделов

Результаты тематической обработки изображений тестовой территории, полученных с помощью аппаратуры Landsat-8 OLI, представлены на рис. 2. На рис. 2, *а* изоб-

ражена карта распознавания основных типов объектов. Соответствующие оценки ошибок представлены в табл. 1. OE (omission error) и CE (commission error) соответствуют ошибкам пропуска цели и ложной тревоги для каждого рассматриваемого класса. Класс «прочие» не участвует в обучении и означает, что соответствующие пиксели имеют спектральные характеристики, существенно отличающиеся от всех классов.

Таблица 1

Матрица ошибок распознавания основных классов объектов по изображению Landsat-8 OLI

| | **Почва** | **Листв.** | **Трава** | **Хвойн.** | **Вода** | **Прочие** | **OE** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Почва** | 5447 | 0 | 170 | 0 | 0 | 20 | 0,034 |
| **Листв.** | 7 | 5365 | 250 | 15 | 0 | 0 | 0,048 |
| **Трава** | 137 | 137 | 5342 | 20 | 0 | 1 | 0,052 |
| **Хвойн.** | 85 | 138 | 437 | 4968 | 0 | 9 | 0,119 |
| **Вода** | 0 | 0 | 0 | 0 | 5528 | 109 | 0,019 |
| **Прочие** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – |
| **CE** | 0,040 | 0,049 | 0,138 | 0,007 | 0 | – | |

Наилучшим образом классифицируются водные объекты. Ошибки определения открытых почв не превышают 5 %. Для данного объекта классификация происходит сбалансировано, поскольку значения OE и CE достаточно близки. Основные ошибки связаны с ложной классификацией почв как луговой растительности вследствие того, что при пространственном разрешении 30 м присутствует большое количество пикселей, принадлежащих одновременно обоим классам. Значительно более существенные ошибки возникают из-за пересечения классов луговой и лесной растительности. Также следует отметить существенные различия между OE и CE для всех растительных классов. Представленные на рис. 2, *б* результаты построения карты распределения хвойных и лиственных отделов по выделам Валуйского лесничества демонстрируют хорошее соответствие наземным данным. Также на карте обозначены отдельные выделы, в которых произошли существенные нарушения лесистости. В этих выделах основную площадь занимают открытые почвы или луговая растительность.

На рис. 3 представлены результаты тематической обработки изображения WorldView 2. Высокое пространственное разрешение позволяет построить более точную обучающую базу данных и дополнительно использовать текстурные признаки. Таким образом, можно рассмотреть задачу более детальной классификации с учетом конкретных пород и возрастных классов. Дубовые древостои были разделены на четыре возрастные группы. Однако впоследствии выяснилось, что для смежных возрастных групп ошибки классификации становятся существенными и принимают значения порядка 0,2–0,25. При рассмотрении объединенных возрастных классов ошибка классификации выходит на приемлемый уровень.

Соответствующие данные представлены в табл. 2. Приведенные оценки свидетельствуют, что дубовые древостои могут быть классифицированы, во всяком случае, на две возрастных группы: молодняки и насаждения старших возрастов (средневозрастные, приспевающие, спелые). Сосновые древостои классифицируются значительно лучше, чем по данным среднего разрешения. Неприемлемо большие ошибки возникают при классификации выделов с преобладанием осины. Данный эффект объясняется тем, что осиновые выделы, использующиеся при обучении, имеют узкую вытянутую форму и расположены в районе со сложной орографией. Это негативно повлияло на построение обучающей выборки. Пример использования результатов классификации для построения тематической карты лесотаксации представлен на рис. 3, *в*. При определении повыделенной атрибутивной информации на основе данных классификации происходит увеличение точности, и, как можно видеть, в целом наблюдается хорошее соответствие полученных оценок наземной карте лесотаксации.

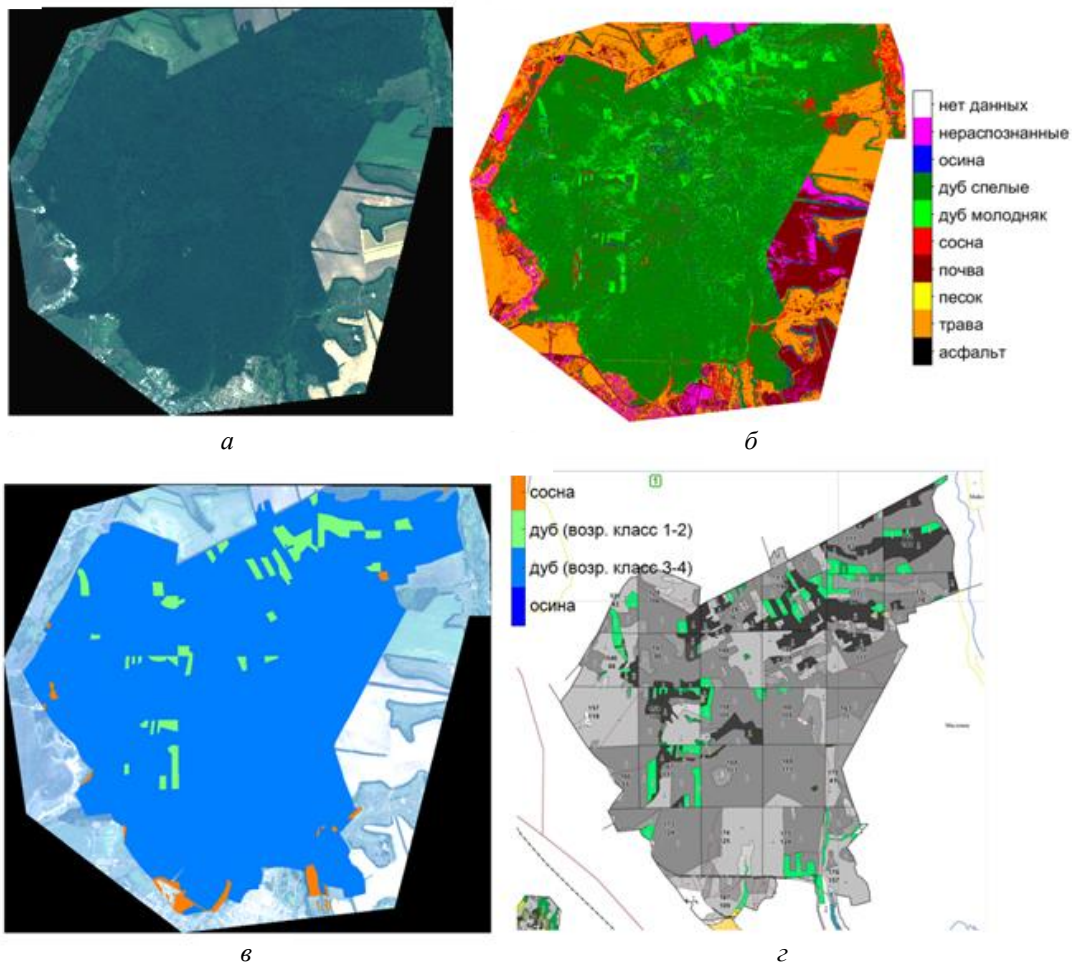



Рис. 3. Результат тематической обработки изображений WorldView-2: *а* – RGB изображение; *б* – классификация основных типов объектов; *в* – построение тематической карты доминантных пород с учетом возрастных классов; *г* – карта наземной лесотаксации

Таблица 2

Матрица ошибок распознавания породного состава и возрастных классов по изображению Worldview-2

| | **Осина** | **Дуб (вк 1-2)** | **Дуб (вк > 2)** | **Сосна** | **ОЕ** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Осина** | 69 | 203 | 3 | 6 | 0,75 |
| **Дуб (вк 1-2)** | 32 | 1 549 | 78 | 18 | 0,08 |
| **Дуб (вк > 2)** | 3 | 140 | 1 935 | 0 | 0,07 |
| **Сосна** | 0 | 33 | 0 | 496 | 0,06 |
| **СЕ** | 0,34 | 0,20 | 0.04 | 0,05 | |

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-01-00215 «Исследование оперативных возможностей гиперспектральных технологий ДЗЗ для решения региональных задач с использованием действующих и перспективных ГСК космического базирования».*

**Список литературы**

1. Keenan R.J. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review // Annals of Forest Science. 2015. Vol. 72. P. 145–167.

2. Cho M.A., Malahlela O., Ramoelo A. Assessing the utility WorldView-2 imagery for tree species mapping in a South African subtropical forest patch and the conservation implications:

Dukuduku forest patch as case study // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. Vol. 38. P. 349–357.

3. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery formapping West African agroforestry tree species / M. Karlson, M. Ostwald, H. Reese [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. № 50. P. 80–88.

4. Multi-phenology WorldView-2 imagery improves remote sensing of savannah tree species / S. Madonsela, M.A. Cho, R. Mathieu [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. № 58. P. 65–73.

5. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest / J. Tian, L. Wang, X. Li [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. Vol. 61. P. 22–31.

6. Testing the discrimination and detection limits of WorldView-2 imagery on a challenging invasive plant target / T.P. Robinson, G.W. Wardell-Johnson, G. Pracilio // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. Vol. 44. P. 23–30.

7. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images / F.H. Wagner, M.P. Ferreira, A. Sanchez [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 145(B). P. 362–377.

8. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3. 1973. № 6. P. 610–621.

9. Комплексирование классификаторов в задаче тематической обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений / Е.В. Дмитриев, В.В. Козодеров, А.О. Дементьев, А.Н. Сафонова // Автометрия. 2018. № 3. P. 3–13.

УДК 528.8

**В.А. Заичко, П.А. Лошкарев, С.В. Пушкарский**

ГК «Роскосмос», АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия

e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЕДИНОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА В РЕГИОНАЛЬНОМ РАЗВИТИИ

Рассмотрены вопросы рационального обеспечения потребителей данными дистанционного зондирования Земли из космоса. Для эффективного использования результатов космической съемки и создаваемых на их основе региональных тематических решений необходима взаимная увязка требований потребителей к характеристикам стандартных информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из космоса с возможностями космических систем ДЗЗ. Такая взаимная увязка решается в том числе путем создания единой территориально-распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли из космоса, которая осуществляет прием, обработку, хранение и распространения данных дистанционного зондирования Земли из космоса и продуктов, созданных на их основе.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, единая территориально-распределенная информационная система, стандартные продукты, геопортал, потребители, целевое планирование.*

Развитие высокопроизводительной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) до 2025 г., в соответствии с Федеральной космической программой, предполагает наличие следующей орбитальной группировки космических аппаратов (КА) ДЗЗ: «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ», «Канопус-В», «Канопус-В-ИК», «Обзор-Р», «Кондор-ФКА», «Метеор-М», «Арктика-М», «Электро-Л».

Для обеспечения ее функционирования по целевому назначению предусмотрена модернизация Единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ), предполагающей формирование как рационального состава и топологии наземных центров различных ведомств (в основном Роскосмоса и Росгидромета), так и оснащение их самыми современными техническими средствами и технологиями в интересах решения научных и прикладных задач широкого круга пользователей ведомственной принадлежности. Это необходимо в том числе для реализации взаимной увязки требований потребителей к характеристикам стандартных информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из космоса с возможностями космических систем ДЗЗ.

Количество, расположение и функции центров обеспечивают максимальную производительность орбитальной группировки КА ДЗЗ с селективным доступом, функционирующих в условиях прямого сброса информации и через спутник-ретранслятор, а также наличии ограничений на их расположение, определяемых заказчиком (например, привязка к органам исполнительной власти).

За прошедший год в составе ЕТРИС ДЗЗ созданы и модернизированы центры приема в Арктической зоне РФ (Дудинка, Мурманск) и Антарктиде, в том числе с передачей космической информации на стационарные центры ЕТРИС ДЗЗ через спутник-ретранслятор.

© Заичко В.А., Лошкарев П.А., Пушкарский С.В., 2019

Первостепенное внимание при этом уделяется технологичности аппаратно-программных средств, обеспечивающих наиболее простые, надежные и высокоавтоматизированные схемы обработки и хранения информации и сдерживающие возрастание количества рабочих мест и численности личного состава дежурных смен при увеличении орбитальной группировки КА ДЗЗ.

Увеличение количественного состава орбитальной группировки, типажа космических аппаратов, рост объемов информации, освоение новых спектральных диапазонов в условиях ограничений на ресурсные затраты требует обеспечения максимально возможной унификации технических, программных средств и технологий в центрах единой наземной инфраструктуры.

Наиболее перспективными объектами унификации являются представленные ниже.

Развитие технологий целевого планирования по следующим направлениям:

- комплексное планирование целевой съёмки для КА объединенной орбитальной группировки КА ДЗЗ;
- комплексное планирование сеансов связи с центрами приема информации и спутниками-ретрансляторами для КА объединенной орбитальной группировки КА ДЗЗ;
- комплексное планирование работы наземных средств приёма и обработки данных ДЗЗ;
- разработка сервисов потребителя для прогнозирования хода выполнения заявок на съемку.

Развитие технологий приема целевой информации с КА ДЗЗ по следующим направлениям:

- создание приёмных станций для высокоскоростных радиолиний перспективных КА ДЗЗ;
- внедрение автоматического приёма данных с КА ДЗЗ.

Развитие технологий обработки целевой информации с КА ДЗЗ по следующим направлениям:

- унифицированная обработка информации с различных КА ДЗЗ в рамках единого комплекса обработки нового поколения, базирующегося на современных подходах по распределенной обработке сверхбольших объемов данных, обладающего максимальной степенью автоматизации, позволяющего обрабатывать данные различных съемочных систем, реализующего все этапы потоковой обработки (первичная, стандартная, оценка качества, каталогизация, хранение, публикация);
- унификация процессов обработки – единое управления, единые интерфейсы оператора, единые подходы по оценке качества, единые форматы метаданных;
- унификация технических средств обработки информации с использованием вычислительного кластера однотипных относительно дешевых серверов, возможность установки комплекса обработки в распределенные центры обработки данных;
- унификация программных средств в части единых требования к специальному программному обеспечению (СПО) обработки: кроссплатформенность, динамические библиотеки, API, распараллеливание и распределение и другое.

Перспективным и реализуемым направлением является автоматизация обработки данных ДЗЗ на основе применения современных информационных технологий распределенных вычислений с генерацией продуктов основных уровней обработки практически из «нулевого» уровня.

Для расширения возможностей потребителей по получению данных ДЗЗ предусмотрено создание различных реализаций комплексов обработки на базе унифицированной платформы специального программного обеспечения.

Одними из основных условий повышения качества данных ДЗЗ, предоставляемых потребителям, являются следующие.

- повышение точностных характеристик бортовых измерителей;
- унификация состава, структуры и формы представления результатов бортовых измерений;
- геопривязка материалов ДЗЗ по опорным данным.

Соответствующие им технологические процессы могут быть также в значительной мере унифицированы, при этом будет учтены как специфики формализации задач, так и особенности бортовых систем КА ДЗЗ.

Реализация новой задачи создания координатной основы на базе сплошного покрытия высокого разрешения и введения её в состав распределенных банков данных будет обеспечивать точность и быстроту привязки снимков и явится еще одним универсальным системообразующим элементом наземной космической инфраструктуры.

Развитие технологий хранения и распространения целевой информации с КА ДЗЗ по следующим направлениям:

- оптимизация структуры хранения и каталогизации информационных продуктов ДЗЗ и сокращение времени выдачи продукции ДЗЗ потребителю;
- обеспечение территориально-распределенного доступа к информационным ресурсам.

Представленная совокупность технических решений и мероприятий позволяет посредством геопортала госкорпорации «Роскосмос», являющегося основным геоинформационным сервисом ЕТРИС ДЗЗ, наиболее эффективно использовать данные ДЗЗ из космоса для решения задач различного назначения.

Решение конечных задач по обеспечению потребителей данными дистанционного зондирования Земли из космоса наиболее эффективно в рамках единой территориально-распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли из космоса, предоставляющей условия для унификации и комплексирования средств при создании информационных продуктов и сервисов.

УДК 528

**В.С. Мурадян[1], Г.О. Тепаносян[2], Ш.Г. Асмарян[3], А.А. Овсепян[4], А.К. Сагателян[5]**

[1] Кандидат географических наук, [2] Кандидат биологических наук
[3] Кандидат географических наук, [4] Асспирант
[5] Доктор геолого-минералогических наук
Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Ереван, Армения
e-mail: vahagn.muardyan@cens.am, garik.tepanosyan@cens.am,
shushanik.asmaryan@cens.am, aza.hovsepyan@cens.am, info@cens.am

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ NDVI И КЛИМАТИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ В ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ НА ПРИМЕРЕ СЮНИКСКОГО РЕГИОНА, АРМЕНИЯ

Изучена динамика растительности, температуры и атмосферных осадков, их взаимосвязи и эффекты временных лагов (задержек) в горных экосистемах Армении с 1998 по 2013 г. В исследовании использовались спутниковые данные SPOT/VGT NDVI по трём участкам с разными типами растительности в Сюникском регионе Армении, в окрестностях Сисианской, Мегринской и Каджаранской метеостанций. Полученные результаты свидетельствуют как о значительном увеличении значения вегетационного индекса NDVI в течение всего вегетационного периода за всё время исследований, так и о временном лаге ответной реакции растительности на воздействие климатических факторов.

*Ключевые слова: NDVI, климатические факторы, горные экосистемы, эффект временного лага.*

**Введение.** Горные экосистемы относятся к экосистемам, наиболее подверженным сильному и быстрому воздействию климатических изменений. В частности, заметное влияние на них оказывают изменения температурного режима и количества атмосферных осадков [1–4]. Для получения полной картины воздействия климатических факторов на динамику растительности требуется целевое исследование взаимосвязей между растительностью и климатическими факторами на конкретных местностях в различных географических регионах [3, 5–7]. Это необходимо для сохранения биоразнообразия, поскольку горные экосистемы характеризуются исключительно богатой флорой и фауной, что делает эти экосистемы особенно чувствительными к климатическим изменениям.

Достоверную информацию о состоянии растительности позволяют получать традиционные полевые исследования. Однако изучать пространственно-временные связи между растительностью и климатическими факторами только лишь на основе традиционных методов достаточно трудно. В этом контексте действенным инструментом являются технологии дистанционного зондирования (ДЗ), в частности вегетационные индексы SPOT, применяемые как на глобальном, так и региональном уровне [5–7].

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI широко используется для изучения изменений растительного покрова горных экосистем, может применяться для характеристики ответной реакции растений на климатические изменения [8–14]. Этот вегетационный индекс вычисляется на основе изображений в красной и ближней инфракрасной спектральных зонах [3]. Проведённые ранее исследования подтверждают, что характерной особенностью ответной реакции растений на климатические изменения является эффект временного лага [9, 15, 16].

Данная работа направлена на изучение изменений значений NDVI и климатических факторов, их взаимосвязи и эффекта временных лагов на основе данных SPOT/VGT NDVI.

© Мурадян В.С., Тепаносян Г.О., Асмарян Ш.Г., Овсепян А.А., Сагателян А.К., 2019

**Материалы и методы.** Исследования проводились в Сюникском марзе (регионе) на юго-востоке Армении на территории площадью около 4 506 м$^2$ (рис. 1) и со специфическими природно-экономическими условиями. Климат сухой, с крайне неравномерным пространственным распределением годовых осадков и среднегодовой температурой 13,8 °С. Вегетационный период длится с апреля по октябрь [17].

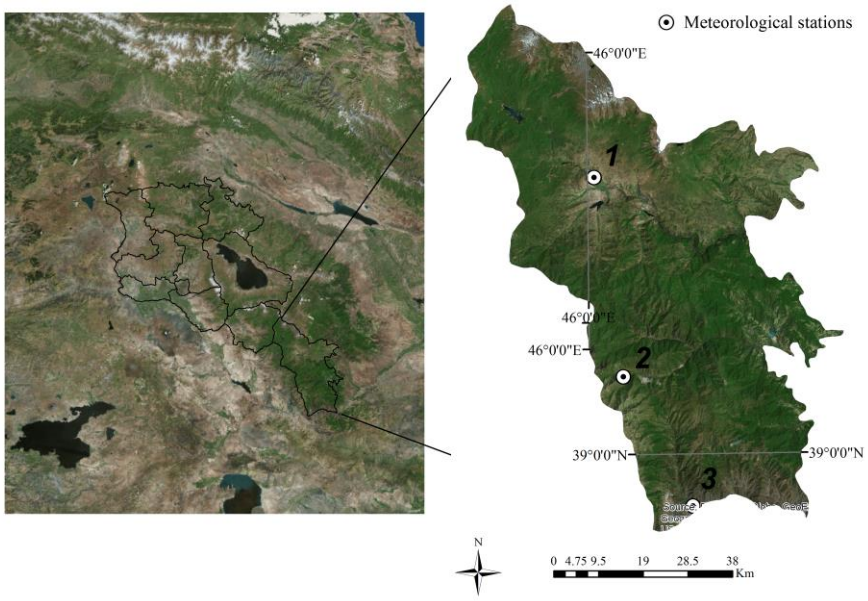



Рис. 1. Сюникский марз и метеорологические станции:
*1* – Сисианская, 1580 м; *2* – Каджаранская, 1843 м; *3* – Мегринская, 627 м

В окрестностях трёх метеорологических станций, расположенных на территории Сюникского марза, были выбраны три участка с разными типами растительности: степным, ксерофитным, луговым (рис. 1).

Для проведения исследования были использованы открытые данные SPOT/VGT NDVI (пространственное разрешение – 1 км) для периодов вегетации (апрель – октябрь) с 1998 по 2013 г. (336 декад (10 дней) (http://free.vgt.vito.be/). Эти спутниковые данные приемлемы для изучения динамики растительности благодаря многим преимуществам, среди которых чувствительность поглощения хлорофилла в красном спектре [18]. Средние значения NDVI по каждой из исследованных территорий получены с однородных площадей со средней площадью 3 × 3 км. Этот размер признан многими учёными оптимальным для получения средних значений NDVI из данных SPOT [19, 20]. Фактические значения NDVI вычислены по формуле NDVI = DN × 0,004 − 0,1, где DN – дискретное значение пикселов [18, 21, 22]. Помесячные значения вегетационного индекса рассчитаны путём усреднения данных, полученных на основе трёх декадных снимков. NDVI за весну (апрель – май), лето (июнь – август) и осень (сентябрь – октябрь) в период 1998–2013 гг. получены в виде средних величин соответствующих значений NDVI по каждому месяцу. Значение NDVI для ежегодного периода вегетации с апреля по октябрь рассчитано как среднее значение NDVI за тот же самый период. Суточные метеоданные с трёх погодных станций были предоставлены «Госгидромет» Службой МЧС Армении (рис. 1). Суммарное количество сезонных и годовых осадков и средняя температура рассчитаны за весь период исследований – с 1998 по 2013 г.

**Результаты и обсуждение**

***Внутригодовые изменения климатических факторов и значений NDVI в вегетационный период.*** На рис. 2 показаны изменения значений NDVI, количества осадков и температуры в период вегетации в Сюникском марзе по данным Сисианской, Мегринской и Каджаранской станций за 1998–2013 гг.

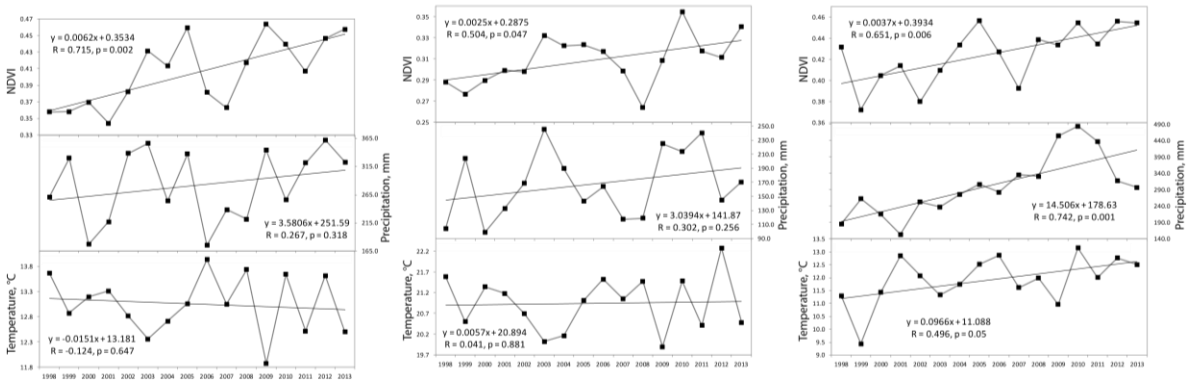



Рис. 2. Тренды и внутригодовые изменения значений NDVI, количество осадков, температуры в период вегетации в Сюникском марзе по данным Сисианской, Мегринской и Каджаранской метеостанций за 1998–2013 г. (слева направо)

Значительное увеличение среднего значения NDVI в период вегетации наблюдалось на всех трёх участках: около Сисианской ($R$ = 0,71, $p$ = 0,002), Мегринской ($R$ = 0,5, $p$ = 0,047), Каджаранской ($R$ = 0,65, $p$ = 0,006) станций. Среднее количество осадков в период вегетации в 1998–2013 гг. увеличилось значительно по данным Каджаранской станции ($R$ = –0,74, $p$ = 0,001) и незначительно – по данным Сисианской и Мегринской станций ($R$ = 0,27, $p$ = 0,318; $R$ = –0,3, $p$ = 0,256 соответственно). С 1998 по 2013 г., согласно данным Каджаранской станции, средняя температура в период вегетации значительно возросла ($R$ = 0,5, $p$ = 0,05); согласно данным Сисианской станции – незначительно снизилась ($R$ = –0,124, $p$ = 0,647), а данные Мегринской станции указывают на относительно стабильный температурный тренд ($R$ = 0,04, $p$ = 0,881). На рис. 2 показано, что изменения значений NDVI совпадают с изменением количества осадков на Сисианском и Мегринском участках и температуры – на Каджаранском участке. По данным Сисианской станции, количество осадков в период вегетации относительно большое в 2003, 2005, 2009, 2012 гг. и небольшое в 2000, 2006, 2010 гг. и совпадает с пиковыми и минимальными значениями NDVI за тот же период. По данным Мегринской станции, максимальное количество осадков в период вегетации в 2003, 2010 гг. и минимальное в 2000, 2007, 2012 гг. соответствует максимальным и минимальным значениям вегетационного индекса. По данным Каджаранской станции, пиковое количество осадков и пиковые значения вегетационного индекса достигнуты в 2001, 2005, 2010 гг., а низкие значения наблюдались в 1999, 2003, 2007 и 2009 гг.

Учитывая повышение значений индекса NDVI на всех трёх участках, можно сделать предположение о росте продуктивности растений в Сюниксом марзе с 1998 по 2013 г.

***Внутригодовые изменения климатических факторов и сезонных значений NDVI.*** На рис. 3 показаны изменения сезонных значений NDVI, количество осадков, температуры в Сюникском марзе по данным Сисианской, Мегринской и Каджаранской станций за 1998–2013 гг. Небольшое повышение среднего значения NDVI в весенние месяцы 1998–2013 гг. установлено только на Мегринском участке ($R$ = 0,24, $p$ = 0,373), а незначительное снижение этих значений наблюдается как на Сисианском, так и Каджаранском участках ($R$ = –0,013, $p$ = 0,961; $R$ = –0,27, $p$ = 0,265 соответственно). Среднее количество осадков, по данным Сисианской станции, в весенние месяцы слегка снизилось ($R$ = –0,172, $p$ = 0.524), а относительно стабильный тренд установлен данными Мегринской станции ($R$ = –0,001, $p$ = 0,997). На значительное увеличение среднего количества осадков в весенние месяцы указывают данные Каджаранской станции ($R$ = 0,5, $p$ = 0,05). Средняя температура в весенние месяцы характеризуется относительно стабильным трендом согласно данным Сисианской и Мегринской станций

($R$ = 0,004, $p$ = 0,989; $R$ = 0,119, $p$ = 0,661 соответственно), а о небольшом повышении свидетельствуют данные Каджаранской станции ($R$ = 0,40, $p$ = 0,118).

Значительное повышение среднего значения NDVI и количества осадков в летние месяцы 1998–2013 гг. наблюдались на всех трех участках: Сисианском (соответственно $R$ = 0,82, $p$ < 0,01; $R$ = 0,6, $p$ = 0,013), Мегринском (соответственно $R$ = 0,56, $p$ = 0,024; $R$ = 0,60, $p$ = 0,24), Каджаранском (соответственно $R$ = 0,84, $p$ < 0,01; $R$ = 0,7, $p$ = 0,002). Средняя температура в летний сезон незначительно повысилась согласно данным Сисианской и Мегринской станций (соответственно $R$ = –0,24, $p$ = 0,375; R = –0,21, $p$ = 0,43). Установлено также умеренное повышение средней температуры в летние месяцы по данным Каджаранской станции ($R$ = 0,31, $p$ = 0,238). Повышение среднего значения вегетационного индекса в летние месяцы наблюдалось на всех трёх участках: Сисианском ($R$ = 0,48, $p$ = 0,058), Мегринском ($R$ = 0,5, $p$ = 0,054), Каджаранском ($R$ = 0,68, $p$ = 0,004).

Среднее количество осадков, по данным Сисианской станции, в осенние месяцы незначительно снижается ($R$ = -0,27, $p$ = 0,313), сохраняя относительно стабильный тренд по данным Мегринской станции ($R$ = -0,036, $p$ = 0,9). О значительном увеличении среднего количества осадков в весенние месяцы свидетельствуют данные Каджаранской станции ($R$ = 0,6, $p$ = 0,016). Средняя температура в осенние месяцы характеризуется относительно стабильным трендом по данным Сисианской и Мегринской станций (соответственно $R$ = –0,008, $p$ = 0,748; $R$ = 0,084, $p$ = 0,758) и незначительным повышением, по данным Каджаранской станции ($R$ = 0,33, $p$ = 0,214).

Как видно из рис. 3, на Сисианской станции изменение средних значений вегетационного индекса в летние и осенние месяцы полностью соответствует изменениям количества осадков в летний сезон и противоположно температурным колебаниям.

Максимальные средние значения NDVI в 2003, 2009, 2013 гг. и минимальные – в 2001, 2006, 2008, 2010 гг. соответствуют средним максимальным и минимальным количествам осадков в летние месяцы и противоположны летней температуре.

Равным образом высокие средние значения вегетационного индекса в осенние месяцы 1999, 2003, 2005, 2009 гг. и его низкие значения в 2000, 2004, 2006, 2008, 2010 гг. соответствуют максимальным и минимальным средним значениям количества осадков в летние месяцы противоположны летней температуре.

По данным Мегринской станции, средние значения вегетационного индекса NDVI полностью соответствуют значениям количества осадков в весенние месяцы и противоположны весенней температуре. Пики средних значений вегетационного индекса в 2003, 2010, 2013 гг. и минимальных в 2000, 2008, 2012 гг. соответствуют высокими и низким значениям количества осадков в весенние месяцы противоположны весенней температуре. По данным Каджаранской станции, средние значения NDVI полностью соответствуют средним значениям температуры.

Например, средняя температура в весенние месяцы сравнительно высокая в 2000, 2001, 2005, 2008, 2012 гг. и низкая в 1999, 2002, 2007, 2009 гг. и совпадает с пиками и минимумами средних значений NDVI в весенние месяцы.

Как видно из рис. 2, в летние месяцы среднее значение NDVI совпадает с характером осадков. Среднее значение NDVI в осенние месяцы полностью соответствует средним значениям количества осадков в летние месяцы.

Например, высокие величины средних значений вегетационного индекса в осенние месяцы 2005, 2007, 2009 гг. и низкие в 2000, 2006, 2008 гг. совпадают с средними значениями количества осадков в летние месяцы.

В целом значительных изменений в продуктивности растений в весенние месяцы в период 1998–2013 гг. не установлено. Однако в летние и осенние месяцы наблюдалось значительное повышение значения вегетационного индекса.

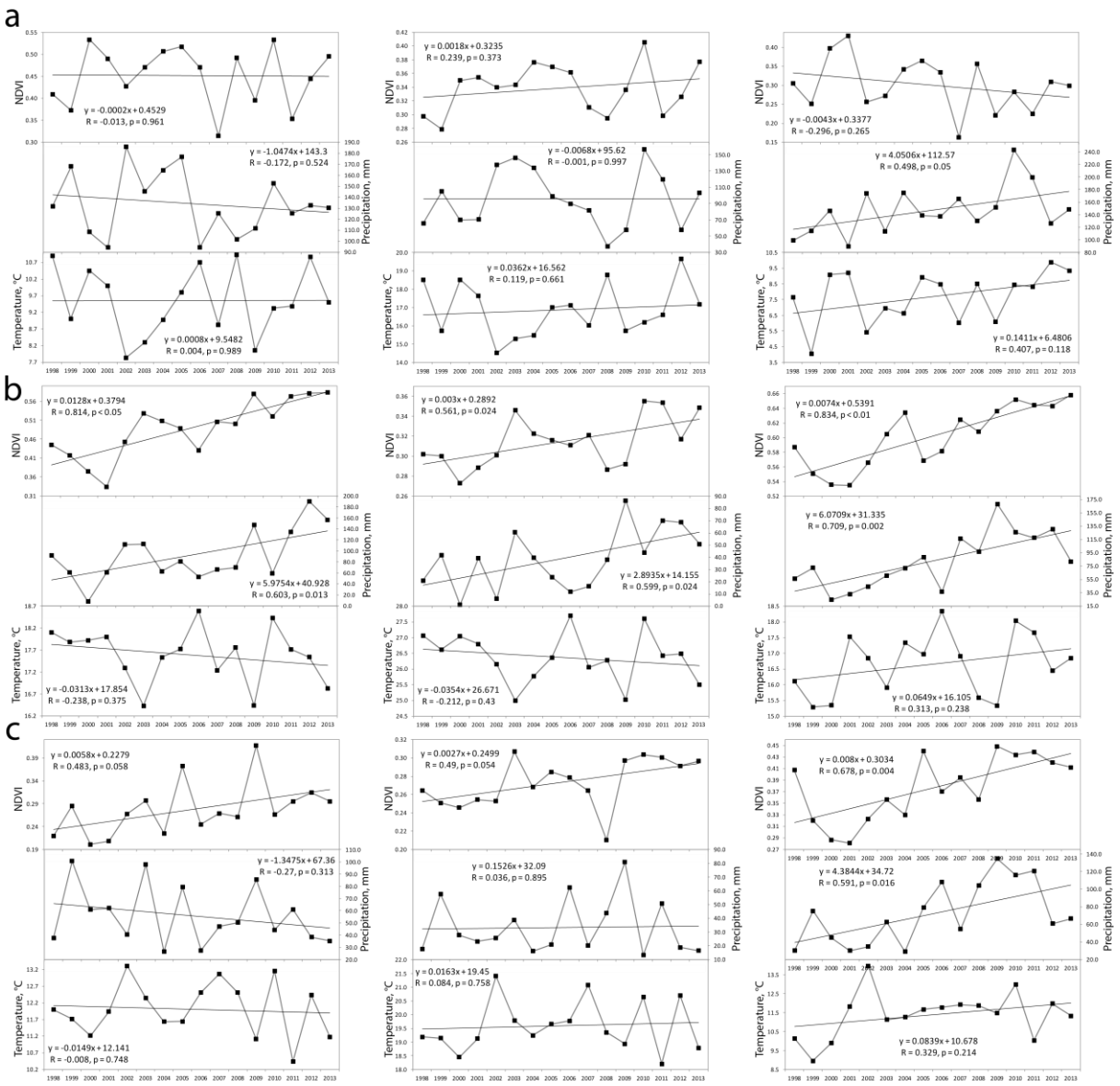



Рис. 3. Тренды и внутригодовые изменения значений NDVI, количество осадков и температуры в весенние (*a*), летние (*b*), осенние (*c*) месяцы на Сисианском, Мегринском и Каджаранском участках в 1998–2013 гг.

***Годовые корреляции между NDVI и климатическими факторами в период вегетации.*** Как осадки, так и температура способны воздействовать на NDVI, и для изучения этого воздействия на разные участки был проведен корреляционный анализ (табл. 2).

Как видно из табл. 1, в период вегетации значения NDVI на Сисианском и Мегринском участках значительно коррелируют с количеством осадков (соответственно $R = 0{,}55$, $p = 0{,}026$; $R = 0{,}53$, $p = 0{,}037$), а на Каджаранском участке установлена сильная корреляционная связь между значением NDVI и температурой ($R = 0{,}62$, $p = 0{,}11$).

Такие результаты можно объяснить тем, что Мегринский и Сисианский участки находятся соответственно в засушливом и полузасушливом районе, где растительность в период вегетации чувствительна к сезонным осадкам. Однако на Каджаранском участке, расположенном в районе с влажным климатом, температура является ограничительным фактором для роста растений [23].

Таблица 1

Коэффициенты годовой корреляции *R* и величина *p* между значениями NDVI, количеством осадков и температурой в Сюникском марзе за 1998–2013 гг.

| Станции | NDVI иосадки | | NDVI и температура | |
|---|---|---|---|---|
| | R | p | R | p |
| **Сисиан** | **0,55*** | 0,026 | –0,35 | 0,182 |
| **Мегри** | **0,53*** | 0,037 | –0,2 | 0,45 |
| **Каджаран** | 0,41 | 0,113 | **0,62**** | 0,01 |

** – значительно при 0,05; ** – значительно при 0,01*

***Сезонная корреляция между значениями NDVI и климатическими факторами.*** Ответная реакция вегетационного индекса на климатические факторы может различаться в зависимости от типа растительности и фазы роста [2] с очевидным эффектом временного лага [9, 18, 21]. Таким образом, с целью выявления сезонных различий и эффектов временных лагов климатических факторов на значения NDVI в течение всего периода вегетации нами проведён корреляционный анализ сезонных средних значений вегетационного индекса, осадков и температур в весенние (апрель – май), летние (июнь – август) и осенние (сентябрь – октябрь) месяцы.

Как показано в табл. 2, на Сисианском и Мегринском участках значение вегетационного индекса в летний сезон положительно коррелирует с весенне-летними осадками и отрицательно – с весенне-летней температурой, тогда как на Каджаранском участке наблюдается положительная корреляция с весенне-летними осадками, и температурой. Таким образом, в случае степной (Сисианский участок) и ксерофитной (Мегринский участок) растительности осадки оказывают положительное воздействие на значения NDVI, а температура – отрицательное.

В случае луговой растительности (Каджаранский участок) на значения NDVI положительно влияют как осадки, так и температура.

По данным Сисианской станции, значения NDVI в летние и осенние месяцы коррелируют положительно (соответственно $R$ = 0,76; $R$ = 0,60) с летними осадками и отрицательно (соответственно, $R$ = –0,55, $R$ = –0,56) – с летней температурой.

Таблица 2

Коэффициенты сезонной корреляции *R* между значениями NDVI, количеством осадков и температурой в Сюникском марзе за 1998–2013 гг.

| Станции | NDVI | Осадки | | | Температура | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Весна | Лето | Осень | Весна | Лето | Осень |
| **Сисиан** | **Весна** | 0,00 | | | 0,32 | | |
| | **Лето** | 0,15 | **0,76**** | | –0,25 | **–0,55*** | |
| | **Осень** | 0,22 | **0,60*** | 0,48 | –0,40 | **–0,56*** | –0,22 |
| **Мегри** | **Весна** | 0,45 | | | –0,18 | | |
| | **Лето** | **0,69**** | 0,39 | | **–0,32*** | –0,16 | |
| | **Осень** | 0,48 | **0,55*** | 0,02 | –0,27 | –0,23 | 0,02 |
| **Каджаран** | **Весна** | 0,08 | | | **0,73*** | | |
| | **Лето** | **0,65*** | **0,80**** | | 0,36 | 0,40 | |
| | **Осень** | 0,53 | **0,82**** | **0,68*** | 0,40 | 0,37 | 0,37 |

** – значительно при 0,05; ** – значительно при 0,01*

Эффект временного лага между значениями NDVI в осенние месяцы и количеством летних осадков/температуры показывает, что влияние количества осадков/температуры на степную растительность слабее, чем таковое летом. Кроме того, воздействие летних осадков на степную растительность в летние/осенние месяцы очевиднее, чем воздействие температуры. По данным Мегринской станции, значение NDVI в летние месяцы положительно коррелирует ($R$ = 0,69) с весенними осадками и отрицатель-

но ($R$ = –0,32) – с весенней температурой. Значения NDVI в осенние месяцы положительно коррелируют с летними осадками ($R$ = 0,55). Таким образом, можно говорить о значительном эффекте временного лага весенних осадков/температуры на значения NDVI в летние месяцы и летних осадков – на значения вегетационного индекса в осенние месяцы. Весенние осадки оказали положительное влияние на ксерофитную растительность в летний период, а весенняя температура – отрицательное. Из табл. 2 следует, что весной значительная положительная корреляция ($R$ = 0,73) наблюдаеттся только между значениями NDVI и температурой на Каджаранском участке. Таким образом, луговая растительность чувствительна к весенним температурам. Значения NDVI в летние месяцы положительно коррелируют с весенне-летними осадками (соответственно $R$ = 0,65, $R$ = 0,80). Наблюдается очевидный эффект временного лага весенних осадков на луговую растительность в летние месяцы, однако влияние летних осадков значительнее с более высоким значением $R$. Значения NDVI в осенний период положительно коррелируют с количеством осадков в летне-осенний сезон (соответственно $R$ = 0,82, $R$ = –0,68). Более того, эффект временного лага осадков в летние месяцы на значения NDVI в осенние месяцы даже более значителен, чем воздействие осенних осадков.

**Заключение.** В ходе исследования проведён анализ временных трендов значений SPOT/VGT NDVI и климатических факторов, изучена взаимосвязь и эффекты временных лагов между значениями данных снимков ДЗ SPOT/VGT NDVI и климатическими факторами в Сюникском марзе Армении в течение вегетационного периода (апрель – октябрь) в период 1998–2013 гг. Для этой цели использованы данные о годовых и сезонных значениях NDVI, количестве атмосферных осадков и температуре, полученные с трёх метеорологических станций Сюникского марза: Сисианской, Мегринской, Каджаранской. Результаты свидетельствуют о значительном повышении среднего (годового) значения NDVI в период вегетации. Значительное увеличение среднего количества осадков и температуры в период вегетации установлено только на Каджаранском участке. Незначительное повышение среднего значения NDVI в весенние месяцы наблюдалось только на Мегринском участке. В целом относительно стабильные тренды среднего количества осадков и температуры за весенние месяцы наблюдались на Сисианском и Мегринском участках, а тренд к повышению – на Каджаранском участке. Значительное повышение среднего значения NDVI и количества осадков в летний период установлено на всех участках. Наблюдалось незначительное снижение температуры на Сисианском и Мегринском участках и ее повышение – на Каджаранском участке. Средние значения NDVI в осенние месяцы значительно повышены в течение всего периода 1998–2013 гг. Влияние климатических факторов снижено на Сисианском, показывает относительно стабильный тренд на Мегринском и увеличивается на Каджаранском участке. Корреляционный анализ между значениями NDVI и климатическими факторами показал, что температура оказывает отрицательное воздействие на рост растительности в засушливых и полузасушливых областях и положительное – на растительность на влажных территориях в течение всего периода вегетации, а осадки положительно влияют на рост всех типов растительности.

Полученные результаты свидетельствуют об очевидном эффекте временного лага ответной реакции растений на климатические факторы.

**Список литературы**

1. Fort M. Impact of climate change on mountain environment dynamics. An introduction // Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine. 2015.

2. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: a case study in the Tianshan Mountains, China / Qun Liu. URL: https://www.researchgate.net /publication/306265291_NDVI-based_vegetation_dynamics_and_their_response_to_recent_climate_ change_a_case_study_in_the_Tianshan_Mountains_China (accessed on Jun 24, 2019).

3. Hou G., Zhang H., Wang Y. Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in the Changbai Mountain Natural Reserve // J. Mt. Sci. 2011. № 8. P. 865–875.

4. Outlook on climate change adaptation in the Tropical Andes mountains. URL: https://www.researchgate.net/publication/302881486_Outlook_on_climate_change_adaptation_in_the_Tropical_Andes_mountains (accessed on Jun 24, 2019).

5. The relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and climate factors in the semiarid region: A case study in Yalu Tsangpo River basin of Qinghai-Tibet Plateau / B. Guo, Y. Zhou, S. Wang, H. Tao // J. Mt. Sci. 2014. № 11. P. 926–940.

6. Regional vegetation dynamics and its response to climate change – a case study in the Tao River Basin in Northwestern China – IO Pscience. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/12/125003/meta (accessed on Jun 24, 2019).

7. Variability and climate change trend in vegetation phenology of recent decades in the Greater Khingan Mountain area, Northeastern China / H. Tang, Z. Li, Z. Zhu [et al.] // Remote Sensing. 2015. № 7. P. 11914–11932.

8. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1458&lang=eng (accessed on Jun 25, 2019).

9. Responses of Vegetation growth to climatic factors in Shule River Basin in Northwest China: a panel analysis. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/9/3/368 (accessed on Jun 25, 2019).

10. The Response relation between climate change and NDVI over the Qinghai-Tibet plateau – semantic scholar. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/The-Response-Relation-between-Climate-Change-and-Weishou-Di/e99167efa21f6e9610f37c07480cc0ffed8c2a26 (accessed on Jun 25, 2019).

11. Climatic factors driving vegetation declines in the 2005 and 2010 Amazon droughts. URL: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0175379 (accessed on Jun 25, 2019).

12. Correlation between Climate factors and vegetation cover in Qinghai Province, China. URL: https://file.scirp.org/Html/1-8401765_77857.htm (accessed on Jun 25, 2019).

13. A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years // Science Direct. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717710005297 (accessed on Jun 25, 2019).

14. Studying the dynamics of mountain ecosystems in the context of climate change employing remotely sensed data. URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-pie/10444/104440A/Studying-the-dynamics-of-mountain-ecosystems-in-the-context-of/10.1117/12.2279423.short (accessed on Jun 25, 2019).

15. A spatial regression procedure for evaluating the relationship between AVHRR-NDVI and climate in the northern Great Plains: International Journal of Remote Sensing: Vol 25, No 2 Available online: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000102548?journalCode=tres20 (accessed on Jun 25, 2019).

16. A statistical analysis of the relationship between climatic factors and the Normalized difference vegetation index in China // International Journal of Remote Sensing. Vol 32, № 14. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161003801336 (accessed on Jun 25, 2019).

17. Applying landscape-ecological concept and GIS modelling for assessing and mapping of ecological situation of mountainous landscapes (on the case of Syunik marz, Armenia) // Geocarto International. Vol 30, № 10. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2015.1013065 (accessed on Jun 25, 2019).

18. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China // Springer Link. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11442-010-0163-4 (accessed on Jun 25, 2019).

19. Using AVHRR data for quantitive estimation of vegetation conditions: Calibration and validation // Science Direct. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117797011290 (accessed on Jun 25, 2019).

20. Drought Monitoring from Space // Springer Link. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-9472-1_13 (accessed on Jun 25, 2019).

21. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China – Chuai – 2013 – International Journal of Climatology // Wiley Online Library. URL: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.3543 (accessed on Jun 25, 2019).

22. Vegetation Dynamics and their response to climatic variability in China. URL: https://www.hindawi.com/journals/amete/2017/8282353/ (accessed on Jun 25, 2019).

23. Ziroyan A. Ecological-energetic assessment of vegetation of Armenia. Lusabac: Yerevan, Armenia, 2008.

УДК [551.507: 551.524]: 550.34

**Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев**
Кандидат физико-математических наук,
Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке,
Бишкек, Киргизия
e-mail: l.sverdlik@mail.ru, sanzhar.imashev@gmail.com

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫХ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ ЕСТЕСТВЕННОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Для выявления откликов возмущений, вызванных источниками естественного (землетрясения) и антропогенного (промышленные взрывы) происхождения, проанализированы данные спутникового дистанционного зондирования атмосферы над территорией Кыргызстана. На примере мощного взрыва в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата) и последовавших за ним землетрясений проведена оценка пространственного масштаба аномальных возмущений температуры.

*Ключевые слова: промышленный взрыв, землетрясение, спутниковые данные, временные ряды температуры, тропопауза, аномалии.*

**Введение.** Важными с точки зрения уточнения глубинного строения земной коры и критериев, используемых для прогноза землетрясений, но достаточно редкими вследствие значительных материальных затрат являются исследования последействий мощных промышленных взрывов [1]. Один из таких экспериментов – взрыв на месте строительства плотины в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата), мощность которого составляла 2,8 кТ в тротиловом эквиваленте и который был проведен 22 декабря 2009 г. в 06:54 UTC. С 20 по 25 декабря 2009 г. Научной станцией РАН в г. Бишкеке совместно с другими организациями из Кыргызстана, Казахстана, России и Германии были проведены комплексные наблюдения. В результате были получены данные об изменении электромагнитных параметров земной коры, параметрах среды вдоль трассы распространения сейсмической волны и возникновении наведенной сейсмической активности. Последействием мощного взрыва явилось зафиксированное через 12 с землетрясение энергетического класса K = 11,14 (M = 4,0), эпицентр которого находился на расстоянии ~16,0 км от места взрыва. Повторное землетрясение K = 11,44 (M = 4,1) произошло спустя два дня после взрыва (24 декабря 2009 г.) примерно в 150 км.

Основываясь на данных спутниковых измерений в качестве дополнения к результатам Камбаратинского эксперимента, мы провели ретроспективное исследование динамики пространственно-временного распределения аномалий температуры в области тропопаузы.

**Сейсмические и спутниковые данные.** Данные спутниковых измерений (MERRA 3D) были восстановлены над участком размером ±1° от эпицентра взрыва [2] на 10 стандартных изобарических уровнях от 500 до 70 hPa. Дискретизация исходных температурных данных $T(t)$ по времени составляла $\Delta t = 3h$. Для оценки пространственного распределения аномалий температуры использовались аналогичные наборы данных над 8 участками, смещенными на 2 и 4° по направлениям Север – Юг (N-S) и Восток – Запад (E-W) (рис. 1).

© Свердлик Л.Г., Имашев С.А., 2019

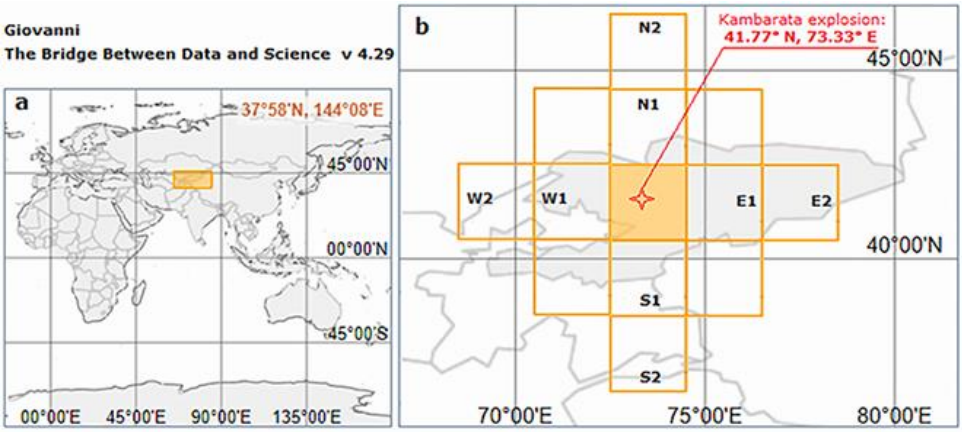



Рис. 1. Расположение исследуемого региона (*a*), места проведения Камбаратинского промышленного взрыва (*Kambarata explosion*: 41,77° N, 73,33° E, 22 декабря 2009 г., 05:54 *UTC*) и 8 секторов (N1-2; E1-2; S1-2; W1-2) для выявления пространственно-временного распределения возмущения атмосферы (*b*)

Сведения о землетрясениях, произошедших в исследуемый период (с 1 по 31 декабря 2009 г.), взяты из каталога, составленного по данным региональной сейсмологической сети KNET [3].

**Методика обработки временных рядов температуры атмосферы.** Выделение аномальных возмущений температуры атмосферы производилось в соответствии с алгоритмом, изложенным в работах [4, 5], и основано на расчетах произведения скользящих дисперсий (параметр $D$) временных рядов аномалий температуры ($\Theta T$) в разделенных тропопаузой слоях атмосферы, скорректированного на коэффициент корреляции ($R$) между изменениями температуры на рассматриваемых уровнях (интегральный показатель $D_{CORR}$). На предварительном этапе диагностирование аномалий во временных рядах температуры выполнялось над 8 фиксированными участками, как показано на рис. 1, *b*. В плане развития алгоритма создано дополнительное программное обеспечение для решения задачи построения карт пространственно-временного распределения аномальных возмущений температуры. Расчет интегрального показателя проводился в узлах равномерной сетки 0,5° × 0,625° в пределах координат 37–46° N и 65–85° E на выбранных изобарических уровнях [5] с разрешением по времени $\Delta t = 3h$.

**Обсуждение результатов.** Изменения интегрального параметра $D_{CORR}$ на уровнях 400–350 и 100 *hPa* с 10 по 30 декабря 2009 г. по меридиональному и широтному направлениям относительно места взрыва и сейсмического события магнитудой $M$ = 4,0 показаны на рис. 2.

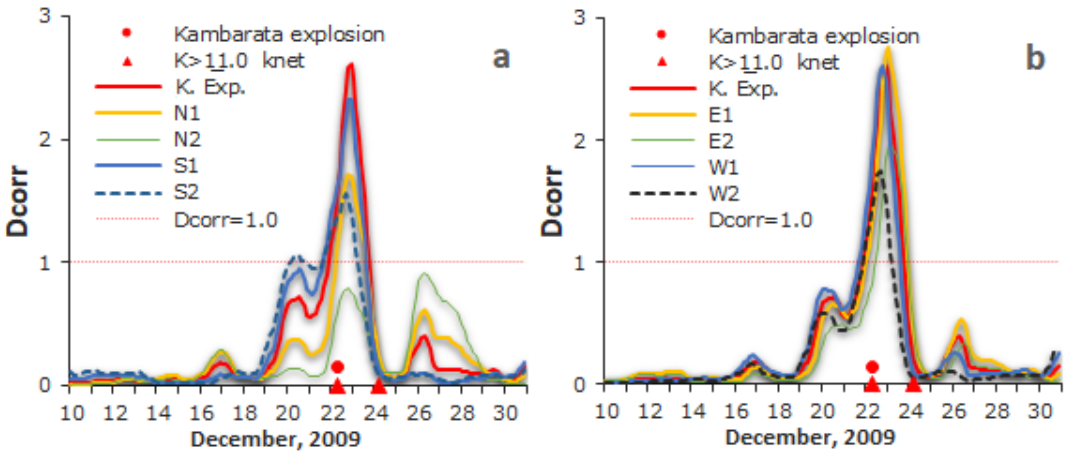



Рис. 2. Изменения интегрального параметра $D_{CORR}$ на уровнях 400–350 и 100 *hPa* с 10 по 30 декабря 2009 г. по меридиональному (*a*) и широтному (*b*) направлениям

Как видно, все графики демонстрируют высокую степень подобия поведения параметра DCORR. Над центральным участком (Kambarata explosion) области высоких значений (DCORR >1.0) предваряют события примерно на 6–12 часов. Над более удаленными участками (N2, S2, E2, W2) происходит ослабление корреляции между изменениями температуры в свободной тропосфере и области тропопаузы, а также снижение величины DCORR примерно на 30–40 %. Сразу после землетрясения M = 4,1 следовало резкое падение величины DCORR до фоновых уровней (менее 0,5).

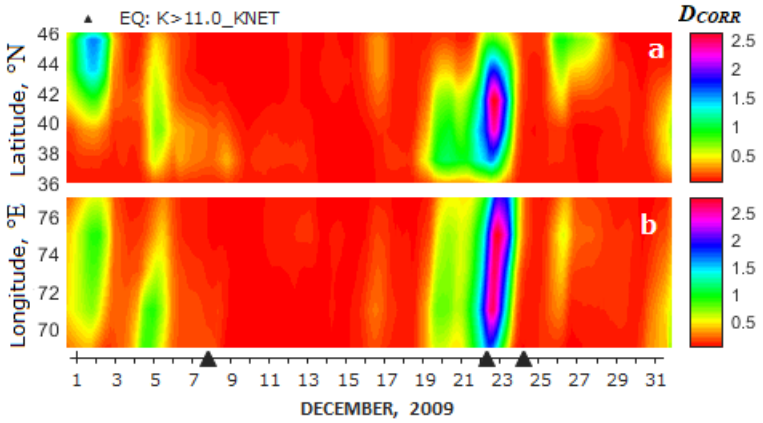



Рис. 3. Пространственно-временное распределение интегрального параметра $D_{CORR}$ ($\Delta t$ = 3 – $h$) над участками с координатами: 72,5–74,375 °E, 36,5–46,5 °N (N1-2; S1-2) (*a*) и 69,0–77,5 °E, 40,5–42,5 °N (W1-2; E1-2) (*b*) в декабре 2009 г.

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты расчета пространственного распределения интегрального параметра $D_{CORR}$ 22 декабря 2009 г. в 15:00 UTC. Формирование области высоких значений параметра $D_{CORR}$ четко синхронизировано как во времени, так и в пространстве с сейсмической активностью в регионе. Эта область достаточно локализована в пространстве с горизонтальными размерами, составляющими несколько градусов (±150–200 км), т.е. сопоставима по размерам с аномалиями уходящей длинноволновой радиации (OLR) [5].

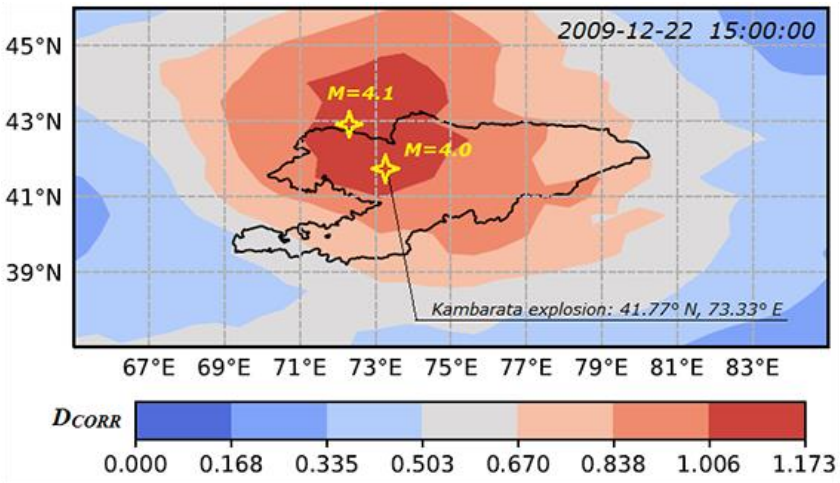



Рис. 4. Результаты расчета пространственного распределения интегрального параметра $D_{CORR}$ 22 декабря 2009 г. в 15:00 UTC

**Заключение.** В результате анализа данных спутниковых измерений температуры над местом проведения промышленного взрыва и эпицентром землетрясения магнитудой $M$ = 4,0 (22 декабря 2009 г. в 06:54 *UTC*) впервые определены пространственные масштабы аномального изменения температуры в зоне раздела тропосферы и страто-

сферы, которое проявлялось примерно за 0,5–1,0 сутки до рассматриваемых событий и сопровождалось увеличением интегрального показателя $D_{CORR}$. Пространственно-временное распределение области высоких значений этого параметра ($D_{CORR}$ >1,0) дает основание предполагать возможную связь с подготовкой к землетрясению. В данном случае природные (аномальный перепад температуры) и антропогенные (промышленный взрыв) возмущения могли, вероятно, играть роль триггерного механизма.

Сравнение атмосферных эффектов, производимых промышленными взрывами и сейсмическими событиями в полной мере не удалось, что можно объяснить низким временным разрешением данных спутниковых измерений температуры.

*Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за обеспечение свободного доступа к данным спутниковых измерений.*

**Список литературы**

1. Брагин В.Д. Сейсмические исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) // Вестн. КРСУ. 2011. Т. 11, № 4. С. 97–103.
2. The NASA GES-DISC. URL: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.
3. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и НС РАН в г. Бишкеке.
4. Sverdlik L.G., Imashev S.A. Diagnosis of atmospheric temperature anomalies in seismically active regions of Asia on the basis of satellite data // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2018. V. 11, № 8. P. 956–963. DOI: 10.17516/1999-494X-0117.
5. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.

УДК 502.171; 504.064.37; 528.85; 556.16

**А.Г. Терехов, А.А. Пак**

Кандидат технический наук, Институт информационных
и вычислительных технологий, Алма-Ата, Казахстан
e-mail: aterekhov1@yandex.ru, aa.pak83@gmail.com

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО АВТОНОМНОГО РАЙОНА КНР

Представлена система дистанционного зондирования СУАР КНР, предназначенная для сбора гидрологической информации. Информация собирается в бассейнах трансграничных с Казахстаном рек (Иле, Черный Иртыш) и внутренних территориях (Джунгарская равнина), куда приходят магистральные водные каналы из р. Черный Иртыш. Объектами спутникового мониторинга являются озера, водохранилища, речные русла, водные каналы и пахотные земли. Используются спутниковые снимки Landsat-5, 7, 8, Sentinel-2A, а также субметровая съемка и DEM из системы Google Earth. Контролируются площади водных зеркал, запасы воды в водохранилищах, расход воды в реках, площади поливной пашни. Методика обработки ДДЗ включает автоматическую классификацию, экспертную фото интерпретацию, 3D-модели-рование русла каналов и гидравлические расчеты.

*Ключевые слова: система мониторинга, трансграничный речной бассейн, спутниковые снимки, водохранилище, речное русло, магистральный водный канал.*

**Введение.** В Центральной Азии существуют трансграничные речные бассейны крупных, региональных рек – Ил и Иртыш (в Китае – Черный Иртыш), верховья которых относятся к Синьцзян-Уйгурскому автономному району (СУАР) КНР, а низовья – к Казахстану. Экологическая стабильность и эффективное администрирование водопользованием в низовьях трансграничных рек в условиях аридного климата требует подробной гидрологической информации по всему бассейну.

Сельскохозяйственное орошение, гидроэнергетика, промышленное и бытовое водопользование в Казахстанских секторах бассейнов трансграничных рек Иле и Иртыш, включая водоснабжение столицы Казахстана (г. Нур-Султан), требуют эффективного водного администрирования, а значит, объективной гидрологической информации из верховий трансграничных бассейнов. В условиях ограниченности обмена оперативной гидрологической информации [1] региональная система дистанционного зондирования СУАР КНР, представленная в данной работе, является весьма востребованной.

**Территория мониторинга.** Мониторинг включал территорию формирования и потребление трансграничного речного стока, т.е. бассейны трансграничных рек (Или и Черный Иртыш) и магистральных водных каналов, транспортирующих речную воду во внутренние территории СУАР (Черный Иртыш – Карамай и Черный Иртыш – Урумчи).

Объектами мониторинга были выбраны: озера Джунгарской равнины – Эби-Нур и Манас; русла рек Иле, Текес, Каш; водохранилища китайской части бассейна реки Иле – Капшагайское (р. Текес) и Жарынтайское (р. Каш); магистральные водные каналы из р. Черный Иртыш во внутренние районы СУАР (Джунгарская равнина) (Черный Иртыш – Карамай и Черный Иртыш – Урумчи); а также поливная пашня.

**Спутниковая информация.** В системе мониторинга используются снимки Landsat-5, 7, 8 (с 1989 г.), Sentinel-2A [2], а также субметровая съемка и DEM из системы Google Earth.

© Терехов А.Г., Пак А.А., 2019

**Методика**. В зависимости от целевой задачи применяются различные методики обработки спутниковой информации.

- Площадь водного зеркала определяется с помощью классификации без обучения (ISODATA), с дополнительным экспертным дешифрированием в случае наличия помех от облачного или снежно-ледового покрова [3].
- Запас воды в рабочей части водохранилища рассчитывается на основе величины площади водного зеркала и альтиметрии резервуара [3].
- Площадь обводненной пашни и ее многолетние изменения оцениваются путем экспертного дешифрирования разновременной съемки Landsat [4].
- Картирование магистральных водных каналов с оценкой дат их строительства, пропускной способностью и фактической загрузкой осуществляется на основе разновременной съемки Landsat и субметровых снимков системы Google Earth [5]. Снимки сверхвысокого пространственного разрешения необходимы для восстановления геометрии русла канала и оценки ширины канала по урезу воды, а гидравлический метод расчета канала [6] служит основой для определения технических характеристик.
- Расход воды в реках оценивается через эмпирические зависимости, связывающие спектральные характеристики 10–20-километровых тестовых участков русел с расходом воды [7]. Подобный подход применим для среднегорья, когда количество русловых потоков в долине реки значимо зависит от расхода воды, а маскирующее влияние растительного покрова минимально (отсутствует древесная растительность). Обычно это реки со снежно-ледовым питанием, протекающие в широких и слабонаклоненных долинах предгорий.

**Полученные результаты.** В результате обработки спутниковых данных система дистанционного мониторинга СУАР КНР позволяет получать информацию о состоянии ключевых объектов [4].

- Для озер Джунгарской равнины Эби-Нур и Манас сформированы ряды 30-летней динамики площади водных зеркал периода 1989–2019 гг.
- Для водохранилищ китайской части долины р. Иле (Капшагайское водохранилище (р. Текес) и Жарынтайское водохранилище (р. Каш)) в оперативном режиме формируются квазисуточные базы данных рассчитанных запасов воды.
- Определена площадь обводненной пашни для бассейнов р. Иле и оз. Эби-Нур, а также ее изменения в период 1993–2016 гг.
- Проведено картирование межбассейновой воднотранспортной системы р. Кара-Ертис – Джунгарская равнина (каналы Кара-Ертис – Карамай и Кара-Ертис – Урумчи), оценены календарные даты строительства, пропускная способность и фактическая загруженность [5].
- На основе имеющихся наземных гидрологических данных по расходу воды в реках построены эмпирические зависимости между спектральными характеристиками тестовых участков русел рек Иле, Текес, Каш и расходом воды.

**Обсуждение.** Система дистанционного мониторинга территории СУАР КНР дает историческую (многолетние тренды) и оперативную гидрологическую информацию по водным ресурсам в китайских секторах трансграничных рек Иле и Иртыш и зависимых территорий. Мониторинг запаса воды в водохранилищах представляет собой основной оперативный ресурс необходимый для планирования водопользования в нижней, Казахстанской части бассейна р. Иле. Особое общественное беспокойство в Казахстане вызывают перспективы крупного и мелководного оз. Балхаш. Из-за мелководности его состояние нестабильно и зависит от водопотребления в СУАР КНР. Многолетние изменения различных параметров, связанных с формированием и водопотреблением трансграничных речных ресурсов на территории СУАР КНР, регистрируемые системой мониторинга, также представляют большой интерес для экспертного сообщества Казахстана.

**Перспективы развития**. Направлениями дальнейшего развития мониторинга территории СУАР КНР является развитие аналитических схем для прогноза режимов работы водохранилищ в китайской части бассейна р. Иле. Для этого планируется вклю-

чить в список используемых спутниковых данных, продукты USGS/EROS «Snow Depth» и «Snow Water Equivalent».

**Заключение**. В условиях дефицита оперативной гидрологической информации о верхних частях трансграничных речных бассейнов, относящихся к СУАР КНР, Казахстан, как страна низовий, вынуждена развивать систему спутникового мониторинга этих территорий. Существующая международная инфраструктура спутниковых продуктов позволяет организовывать эффективный мониторинг, опираясь на свободно распространяемую, бесплатную информацию.

*Работа выполнена при поддержке ГФ МОН РК № AP05134241.*

**Список литературы**

1. Сборник протоколов заседаний Казахстанско-Китайской совместной комиссии по использованию и охране трансграничных рек. 2001–2008. URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/protokols_kaz-china.pdf (дата обращения: 16.05.2019).

2. USGS Global Visualization Viewer Data Portal. URL: https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=0 (дата обращения: 10.04.2019)].

3. Терехов А.Г., Пак И.Т., Долгих С.А. Данные Landsat-5, 7, 8, и ЦМР в задаче мониторинга гидрологического режима Капшагайского водохранилища на реке Текес (китайская часть бассейна р. Иле) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 31–40.

4. Экспансия агроландшафта и состояние основных водных объектов на территории Синьцзян-Уйгурского автономного района (бассейны реки Иле и озера Эби-Нур) по данным спутниковой съемки / А. Терехов, М. Калимолдаев, И. Пак, С. Долгих // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: в 5 т. / под ред. В.Г. Сычёва, Л. Мюллера. М.: Изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. Т. 3. С. 219–223.

5. Терехов А.Г., Пак А.А., Исатаева Г.Н. Реконструкция параметров системы межбассейнового перераспределения стока «река Кара-Ертис – Джунгарская равнина» // Материалы Междунар. Азиат. школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем» Кыргызская Республика. Алматы, 2018. Ч. 2. С. 243–252.

6. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 311 с.

7. Терехов А.Г. Спутниковый мониторинг речного русла трансграничной р. Иле в задаче оценки расхода воды // Сб. тез. докл. 16-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 12–16 ноября 2018 г. М.: ИКИ РАН. С. 116. DOI: 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.

УДК 528

**Javier Rodriguez Utrilla[1], Álvaro Nogues Palenzuela[1], Domingo Alcaraz Segura[2], Emilio Guirado Hernandez[3]**

[1] Agroforestry responsible in Garnata Drone SL. 18013 Granada, Spain
[2] Department Botany, University of Granada, 18071, Granada, Spain
[3] Soft Computing and Intelligent Information Systems research group, University of Granada, E-18071 Granada, Spain
e-mail: jrodriguez@garnatadrone.com

# HOW TO APPLY REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR PRECISION FARMING: 2 PRACTICAL CASES BY GARNATA DRONE

In this report we show two different cases which Remote Sensing can help Precision Farming techniques to optimize and improve profits in the agricultural sector. First, we`ll show a practical case in an olive trees field and second an example of how to monitoring a greenhouse crop with aerial images and deep learning techniques.

*Keywords:* UAV, remote sensing, deep-learning, agricultural monitoring, precision farming, OBIA, green-houses, olive trees.

**Introduction.** Terms like precision agriculture (PA), precision farming, site-specific crop management or even site-specific farming suggest that agricultural management can be practiced with high precision. Consequently, PA provides an alternative and realistic means to reduce and optimize the use of potentially harmful compounds and thus can promote a healthier environment for humans [1].

The world's food scenery is changing fast rising the global demand and increasing the cost of agricultural inputs [2]. The adoption of this kind of technology is lower than 5% usually in countries, therefore is more than 30 % growth in USA [3].

The general stages of PA practice are data collection, field variability mapping, decision making, and finally management practice. In particular, it is critical to obtain up-to-date images/maps during the process of decision making, thus field variability could be mapped using remotely sensed imagery. Drones play a special role in this field [4].

Hence, it is critical that farmers/Governments know where these variations exist in their fields and so they can adjust their farming practices accordingly [5]. Specifically, changes in remotely sensed reflectance can be detected before symptoms such of infections become visible to the human eye [1, 6].

Because of that, we can advise our clients and calculate terms of productivity, fertilization maps, irrigation studies, early detection of pest/diseases [7], tree counting and damage assessment or automatic detection of areas/species of high ecological value for the design of management plans.

All the factors that we consider are those that we obtain from the multispectral index generation, as NDVI, NDWI, RVI, RI, GNDVI [8], and we analyze soil and plant, climate and DTM.

Here we present 2 different cases of study to show how this methodology can be adapted to any kind of crop, it can be useful in greenhouses crops too, improving and modernizing the agroforestry sector by using the information obtained through remote sensing and changing the traditional farming practices.

© Javier Rodriguez Utrilla, Álvaro Nogues Palenzuela, Domingo Alcaraz Segura, Emilio Guirado Hernandezs, 2019

## Material and Methods

***Study Sites.*** Two different field trials in Andalucia are included in this report. The first trial (Case A) is an Olive Trees field located in a production farm in the region of "Montes Orientals" in Granada province, Spain (37°23'33.93"N, 3°24'40.93"O) (Fig. 1).

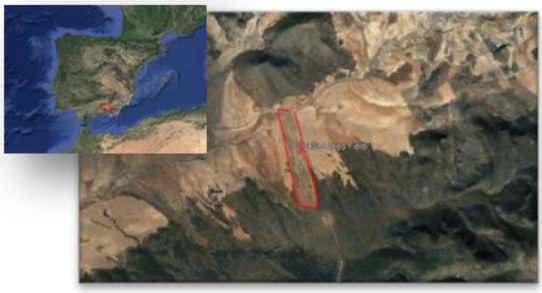


Fig. 1. Study Area and location of olive trees field. Image Source: Google Earth

The area has 11000 olive trees in 51 hectares of Picual variety, planted in 2006 at 7 × 6 m with drip irrigation system incorporated.

The second trial (CASE B) are three greenhouses situated in El Ejido, Almeria province (36°44'14.68"N, 2°46'46.21"O), Spain (Fig. 2). First and second greenhouse with chocolate pepper and last of them cucumber, all of them in early stages.

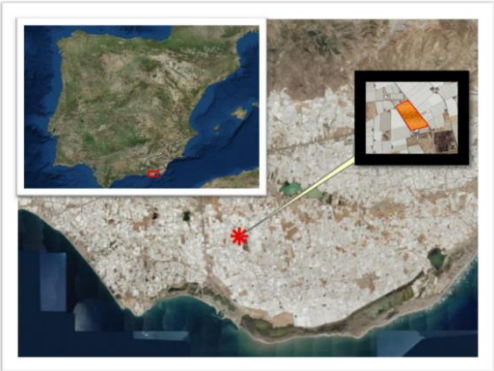


Fig. 2. Study site for case II. Three green houses in El Ejido, Almeria, Spain.
Image Source: ArcGIS

***Image Acquisition and Processing. Analysis overview.*** The airborne campaigns were conducted using an UAV Parrot Disco AG Pro with a multispectral camera Parrot Sequoia with 4 different channels, Red, Green, Near Infrared and Red Edge, operated by Garnata Drone SL. The flights were program with Pix4D capture software, according to several factors, including the orography, cultivation system, plantation frame, etc.

*CASE A) Olive Trees.* We plan 2 flights per year, first before Spring (February 2018). We have decided this test prior blooming to evaluate the real status in the crop field and design the amendments which the farmer needs to apply to correct the worst areas. Second flight in Summer (June 2018) during the drought and before the harvest. In this flight we can evaluate the historical status in the olive tree, in case it's necessary to correct the irrigation plan, and finally also we can check the effect that our recommendations to correct that.

The heightens was 120 m and overlap selected was more than 85% for a ground sample distance (GSD) of 13 cm/pixel.

*CASE B) Green House.* We plan a series of multispectral flights with a heightens of 80 m an overlap more than 90 % that give us a GSD of 7,13 cm/pixel. The temporary distance between flights is one month.

With images obtained from the drone, in both cases, we generate orto imaging processed by Pix4D software (Ecublens, Switzerland) and spectral index maps as NDVI (1), RVI (2), GNDVI (3) and NDWI (4) using SIG software, that allow us to detect effected areas that show high variability in one of those index, so we can separate the field into sectors based on the data found, using Object Based Image Analysis (OBIA) and Deep Learning.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{1}$$

where, NIR – Near Infrared, and Red – Red Channel

$$RVI = \frac{NIR}{Red} \tag{2}$$

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \tag{3}$$

where, Green – Green Channel

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}\ . \tag{4}$$

***Field Measurements***

*CASE A) Olive Trees.* Once we know the «Problem zones», we can sectorize the field and take samples in areas with low spectral index values so we create a more thorough study of vegetable variables from lab data (soil, water, leaf analysis, fat yield of the olive, etc.) which will explain the causes of anomalies and allow us to treat them in the proper way to optimize the crop productivity.

We simultaneously received the historical information and data of the crop field and produced an examination of the plantation that details all the necessary information for the decision-making process.

*CASE B) Green House.* We take LAI samples in several random points inside the green house (Fig. 3). Every point measure LAI index and mark with submetrical GPS the position. This measurement must be done at same time we flight UAV, so we can compare spectral image and ground control points.

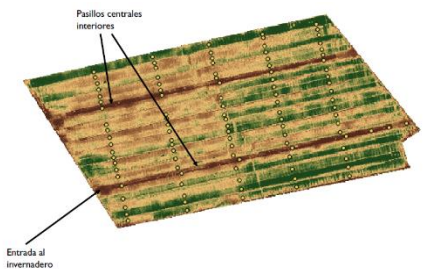



Fig. 3. Yellow points represent measurements of LAI index taken by technicians at the same time UAV is flying. Image Source: Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global – CAESCG, Almeria, Spain

**Results and discussion**

***Olive Fields.*** Using Deep Learning, we generate a classification that allows us to create a database in which each tree is related to the values of the vegetable variables taken into account.

We then recommended amendments to the property owner based on the sectorized maps (Fig. 4) who combined information from spectral index and plant soil samples taken in the problem areas.

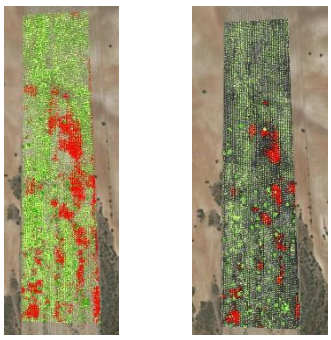


Fig. 4. Diagnosis map. Left February 2018 flight. In red worst areas that needs to be correct. Right February 2019 flight, the red zones have decreased after our amendments recommended. Image Source: Garnata Drone SL

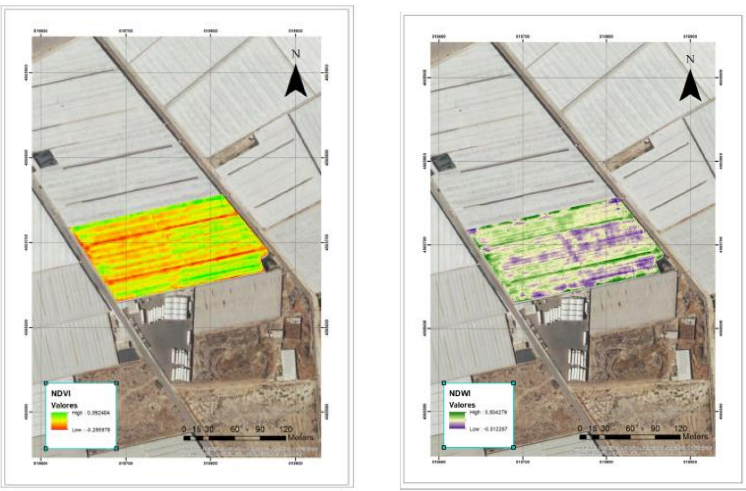
Below in the table 1 is a resume of last three years with and without assessment.

Table 1

| The average number of harvest per tree and hectare | | | |
|---|---|---|---|
| **Year** | **Kg per tree** | **Kg per Hectare** | **Advice Service** |
| 2017 | 18.18 | 3995.60 | No |
| 2018 | 7.27 | 1597.80 | Yes (Start) |
| 2019 | **22.72** | **4993.40** | Yes |
| **The average amount of profit per tree and oil per each kg of olive** | | | |
| **Year** | **Oil per each Kg (%)** | **Profit per tree (€)** | **Advice Service** |
| 2017 | 22 | 12.72 | No |
| 2018 | 26 | 7.18 | Yes (Start) |
| 2019 | **20** | **14.19** | Yes |

***Green House.*** The spectral data taken by drones will be validated with sensors arranged inside the greenhouses and treated by techniques of Object-Oriented Image Analysis (OBIA) and Deep Learning.

This will allow us to identify regions (Fig. 5) of the crop that present anomalies in the value of the greenery of the vegetation. These anomalies are directly related to the elements that can damage the crops. The results will be transferred to the technicians of the company, so that they can be applied in the treatment and monitoring of the status of the crops.




**NDVI** **NDWI**

Fig. 5. NDVI index in greenhouses (Left) and NDWI index (Right). Clearly the zones were sectorized based on the values of spectral information

This would allow us to obtain primordial information for the development of monitoring systems for the greenhouses' crops that would have high spatial and temporal precision.

**Conclusion.** The monitoring of crops through spectral images is a reality in the rural world. These types of images, which provide information on functional aspects of the plants, have traditionally been obtained from sensors on satellites. However, spectral images from drones are equally effective and much more affordable.

Applying this methodology either in the open air or in greenhouses allows us to improve the physiological state of the crop by perfecting the application process for different plants and crops of necessary treatments, therefore improving productivity while simultaneously doing our part in helping to protect the environment minimizing the inputs of phytosanitary and fertilizers, as we achieve better matching of fertilizer applications to crop yield.

Benefits to society include creation of high technology jobs and mitigation of environmental pollution arising from over – application of nitrogen and other fertilizers.

Therefore, is crucial than producers and scientist work together to create the future agriculture. This method does not replace all other source of information, just help to improve it.

**Acknowledgements.** We thank Garnata Drone SL, Centro Andaluz para la Evaluacion y Segumiento del Cambio Globlal (CAESCG), Domingo Alcaraz Segura (Universidad de Granada), Emilio Guirado (Universidad de Almería), Siham Tabik (Universidad de Granada), Javier Cabello (Universidad de Almeria), Anastasiia Safonova (Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University).

**References**

1. Chunhua Zhang, John M. Kovacs. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture // A review of Precision Agriculture. 2012. Vol. 13. № 6. 10.1007/s11119-012-9274-5.

2. R. Kent Crookston. A Top 10 List of developments and issues impacting crop management and ecology during the past 50 years. 2016.

3. Santhosh K. Seelan, Soizik Laguette, Grant M. Casady, George A. Seielstad. Remote sensing applications for precision agriculture // A learning community approach. 2003.

4. Swain K.C., Thomson S.J., Jayasuriya H.P.W. Adoption of an unmanned helicopter for lowaltitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop // Transactions of the ASABE, 2010. № 53. P. 21–27

5. Malthus T.J., Maderia A.C. High resolution spectroradiometry: Spectral reflectance of field bean leaves infected by Botrytis fabae // Remote Sensing of Environment. 1993. № 45. P. 107–116.

6. David J. Mulla. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture // Key advan ces and remaining knowledge gaps. 2012.

7. . Application of convolutional neural networks in detection of forest damage caused by the polygraphus proximus beetle / A. Safonova, A. Rubtsov, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura // Remote sensing. 2019. № 11 (6). P. 643.

8. Elaboración de protocolos para el seguimiento con precisión del estado de los cultivos bajo plástico mediante vuelos de dron externos al invernadero // Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG). 2019.

# Секция

# СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 517.938:621-83:621.313.323

**С.А. Бронов[1], Н.А. Никулин[2], П.В. Авласко[3], Е.А. Степанова[3], Д.Д. Кривова[3], А.М. Пичковский[4], Е.П. Чумакова[5]**
[1] Доктор технических наук, [2] Кандидат технических наук,
[3] Старший преподаватель, [4] Магистрант, [5] Инженер
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: nulsapr@mail.ru

## МОДЕЛИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Предложены оригинальные математические модели систем электропитания электроприводов для космических аппаратов. Модели имеют различную степень детализации, что позволяет выбирать вариант модели в соответствии с конкретной целью проектирования. Для структурного проектирования напряжения питания представляются идеализированными косинусоидальными функциями. Для функционального проектирования напряжения представляются как импульсные с учётом типа импульсов (например, широтно-импульсной модуляции). Для поэлементного проектирования учитываются внутренние параметры транзисторов и диодов ключей коммутатора. Это позволяет повысить точность моделирования (если выбирается более детальная модели) или повысить скорость моделирования (если выбирается упрощённая модель).

*Ключевые слова: космический аппарат, электропривод, система электропитания, моделирование.*

**Введение.** Системы электропитания являются важной частью исполнительных электроприводов [1]. Проектирование исполнительного электропривода может осуществляться на нескольких уровнях: концептуальный; структурный; функциональный; поэлементный.

На концептуальном уровне выбирают тип электродвигателя переменного тока и способ управления им: на структурном уровне – принципы преобразования напряжения питания от источника к напряжениям на клеммах обмоток; на функциональном – способ формирования питающего напряжения. Это может быть, например, широтно-импульсная модуляция (ШИМ) на основе коммутатора (инвертора). На поэлементном уровне разрабатывается принципиальная электрическая схема с выбором всех элементов, их типов и номиналов.

Для каждого уровня проектирования необходимы свои модели. В некоторых случаях желательно промоделировать режимы работы электропривода – как правило, это структурный и функциональный уровни. Тогда модели должны быть математическими, расчётными. Модели также должны быть разной степени детализации в соответствии с уровнем проектирования.

© Бронов С.А., Никулин Н.А., Авласко П.В., Степанова Е.А., Кривова Д.Д., Пичковский А.М., Чумакова Е.П., 2019

**Функциональные модели системы электропитания для электроприводов.** Простейшая модель системы электропитания сводится к системе уравнений и в идеализированной форме имеет вид

$$u_k(t) = U_m(t) \cdot \cos[\theta_s + \alpha_k + \varepsilon_s(t)], \ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s(t),$$

где $k$ – номер фазы; $u_k$ – мгновенное значение фазного напряжения; $U_m$ – амплитуда идеализированного питающего напряжения; $\alpha_k$ – фиксированный фазовый напряжения в соответствии с фазой; $\theta_s$ – текущая фаза питающего напряжения; $\omega_s$ – угловая частота питающего напряжения; $\varepsilon_s$ – регулируемый фазовый сдвиг; $t$ – время.

Импульсный характер питающих напряжений отражается схожими выражениями

$$\phi_{sk}(t) = U_m(t) \cdot \mathrm{sgn}\left\{\cos[\theta_s + \alpha_k + \varepsilon_s(t)]\right\}, \ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s(t),$$

где sgn( ) – функция знака, в результате которой формируется импульсный сигнал.

Для воспроизведения широтно-модулированного характера напряжения питания используется следующая функциональная модель, воспроизводящая в общем математическом виде операции электронного блока ШИМ:

$$\phi = \begin{cases} U_s, & U_{\sin}\sin(\theta_{\sin}) \geq U_\Delta \dfrac{2}{3}\arcsin[\sin(\theta_\Delta)]; \\ -U_s, & U_{\sin}\sin(\theta_{\sin}) < U_\Delta \dfrac{2}{3}\arcsin[\sin(\theta_\Delta)], \end{cases}$$

где $\varphi$ – потенциал напряжения на выходной клемме преобразователя; $U_s$ – напряжение постоянного тока источника питания; $U_{\sin}$ – амплитуда синусоидального напряжения, которое необходимо воспроизвести с помощью ШИМ; $\theta_{\sin}$ – текущая фаза синусоидального напряжения, которое необходимо воспроизвести с помощью ШИМ; $U_\Delta$ – амплитуда треугольного импульсного напряжения; $\theta_\Delta$ – текущая фаза треугольного импульсного напряжения.

Обычно произвольно (с помощью системы управления) задаётся $\theta_{\sin}$, а $\theta_\Delta = n_s\theta_{\sin}$, где $n_s$ – число импульсов треугольного импульсного напряжения на период синусоидального напряжения.

Для учёта реальных параметров транзисторно-диодного коммутатора на поэлементном уровне проектирования необходимо учитывать его реальную схему (рис. 1–3).

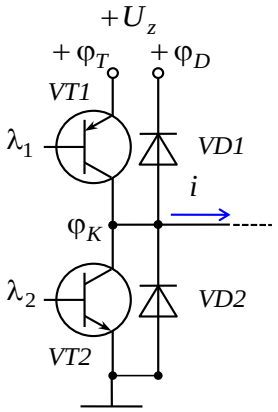



Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

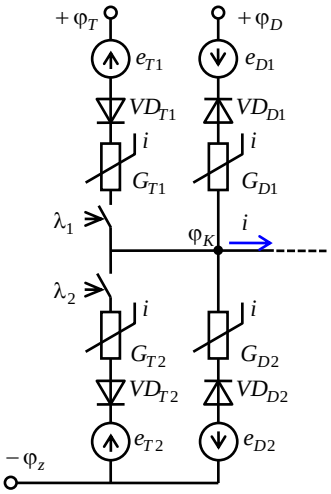



Рис. 2. Схема замещения

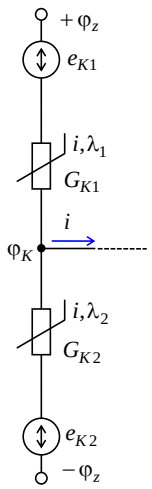



Рис. 3. Обобщённая схема замещения

Ключ импульсного коммутатора представляется в виде системы с переменной структурой (рис. 6).

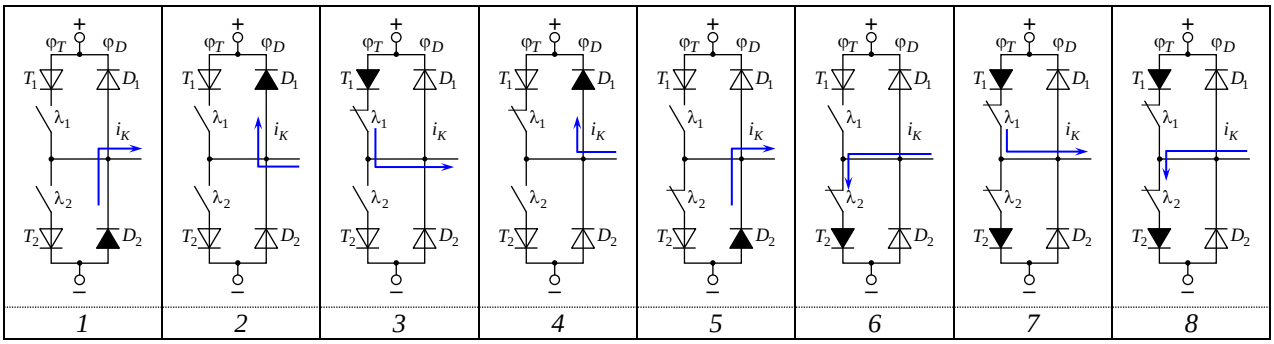



Рис. 4. Состояние ключей при подключении обмоток к источнику электропитания

В соответствии с логикой работы такого ключа записывается матрица состояния ключей (рис. 5).

| № | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $i_K$ | $G_{K1}$ | $e_{K1}$ | $G_{K2}$ | $e_{K2}$ | $\varphi_{K1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | $>0$ | 0 | 0 | $G_D$ | $e_D$ | |
| 2 | 0 | 0 | $<0$ | $G_D$ | $e_D$ | 0 | 0 | $\varphi_D$ |
| 3 | 1 | 0 | $>0$ | $G_T$ | $e_T$ | 0 | 0 | $\varphi_T$ |
| 4 | 1 | 0 | $<0$ | $G_D$ | $e_D$ | 0 | 0 | $\varphi_D$ |
| 5 | 0 | 1 | $>0$ | 0 | 0 | $G_D$ | $e_D$ | |
| 6 | 0 | 1 | $<0$ | 0 | 0 | $G_T$ | $e_T$ | |
| 7 | 1 | 1 | $>0$ | $G_T$ | $e_T$ | $G_T$ | $e_T$ | $\varphi_T$ |
| 8 | 1 | 1 | $<0$ | $G_T$ | $e_T$ | $G_T$ | $e_T$ | $\varphi_T$ |

Рис. 5. Матрица состояния ключей

В матрице состояния ключей имеются входные данные: $\lambda_1$ (сигнал на открытие верхнего транзистора), $\lambda_2$ (сигнал на открытие нижнего транзистора) и $i_K$ (ток ключа на момент рассмотрения состояния). В зависимости от комбинации сигналов на открытие транзисторов и тока из правой части выбираются значения проводимости $G$, падения напряжения на открытом ключе $e$ и потенциал на верхней клемме схемы $\varphi$.

Модель транзисторно-диодного ключа имеет вид

$$\phi_{sk}(t) = \mathrm{F}_s\left\{U_m, \theta_s, \alpha_k, \varepsilon_s(t)\right\}, \ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s(t).$$

Окончательное выражение модели определяется тем языком программирования, на котором выполняется её программная реализация.

**Заключение.** Предложенные математические модели системы электропитания исполнительных электроприводов для космических аппаратов предоставляют возможность моделировать их на разных стадиях проектирования и с разной степенью детализации. При этом может учитываться или только логика работы преобразователей, или наряду с ней внутренние параметры элементов – транзисторов и диодов.

**Список литературы**

1. Электромеханические системы космических аппаратов и автоматизация их проектирования / С.А. Бронов, Е.М. Курбатов, П.В. Авласко [и др.] // Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2 (5). С. 191–204.

2. Бронов С.А., Бисов А.А. Алгоритм формирования математической модели системы с использованием её структурной схемы // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 36–41. DOI: 10.18127/j20700784–201812–07.

УДК 528.88:631.44

**Д.В. Емельянов[1], Н.О. Мальчиков[1],**
**Т.Н. Демьяненко[2], А.П. Шевырногов[1]**
[1] Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: dima9526@gmail.com

# РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

Разработана геоинформационная система (ГИС) пространственного распределения агрохимических компонентов почвы в рамка учхоза «Миндерлинское». Проводился отбор спутниковых данных Dove компании Planet Labs для выбора оптимального снимка с наибольшими площадями открытых почв. Для исключения из анализа пикселей с растительным покровом и населенными пунктами создавалась неаналитическая маска в ArcGIS. Моделирование содержания агрохимических компонентов проводилось на основе уравнения множественной линейной регрессии.

*Ключевые слова: почва, геоинформационная система, дистанционное зондирование, Dove, регрессия.*

**Введение.** Геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования Земли – актуальный инструмент построения карт полей сельскохозяйственных предприятий. Важной частью является оценка состояния почв, расчет содержания компонентов их состава. В результате построения ГИС появляется возможность анализа динамики характеристик почв, прогнозирования их состояния и планирования оперативных мероприятий по их улучшению.

Содержание гумуса в почве является основным показателем ее плодородия, поэтому оценка его количества и состава необходима при проведении почвенно-экологического мониторинга, а также последующих агротехнических мероприятий по сохранению и восстановлению почвенного плодородия [1]. Установлено, что значения коэффициента спектральной яркости в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (0,4–1,4 мкм) хорошо коррелируют с концентрацией органического вещества в почве [2]. К настоящему времени известен ряд методов моделирования содержания гумуса в верхнем воздушно-сухом слое почвы по данным ДЗЗ с применением парных, множественных, линейных и нелинейных регрессий, но использование линейной множественной регрессии является наиболее простым [1, 3–4].

**Материалы и методы.** Исследование проводилось на территории учхоза «Миндерлинское», в Борском сельсовете Сухобузимского района Красноярского края. На рис. 1 показана карта исследуемой территории.

Территория хозяйства площадью 4,5 тыс. га находится в центральной части Красноярской лесостепи, расположенной на стыке юго-восточной и восточной окраин Западно-Сибирской низменности и предгорной равнины Восточного Саяна. По геоморфологическому строению, степени и характеру эрозионного расчленения эта территория относится к Приенисейской холмисто-увалистой среднерасчлененной денудационной равнине. По агроклиматическому районированию – к умеренному поясу и холодно-умеренному подпоясу с резкими суточными и годовыми колебаниями температур [5].

© Емельянов Д.В., Мальчиков Н.О., Демьяненко Т.Н., Шевырногов А.П., 2019

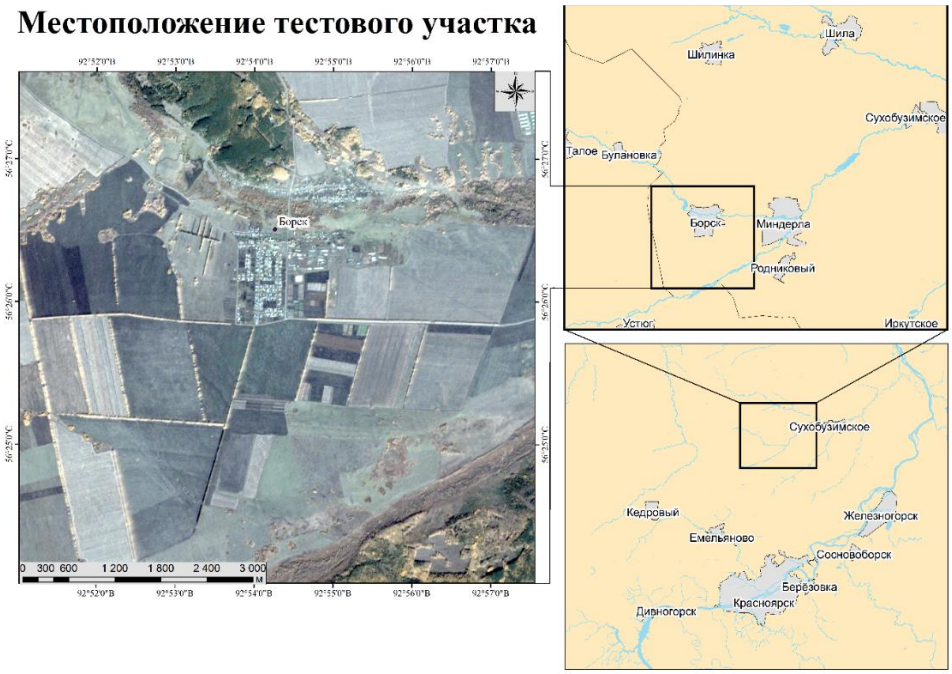



Рис. 1. Картосхема исследуемой территории

Почвенный покров в основном состоит из ареалов мало- и среднемощных чернозёмов выщелоченных и обыкновенных в комплексе с лугово-черноземными почвами. Эти почвы сформированы на делювиальных глинах и имеют тяжелосуглинистый и легкоглинистый гранулометрический состав [6].

На полях данного учхоза с поверхности почвы проведен отбор 30 образцов для агрохимического анализа (гумус, $pH_{H_2O}$, физическая глина). Для дистанционного зондирования признаков почвы использовались мультиспектральные данные Dove [7]. Выбор спектральной информации основывался на следующих факторах: отсутствие облаков и наименьшее количество растительного покрова. Наиболее подходящая спутниковая информация получена от 29 сентября 2018 г.

**Обработка данных.** Выбранный снимок содержит большое количество пикселей с открытыми почвами, но также на нем присутствуют растительный покров и наземные объекты (населенные пункты, дороги). Данные от таких элементов могу затруднить тематическую обработку. Такие объекты исключались из анализа путем разработки маски в ArcGIS. Пиксели с растительностью извлекались на основе применения индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [8]. Значение NDVI варьирует от –1 до +1. Однако значения NDVI 0,2 и выше указывают на присутствие растительности [9]. Точные границы населенных пунктов и дорог определены по картам, подготовленным Институтом вычислительного моделирования СО РАН (http://gis.krasn.ru/blog/catalog). Таким образом, объединение этого набора данных использовалось для подготовки неаналитической маски, включающей естественную растительность, населенные пункты и дороги.

Расчет и построение регрессионных моделей с использованием данных космической съемки и агрохимического анализа проводился в MS Excel. Для моделирования содержания гумуса в почве использовалась регрессионная зависимость вида

$$G = A + X_1 \cdot B2 + X_1 \cdot B_2 + \ldots X_n \cdot B_n,$$

где G – содержание компонента почвы; $X_n$, A – параметры модели; $B_n$ – спектры отражения в соответствующих спектральных каналах.

**Результаты.** В таблице представлены уравнения множественной линейной регрессии для каждого компонента почвы, а также статистические показатели: множественный коэффициент детерминации ($R^2$) и среднеквадратичная ошибка (RMSE).

Таблица

Уравнения множественной линейной регрессии для моделирования содержания агрохимических компонентов почвы

| Компонент почвы | Уравнение | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|
| Гумус, % | $63{,}8 - 7{,}8 \cdot B_1 + 4{,}8 \cdot B_2 - 1{,}1 \cdot B_3 - 0{,}9 \cdot B_4$ | 0,63 | 1,1 |
| Физическая глина, % | $156{,}2 - 16{,}4 \cdot B_1 + 7{,}8 \cdot B_2 + 3{,}9 \cdot B_3 - 1{,}7 \cdot B_4$ | 0,5 | 1,93 |
| $pH_{H_2O}$ | $6{,}6 - 1{,}4 \cdot B_1 + 3{,}8 \cdot B_2 - 1{,}6 \cdot B_3 - 0{,}8 \cdot B_4$ | 0,17 | 0,5 |

Наиболее высокий $R^2$ наблюдается при моделировании содержания гумуса.

Полученные уравнения регрессии использованы для пространственного моделирования данных компонентов почвы. В результате получены слои пространственного распределения гумуса, физической глины и $pH_{H_2O}$. Проведенный анализ показал, что содержание гумуса, наблюдаемого в исследуемом районе, варьирует от 0 до 10 %, физической глины – от 45 до 80 %, $pH_{H_2O}$ – от 3 до 8 %. В качестве примера на рис. 2 показано пространственное распределение содержания гумуса.

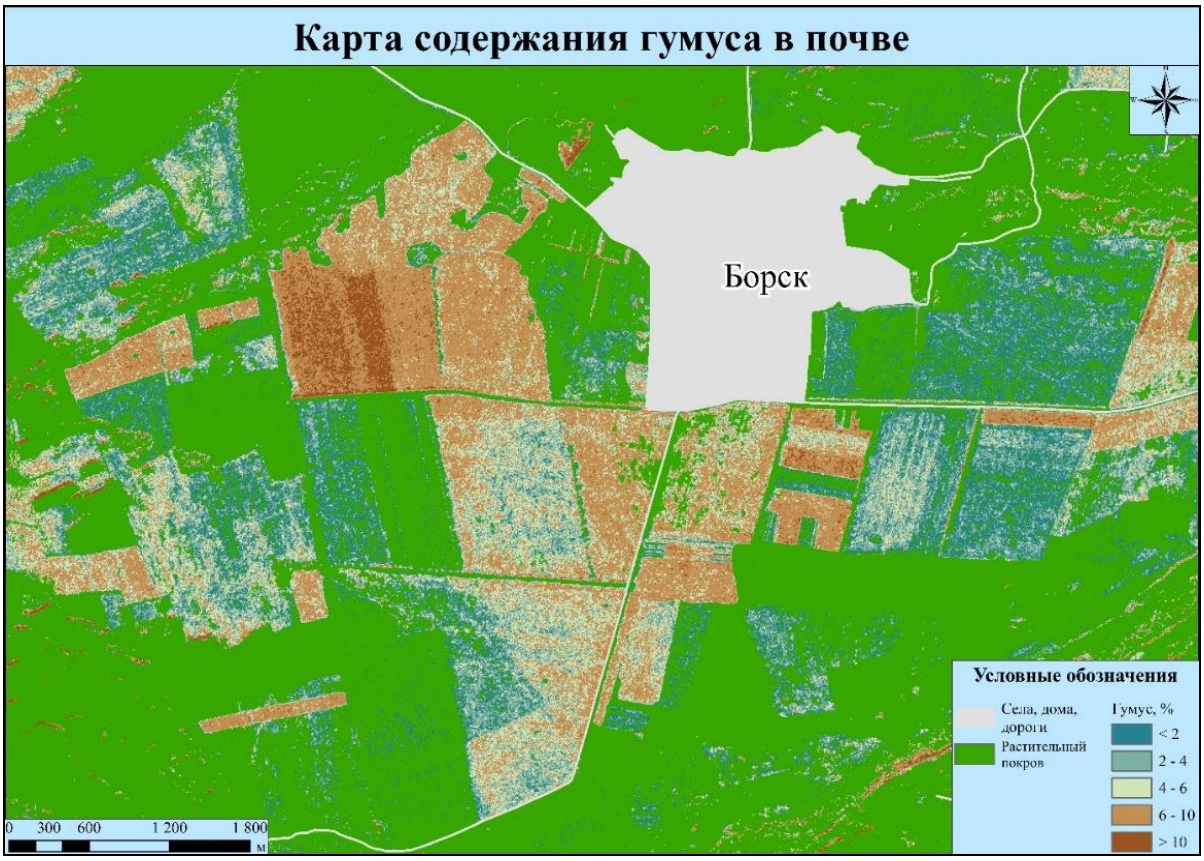



Рис. 2. Пространственное распределение содержания гумуса в почве

**Выводы.** Использование данной методики и сохранение результатов моделирования в виде слоев ГИС дает возможность моделировать содержание гумуса в пахотном слое почвы, что позволит снизить количество агрохимических анализов. Полученная модель может применяться для выравнивания плодородия почвы в конкретных условиях путем дифференцированного внесения органических удобрений.

Крупномасштабный анализ пространственной изменчивости и моделирование поверхностных свойств почвы возможны с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования. Это обусловлено тем, что большинство из этих свойств почвы, например гранулометрический состав и содержание гумуса, прямо или косвенно влияют на отражательную способность почвы. Спектральные данные отражательной способности могут быть альтернативой традиционным способам определения свойств почвы.

Метод многомерной линейной регрессии был принят для изучения взаимосвязи между поверхностными свойствами и отражательной способностью почвы. Показано, что из исследованных агрохимических компонентов почвы наиболее точно моделируется содержание гумуса.

**Список литературы**

1. Расчет содержания гумуса с использованием данных дистанционного зондирования Земли / В.А. Малышевский, Ю.П. Федулов, Н.В. Островский, И.А. Лебедовский // Науч. журн. КубГАУ. 2013. № 92. С. 859–883.

2. Горчаков В.М. Фаустова Е.В. Тымбаев В.Г. Количественный подход к комплексной агрофизической оценке почвенного покрова // Вестн. Том. гос. ун-та. 2008. № 315. С. 206–213.

3. Кравцов Х.Л., Орешкин Л.В. Оценка концентрации органических веществ в почве методом дистанционного зондирования Земли // Информатика. 2009. № 4. С. 124–133.

4. Ahmed Z., Javed I. Evaluation of Landsat TM5 multispectral data for automated mapping of surface soil texture and organic matter in GIS // European Journal of Remote Sensing. 2014. № 47. P. 557–573.

5. Сергеев Г.М. Островные лесостепи и подтайга Приенисейской Сибири. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1971. 262 с.

6. Оценка плодородия почв и почвенных комбинаций пахотных земель Красноярской лесостепи / В.В. Чупрова, Т.Н. Демьяненко, З.С. Жуков, Ю.В. Бабиченко // Почвоведение и агрохимия. 2015. Т. 55, № 2. С. 47–56.

7. Planet team. Planet application program interface // Space for Life on Earth. San Francisco, XA. 2018. URL: https://api.planet.Xom.

8. Jordan X.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology. 1969. Vol. 50. P. 663–666.

9. Karaburun A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed // Ozean Journal of Applied Sciences. 2010. Vol. 3, № 1. P. 77–85.

УДК 004.5

**А.В. Корнилаева, Р.В. Брежнев, Г.М. Цибульский**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: alenochka.kornilaeva@mail.ru, brejnev.ruslan@gmail.com

# РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИНТЕРФЕЙСА ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИКИТ СФУ

Работа посвящена исследованию проблематики человеко-машинного взаимодействия в контексте взаимодействия конечных пользователей (КП) и многоцелевых систем дистанционного мониторинга (МСДМ) пространственных объектов. Исследование направлено на формирование концептуальных аспектов построения графического интерфейса для постановки задач мониторинга. Представлено виденье организации общения КП и МСДМ в виде модели глобальной структуры диалога, перечислены целевые характеристики к качеству диалоговых средств. Рассмотрена практическая апробация интерфейса постановки задач, реализованного на базе системы дистанционного мониторинга ИКИТ СФУ. Приводится пример постановки задачи мониторинга состояния растительности зерновых культур.

*Ключевые слова: система дистанционного мониторинга, конечный пользователь, глобальная структура диалога, локальная структура диалога, постановка задачи мониторинга, дистанционное зондирование Земли.*

**Введение.** Исследования, направленные на решение проблемы организации взаимодействия типа «человек – информационная система», являются одними из ключевых направлений развития информатики. Особенно актуален такой вопрос при организации взаимодействия пользователей с информационными системами обработки данных (СОД), которые в большинстве случаев характеризуются сложными технологическими цепочками работы с данными. В зависимости от отрасли, где применяются системы такого класса, технологические процессы значительно отличаются вариативностью и специфичностью, что в результате затрудняет выработку единого подхода к диалоговому взаимодействию.

Типичным примером СОД являются системы дистанционного мониторинга (СДМ) пространственных объектов, специализирующиеся на обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). К настоящему времени сложилась тенденция к увеличению спроса на информационные продукты, получаемые на основе данных ДЗЗ [1], различными государственными и коммерческими структурами, а также населения, которые рассматриваются как конечные пользователи – постановщики задач и потребители результатов их решения. Эта тенденция влечет за собой увеличение числа информационных запросов конечных пользователей, что подразумевает наличие в системе соответствующих интерфейсных решений [2].

Однако технологические процессы разрешения задач спутникового мониторинга часто носят комбинированный характер, где часть операций обработки данных автоматизирована, а часть требует привлечения программирующих специалистов, что существенно ограничивает возможности конечных пользователей в постановке задач. В данном контексте одним из закономерных направлений развития СДМ является структурирование накопленных алгоритмов обработки данных, в которых пользователь сможет самостоятельно ориентироваться с применением универсальных схем ведения диалога.

© Корнилаева А.В., Брежнев Р.В., Цибульсктй Г.М., 2019

**Модель глобальной структуры диалога.** Ведение диалога в данной работе рассматривается как процесс, в котором конечный пользователь преследует некоторую цель. С точки зрения [3] цель определяет глобальную (*или общую*) структуру диалога, которая не зависит от конкретной решаемой задачи. Глобальная структура характеризуется общей последовательностью этапов взаимодействия, в рамках которых формируются локальные (*или тематические*) структуры диалога, зависящие от вида решаемой задачи. Таким образом, на локальном уровне, процесс постановки задачи можно рассматривать как последовательность непротиворечивых действий пользователя и системы, определенных структурой задачи.

В условиях широкого спектра задач, решаемых методами ДЗЗ, и с учетом их специфики, т.е. ориентированности на работу с данными ДЗЗ, производными продуктами, пространственными объектами и т.д. определим глобальную структуру диалога (рис. 1).

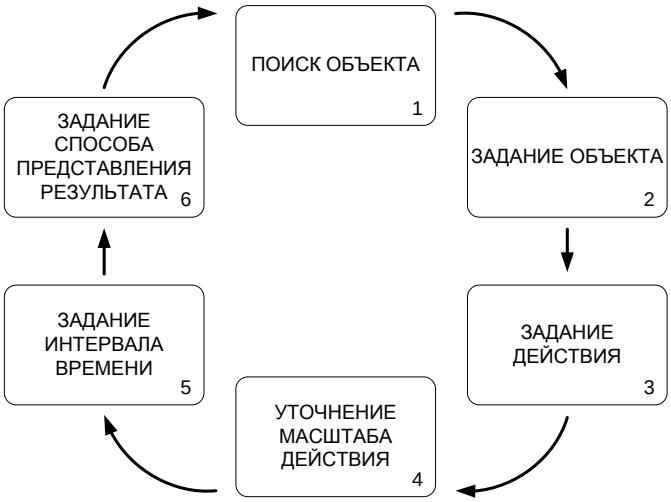



Рис. 1. Модель глобальной структуры диалога

Глобальная структура включает шесть шагов, которые характеризуются локальными структурами диалогового взаимодействия.

1. Поиск объекта предназначен для выявления в структуре данных системы имеющихся знаний о целевом объекте. При этом структура данных основывается на СУБД, которая, с одной стороны, хранит объекты, представленные в виде таблиц слоев, а с другой стороны – структуру знаний об объектах в виде совокупности таксономий [4]. Успешным результатом поиска является отображение на карте контуров пространственного объекта либо списка объектов, удовлетворяющих запросу.

2. Задание объекта предполагает два случая. Первый основывается на успешном результате поиска объекта на предыдущем шаге. В таком случае пользователь выбирает специализацию объекта и локализует его в пространстве географических координат путем выделения его на карте (рис. 2). Второй случай является результатом отсутствия в структуре данных системы целевого объекта. Тогда пользователь может самостоятельно задать координаты объекта путем визуального создания контура.

3. Задание действия (*или операции над объектом*) зависит от определенной на предыдущем шаге специализации объекта. Например, если найденный или созданный объект является полем севооборота, то в такой специализации система предложит предусмотренные заранее алгоритмы мониторинга неоднородности или состояния растительности, основанные на вегетационных индексах. Действия подразделяются на одноразовые и циклические. Одноразовые предполагают одну итерацию обработки, например, расчет площади объекта, а циклические – совокупность измерений с заданным интервалом времени, что соответствует определению мониторинга.

4. Уточнение масштаба действия рассматривается как уточнение информационного запроса и в целом является опциональным шагом глобальной структуры диалога. Уточнение позволяет конкретизировать объект в пространстве семантических характеристик. Например, для заданного поля севооборота необходимо осуществлять мониторинг неоднородности растительности, если культурой будет являться пшеница. Задание семантических характеристик представлено в виде классификаторов, основанных на таксономии, где пространственный объект связан множеством отношений с другими объектами разных классов, расширяющих представление о нем.

5. Задание интервала времени позволяет задать временной период выполнения операций над целевым объектом. Следует учесть также два случая, зависящие от шага 1 и 2. Если объект найден, то база знаний может содержать информацию об особенностях его жизненного цикла, в частности, периоде его активности. Если информации о жизненном цикле объекта в базе знаний не представлено или объект создан в процессе постановки задачи, то пользователь может самостоятельно задать период мониторинга на временной шкале или задать множество временных точек. Отличие первого и второго подходов задания интервала времени заключается в количестве итераций мониторинга, которые в первом варианте прямо пропорциональны количеству итераций получения релевантных данных ДЗЗ, а во втором – зависит от количества временных точек и наличия данных на заданную дату.

6. Задание способа представления результата позволяет определить, как хранить и как визуализировать результат измерений пользователю. В общих случаях результаты измерения параметров могут быть визуализированы в виде графиков или гистограмм, а интерпретация параметров – в виде картосхем с графической легендой. Другим способом визуализации является табличный формат, который может быть загружен пользователем в виде файла.

**Практическая апробация модели.** Рассмотрим кратко реализацию некоторых ключевых шагов глобальной структуры диалога (рис. 2).

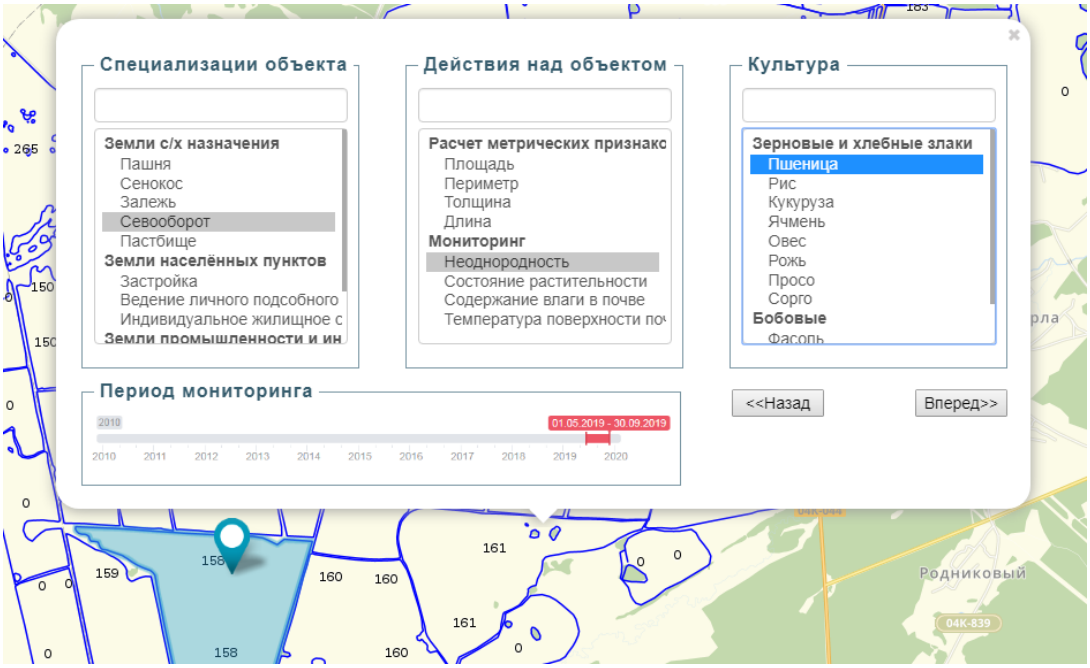



Рис. 2. Интерфейс постановки задачи мониторинга для заданного пространственного объекта

Пусть целью пользователя в системе является наблюдение за изменением структуры растительности [5] на объекте «Поле севооборота № 158». При условии, что информация о целевом объекте присутствует в структуре данных и пользователь локали-

зовал его в пространстве координат, система предлагает задать специализацию объекта, выбрать допустимое действие над объектом, уточнить характеристики объекта в семантическом пространстве, например, задав сельскохозяйственную культуру, а также указать период мониторинга с 01.05.2019 по 30.09.2019.

**Заключение.** Рассмотренная модель структуры диалога реализована на основе многоцелевой системы дистанционного мониторинга ИКИТ СФУ и проходит этап тестирования и отладки. Основными целевыми характеристиками, определяющими качество диалогового взаимодействия, которым отдается предпочтение в данной работе, являются: высокая функциональность системы при минимальном количестве шагов диалога, выполняемых конечным пользователем при постановке задачи; гибкость взаимодействия, которая означает нестрогость последовательности шагов и проявляется в различных траекториях диалога постановки задачи; возможность не согласиться с результатами и уточнить запрос, что рассматривается системой как очередная итерация решения задачи с последующим оцениванием результатов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта: 18-47-242002 р_мк), Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Разработка технологии создания интеллектуальных информационных систем объектно-ориентированного мониторинга территорий по данным дистанционного зондирования».*

**Список литературы**

1. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, И.В. Балашов, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 53–75.

2. Дракин В.И., Попов Э.В., Преображенский А.Б. Общение конечных пользователей с системами обработки данных. М.: Радио и связь, 1988. 288 с., ил.

3. Traynor C., Williams M.G. End users and GIS: a demonstration is worth a thousand words // Interactive Technologies. 2001. P. 115–133.

4. Maglinets Yu.A., Raevich K.V., Tsibulskii G.M. Knowledge-based geoinformation technology for evaluation of agricultural lands // Procedia Engineering. 2017. Vol. 201. P. 331–340.

5. Modeling of agricultural spatial objects with heterogeneous dynamically changing spatial structure / R.V. Brezhnev, Yu.A. Maglinets, K.V. Raevich, G.M. Tsibulski // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2210. P. 316–322.

УДК 550.812, 528.88

**С.Л. Лещенко[1], Д.В. Попов[2], Д.О. Непомнящий[3]**
[1] Магистрант, [2] Аспирант, [3] Студент
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: lsl24@mail.ru

# СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА НАЛИЧИЕ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА

Рассмотрены основные технические проблемы, возникающие при лидарном зондировании приземного слоя. Выделены дестабилизирующие факторы и показана необходимость подавления возникающих на трассе зондирования паразитных помех. Приведены результаты моделирования в пакете прикладных программ Matlab и сформулирован перечень основных, граничных условий эксплуатации разрабатываемого комплекса.

*Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование Земли, локализация месторождений, компенсация помех, трасса лазерного излучения.*

**Введение.** В Сибири и на Крайнем Севере поиск и обнаружение месторождений нефти и газа существенно затруднена в первую очередь в связи с тяжелыми климатическими условиями. Решение данной проблемы может быть найдено при использовании технологий дистанционного зондирования, например с помощью лазерного локатора – лидара. Хорошие теоретические результаты в области дистанционного лидарного зондирования (далее ДЛЗ) получены в Институте оптики и атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск. Однако они направлены на исследования взвешенных в атмосфере паров воды и дрейфа газов [1].

Также известны практические решения, выпускаемые серийно или мелкими сериями. Например, газоанализаторы и сенсоры, предназначенные для контроля газов в атмосфере. Например: «Обзор-2» [2], «ЛГАУ-02» [3], GasAlertMicroClip [4]. Однако данные решения либо не предназначены для авиационного зондирования, либо не позволяют определять предельно малые концентрации в приземном слое. Основное применение рассмотренных устройств – измерение утечек газопроводов, в то время как для поиска месторождений необходима чувствительность прибора не ниже 1–2 ppm [3].

**Решение поставленной задачи.** Авторами был предложен метод определения предельно малых концентраций углеводородов в атмосфере с применение метода дифференциального поглощения [5], а также разработана математическая модель трассы излучения лидара [6]. Для повышения чувствительности лабораторного прототипа были исследованы основные возникающие помехи на трассе. В данной работе приведены полученные результаты исследований. Результаты предварительных исследований [5–6] позволили сформировать перечень основных, дестабилизирующих факторов, а именно: селективность длин волн для обнаружения конкретного газа (например, метана), паразитная засветка сигнала, степень прозрачности столба атмосферы между прибором и зондируемой поверхностью, ложное измерение. Рассмотри каждую из имеющихся проблем отдельно.

**1. Избавление от засветки излучения.** Известно, что при ДЛЗ атмосферы необходимо учитывать влияние Солнца и Земли как мощных источников светового излучения (рис. 1). Солнце – это фотонный газ с цветовой температурой $T_С$ = 5 800 К. Земля обладает не меньшей интенсивность теплового излучения с эффективной цветовой температурой $T_З$ = 255 К.

© Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О.

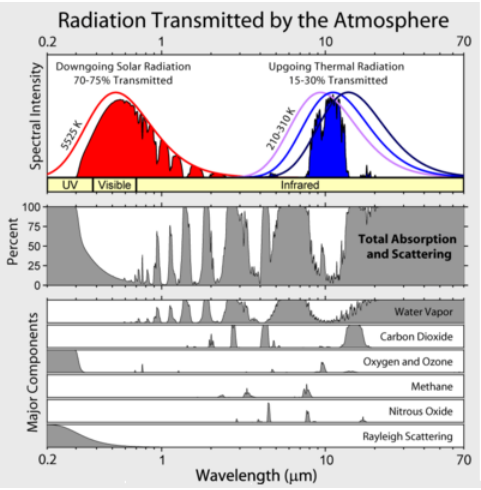



Рис. 1. Прозрачность атмосферы Земли в видимом
и инфракрасном диапазонах (поглощение и рассеивание) [7]

Очевидно, что в данном случае необходимо использовать лазеры ИК-диапазона с повышенной чувствительностью. Например, гелий-неоновый (He-Ne) лазер позволяет формировать сигнал заданного диапазона. Это обеспечивает селективность длин волн, избавляя от паразитной засветки, что, в свою очередь, дает возможность выполнять замеры не только ночью, но и днем.

2. Обнаружение метана в атмосфере. Используя требуемую длину волны лазерного излучения, максимально поглощаемую в заданном диапазоне, можно выполнять выборочный поиск искомого газа. Например, при использовании He-Ne лазера с излучением в ИК- диапазоне на длине волны, максимально поглощаемой метаном ($\lambda$ = 3,3912). Для аппаратуры, функционирующей на основе принципа дифференциального поглощения, потребуется второй лазер с длинной волны ($\lambda$ = 3,3922) [8]. Примером таких лазеров являются ГНИК-3-4 и ГНИК-3-4А с диаметром пучка не более 4,5 мм. Мощность излучения при этом составляет 10 и 23 мВт соответственно.

**3. Дисперсия за счет рассеивания и искажения излучения.** Существует проблема измерений при повышенной плотности взвешенных частиц в воздухе, например, пыли и воды. В данном случае при больших концентрациях происходит отклонение излучаемого и принимаемого сигналов (дисперсия), что понижает чувствительность установки. В данном случае при авиационном зондировании, требуется либо снижение высоты лета, либо увеличение мощности лазера. Однако в последнем случае, из-за больших массогабаритных характеристик и высокого энергопотребления, использование малых летательных аппаратов невозможно. Результаты моделирования показали, что при использовании лазера с мощностью 5–10 мВт, при плотности взвешенных частиц 0,015–0,03 ед. (что соответствует туману) принимаемый сигнал будет точен при максимальной высоте лета 150–200 м над поверхностью Земли. При использовании более мощных лазеров высота лета линейно возрастает, а следовательно, необходимо использовать установку с летательными аппаратами более высокого класса (МИ-8, АН-24 и т.д.).

**4. Ложные измерения**. В реальных условиях ДЛЗ может выявлять большое количество предельно малых концентраций метана, некоторые из которых не будут являться информативными в задаче поиска месторождений. Это могут быть пары газов от болота, рудников, биогенных отложений в результате жизнедеятельности микроорганизмов и жвачных животных, метаногидраты и т.д. Данная задача решается на программном уровне. Встроенное программное обеспечение лидара, функционирующее на основе оригинальных алгоритмов, позволяет исключить из измерений такие погрешности, обеспечивает контроль измерений и отсеивание точечных выбросов, оставляя только рассеянные отложения на обширной территории (рис. 2).

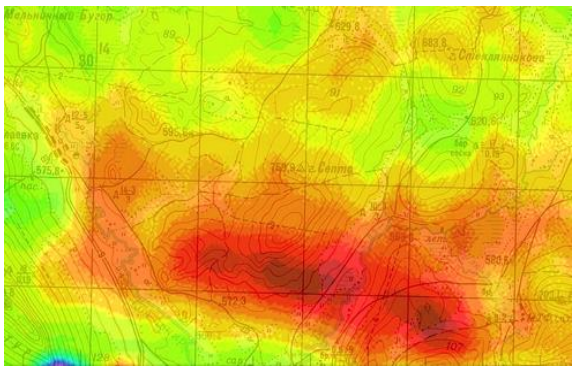


Рис. 2. Пример локализации месторождений без ложных измерений

**Заключение.** В результате проведенных исследований был сформирован перечень технических ограничений для реализации аппаратной части лидара для дистанционного авиационного зондирования:

- расстояние до отражающей поверхности от 100 до 500 м;
- использование двух He-Ne лазеров в ИК-диапазоне;
- мощность лазерного излучения по каналам: для $\lambda_1$ = 3,3922 мкм не менее 23 мВт; для $\lambda_2$ = 3,3912 мкм не менее 10 мВт;
- программное обеспечение для селективного анализа и локализации месторождений с привязкой полученных результатов по GPS.

**Список литературы**


1. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 835–844.
2. Пат. РФ № 2115109 C1,10.07.1998. Панорамный газоанализатор / Малов А.В., Грошев В.А.
3. Бубличенко И.А., Мохноножкин Б.Е. Лазерный газоанализатор «ЛГАУ-02». Приборы и техника эксперимента // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 5. С. 126–129.
4. Руководство пользователя GasAlertMicroClip. BW Technologies. 2015.
5. Lidar beam path model for measuring extremely low concentrations of hydrocarbons in the surface layer / O. Nepomnyashchiy, N. Sirotinina, D. Popov, S. Leshenko // Anthology of scientific research papers «Space Engineering, Technologies & Exploration». ECM Space Technologies GmbH, Berlin, Germany, 2018. P.186–190.
6. Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О. Математический аппарат трассы лидара для определения предельно малых концентраций углеводорода // Робототехника и искусственный интеллект: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Железногорск, 8 декабря 2018 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2018. 60–66 с.
7. Инфракрасные спектры излучения земли в космос: науч. изд. / Ю.Г. Андрианов, И.И. Караваев, Ю.П. Сафронов, В.И Тулупов. М.: Сов.радио, 1973. 98 с.

УДК 502.171; 504.064.37; 528.85; 556.16

**А.Г. Терехов, А.А. Пак**
Кандидат технический наук, Институт информационных
и вычислительных технологий, Алма-Ата, Казахстан
e-mail: aterekhov1@yandex.ru, aa.pak83@gmail.com

# РЕКОНСТРУКЦИЯ 3D-МОДЕЛИ ЧАШИ ЖАРЫНТАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ КАШ (КНР) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И DEM

Оперативная гидрологическая информация по наполненности Жарынтайского водохранилища, расположенного в китайской части трансграничного бассейна р. Иле, недоступна для казахстанских экспертов. Спутниковый мониторинг представляет собой единственный регулярный источник информации о наполненности этого резервуара. Ключевым параметром в технологии обработки спутниковых данных является топография, периодически осушающихся частей, дна водохранилища. Набор из 11 вариантов береговых линий (изогипс) при различной заполненности Жарынтайского водохранилища, построенных по данным Landsat, служил в качестве топографической основы. Данные SRTM-v.2 использовались для альтиметрической привязки спутниковых изогипс. Применение береговых линий позволяет улучшать SRTM 3D-модель ложа водохранилища через более точное описание его морфометрии.

*Ключевые слова: трансграничный речной бассейн, система мониторинга, снимки Landsat, береговые линии, топография дна резервуара, гидрологический мониторинг водохранилища.*

**Введение.** Система межгосударственного обмена оперативной гидрологической информации в трансграничных (КНР – Казахстан) речных бассейнах ограничена расходом воды на приграничных гидропостах [1]. В верхней, китайской части трансграничного бассейна р. Иле, на р. Каш построено крупное Жарынтайское водохранилище. Информация по его текущей заполненности недоступна для казахстанских экспертов. Сезонная работа этого резервуара способна оказывать существенное влияние на сток р. Иле [2] в нижних частях трансграничного бассейна, относящихся к Казахстану. В связи с этим спутниковый мониторинг запаса воды в водохранилище представляет большой практический интерес.

Для водных объектов, построенных после 2000 г., SRTM 2000 представляет топографию их дна. Однако точность количественного описания объемных характеристик относительно небольших по размеру чаш резервуаров в системе SRTM требует улучшения [3].

Целью данной работы являлось уточнение 3D-модели чаши Жарынтайского водохранилища на основе спутникового анализа конфигураций береговых линий водного зеркала и DEM (SRTM v.2) [4].

**Территория мониторинга.** В верхней, китайской части трансграничного бассейна р. Иле протекает р. Каш (расход воды 125 м$^3$/с), являющаяся вторым по значимости ее притоком. В нижнем течении реки в 2006 г. было построено Жарынтайское водохранилище, координаты плотины 43°51′42′′ с.ш. и 82°50′50′′ в.д. Объем резервуара составляет 2,5 км$^3$. Водохранилище работает в энергетическом режиме [2].

**Спутниковые данные.** Сезонные вариации площади водного зеркала Жарынтайского водохранилища превышают 20 км$^2$ [2]. Подобные изменения могут с высокой точностью регистрироваться на спутниковых снимках с пространственным разрешением 20–30 м. Снимки этого класса (Landsat-5, 7, 8 и Sentinel-2A) доступны на свободной

© Терехов А.Г., Пак А.А., 2019

основе на сайте ресурса USGS [4]. В течение года число безоблачных спутниковых покрытий водохранилища может превышать 20, что позволяет довольно детально регистрировать сезонную динамику размера водного зеркала. За период существования водохранилища, с 2006 г., был накоплен архив из 194 снимков Landsat-5, 7, 8 и Sentinel-2A, который служил основой для анализа конфигураций береговой линии. В качестве DEM использовалась SRTM DEM.

**Методика.** Жарынтайское водохранилище расположено в предгорьях Восточного Тянь-Шаня, в долине трансграничной р. Иле (КНР – Казахстан) на высоте 1 300–1 400 м над уровнем моря. Экспертная фотоинтерпретация использовалась для оцифровки и построения набора береговых линий при различной степени наполненности водохранилища.

Береговая линия относительно небольших водных объектов в условиях отсутствия ветрового нагона (сгона) является очень точной односвязной изогипсой. Набор береговых линий при различной степени заполнения водохранилища формирует двухмерную карту, отражающую топографию периодически затапливаемых участков дна. Переход к топографической карте этих участков требует привязки каждой из изогипс к определенной высоте над уровнем моря, для чего используется DEM.

Точность оценки высоты местности над уровнем моря, по данным SRTM v.2, в различных формах рельефа существенно варьируется [3]. На равнинах ошибки меньше, в горных районах увеличиваются, вплоть до отсутствия данных (лакуны). При определении 3D-структуры ложа водохранилища существуют несколько моментов, способствующих улучшению описание. Во-первых, не важны абсолютные величины высоты над уровнем моря, а только относительная разница, например, между береговой линией многолетнего минимума и анализируемым зеркалом. Соответственно, часть ошибок SRTM DEM, связанная с определением абсолютных значений высот, не оказывает влияния на структуру 3D-ложа. Во-вторых, русло р. Каш, как и любой другой горной реки этого региона, переносит большое количество взвешенного материла, что приводит к выравниванию уклона русла.

Предположение об однородности уклона русла реки позволяет использовать данные SRTM для оценки высоты над уровнем моря только крайних, максимально разнесенных позиций береговой линии (многолетний минимум и максимум), а для расчета высоты промежуточных точек применять линейную аппроксимацию.

**Результаты.** Площадь водного зеркала Жарынтайского водохранилища, в зависимости от фазы сезонного заполнения, варьируется от 27,3 ± 0,7 км$^2$ до 49,4 ± 1,2 км$^2$. Из имеющегося архива спутниковых данных Жарынтайского водохранилища периода 2006–2019 гг. было отобрано 11 безоблачных покрытий, примерно равными шагами перекрывающих многолетние вариации позиций береговой линии – от многолетнего минимума до многолетнего максимума. Отобранные спутниковые снимки были обработаны с помощью экспертной фотоинтерпретации. Построено 11 вариантов позиций береговой линии водохранилища. Высота каждой из этих изогипс была определена по данным SRTM v.2. Диапазон высот над уровнем моря этого набора изогипс составил от 1 375 ± 2 (многолетний минимум) до 1 413 ± 2 м (многолетний максимум). Фактический рабочий объем Жарынтайского водохранилища, по данным реконструированной 3D-модели его ложа, составил 1,42 ± 0,16 км$^3$.

**Обсуждение.** В трансграничном бассейне р. Иле (КНР – Казахстан) для водохранилищ, расположенных в верхней части на территории КНР (Жарынтайское, Капшагайское), отсутствует возможность проводить наземные обследования и нет доступа к оперативной гидрологический информации. Спутниковые данные представляют собой единственный регулярный источник информации о текущей наполненности резервуара. В случае дистанционной оценки водного баланса резервуара топография периодически осушаемой части дна водохранилища становится ключевым параметром.

Мониторинг водного зеркала с дешифровкой позиции береговой линии совместно с глобальными DEM свободного доступа позволяют реконструировать топографию периодически осушаемых участков дна водохранилища и на этой основе рассчитывать параметры водного обмена между резервуаром и речным стоком. Объем текущих запасов воды в рабочей части водохранилища ставится в однозначное соответствие с регистрируемой спутником величиной площади водного зеркала. Кривая, математически связывающая оба эти параметра, рассчитывается на основе 3D-модели ложа водохранилища. Соответственно, разница между объемами водохранилища в состояниях многолетнего минимума площади зеркала (принимается за 0) и многолетнего максимума становится фактически используемым рабочим объемом резервуара.

Таким образом, формируется технология обработки спутниковой информации для целей мониторинга над запасами воды в рабочей части Жарынтайского водохранилища. Существующий 14-летний архив этих данных позволяет не только оценивать текущую ситуацию относительно средних многолетних условий, но и строить прогнозные схемы по режимам работы резервуара на ближайшую перспективу.

**Заключение.** Дистанционный мониторинг наполненности водохранилищ, расположенных в трансграничных речных бассейнах на территории КНР, о которых нет оперативной наземной гидрологической информации, представляется важным инструментом обеспечения эффективности водного администрирования нижних, казахстанских частей бассейнов. Существующая международная инфраструктура спутниковых данных свободного доступа позволяет решать эту задачу.

*Работа выполнена при поддержке ГФ МОН РК № AP05134241.*

**Список литературы**

1. Сборник протоколов заседаний Казахстанско-Китайской совместной комиссии по использованию и охране трансграничных рек. 2001–2008. URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/protokols_kaz-china.pdf (дата обращения: 16.05.2019).

2. Терехов А.Г. Потенциал влияния водохранилищ китайского сектора бассейна р. Иле на режим ее водности на границе КНР – Казахстан // Гидрометеорология и экология. 2016. Вып. 83, № 4. С. 63–70.

3. Satellite-derived digital elevation model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments / A.A. Jarihani, J.N. Callow, T.R. McVicar [et al.] // J. Hydrol. 2015. 524,489–506. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.049/

4. Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of river Tanaro in Italy // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. DOI: 10.3389/feart.2019.00141.

5. USGS Global Visualization Viewer Data Portal. URL: https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=0 (дата обращения: 10.04.2019)]

УДК 582

**М.В. Титович[1], А.В. Рубцов[2], Р.Е. Акимов[1], А.Г. Усынина[1]**

[1] Красноярский политехнический техникум, Красноярск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: 2547753@mail.ru, alexeyruss@gmail.com

# РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ БВА CAMIRGREEN ДЛЯ ЗАДАЧ КАРТИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Описана возможность использования беспилотного воздушного аппарата (БВА) CamIRGreen 1 авторской разработки для проведения мультиспектральной аэрофотосъемки с целью получения цифровых карт полей для использования технологий «Точного земледелия». При разработке БВА применены методы автоматизированного проектирования, выполнены необходимые прочностные и аэродинамические расчеты, выбран материал для изготовления корпуса, обоснован набор алгоритмов (программ) обработки данных и методов их интерпретации в качестве аппаратно-программного комплекса для создания цифровых карт территорий в высоком разрешении. Проведена апробация и доводка БВА на сельскохозяйственных полях Сухобузимского и Минусинского районов. Доказана возможность его мелкосерийного производства.

*Ключевые слова: беспилотный воздушный аппарат, аэрофотосъемка, CamIRGreen, MAPIR, NDVI, точное земледелие.*

**Введение.** Технологии точного земледелия (от англ. *precision agriculture*) уже широко применяются во многих странах мира и набирают популярность в России, в том числе на региональном уровне и среди индивидуальных фермерских хозяйств. При этом учёт особенностей каждой точки поля приводит к экономии горюче-смазочных материалов на 7 %, удобрений и агрохимии на 15 %, повышению экологичности продуктов и получению прибавки к урожайности в 10 % [1]. Точное земледелие заключается в раннем планировании и принятии эффективных решений в организации агротехнических мероприятий на основе анализа актуальных картографических данных мониторинга объектов сельского хозяйства (полей). Для этого используются технологии ГИС и ДЗЗ в области получения, обработки и анализа оперативных данных мониторинга полей, а также применение современной агротехники с навигационными комплексами управления оборудованием координатно-дифферен-цированного внесения семян, удобрений и средств защиты растений.

Существующие федеральные и региональные сервисы мониторинга на основе спутниковых данных ДЗЗ («Вега», «Агромониторинг» СФУ и др.) уже обеспечивают услуги картографирования и доступа к данным о состоянии сельскохозяйственных территорий. Однако у спутниковых данных есть ряд известных ограничений, преодолеть которые позволяет подспутниковая съемка на базе беспилотного воздушного аппарата (БВА) с мультиспектральной камерой. Этот подход эффективен, когда необходимо быстро получить точные данные высокого пространственного разрешения (4–10 см/пиксель) на небольшие по площади территории (до 500 Га).

Среди доступных решений БВА имеется много коммерческих моделей, например, линейки БВС производства DJI (Китай), БВС «Дельта-М» производства «АВАКС Геосервис» (Красноярск), Геоскан 401 (Санкт-Петербург), стоимостью от 60 тыс. руб. до 1 млн руб. К их недостаткам относятся: высокая стоимость эксплуатации, низкая ремонтопригодность, закрытость архитектуры, проприетарное программное обеспечение, нерентабельность использования или долгий срок окупаемости дорогого оборудо-

© Титович М.В., Рубцов А.В., Акимов Р.Е., Усынина А.Г., 2019

вания. Следовательно, к актуальным задачам области технологии относятся: а) разработка БВА как носителя (платформы) оптических сенсоров для мультиспектальной съемки сельскохозяйственных и прочих территорий, требуемые характеристики (и значительные преимущества) которого относятся – универсальность конструкции в решении различных задач и невысокая стоимость производства и эксплуатации; б) обоснование набора алгоритмов (программ) обработки данных и методов их интерпретации в качестве аппаратно-программного комплекса для создания цифровых карт территорий в высоком разрешении для применения технологий точного земледелия.

**Разработка модели БВА CamIRGreen 1.** За основу конструкции БЛА CamIRGreen 1 была принята популярная схема квадрокоптера типа X4. Проектирование квадрокоптера выполнено с учетом следующих требований к техническим и эксплуатационным параметрам БВА: грузоподъемность до 1 кг, полетное время ≈40 мин, высокая прочность конструкции, возможность изготовления и замены частей корпуса без заказа уникальных деталей у производителя, наличие универсальной платформы для крепления различной полезной нагрузки, технологическая себестоимость составляет 25 тыс. руб., срок эксплуатации – более 1 года.

Конструкция БВА (рис. 1) спроектирована в Autocad 2018 (США) с использованием CAD пакета, рассчитана на прочность и выполнена при помощи CAM пакета Type3, изготовлена на 2d-станке с ЧПУ. Выбор материала для изготовления деталей корпуса БВА осуществлен расчетом с оценкой соотношения показателей удельной прочности, веса и цены. Оптимальным материалом является листовой углепластик двунаправленный (0/90) толщиной 1,5 мм, с величиной удельной прочности 100е10 · 3км [2]. Альтернативой в изготовлении деталей при ремонте БЛА может быть использован листовой стеклотекстолит толщиной 1,5 мм. Далее был произведен подбор силовой элементной базы БВА, компоновка системы управления, измерительного тракта, вспомогательных систем, учтены требования к унификации их размещения и крепления. Проверка аэродинамических показателей корпуса проведена по эмпирическим зависимостям для плоских поверхностей при их разнонаправленном перемещении в воздушном потоке [3].

На корпусе опытной версии БВА CamIRGreen 1 размещены следующие компоненты: четыре электромотора DJI 2212 980 KV с 7” пропеллерами и контроллерами оборотов, полетный контроллер Pixhawk PX4 Autopilot 2.4.8 на базе процессора 32 STM32F427 flash Cortex M4, блок телеметрии, система навигации GPS/ГЛОНАСС, вибронезависимая площадка для крепления полезной нагрузки весом до 1 кг, аккумуляторная батарея LiPo 4S 6.8 Ач, звуковой аварийный маяк. БЛА был укомплектован специализированной спектральной широкоугольной камерой MAPIR Survey 3W RGN (87° HFOV (19mm), f/2.8, CMOS 12 Мп, внешний GPS) пр-ва США с комбинацией каналов - красный, зеленый и ближний инфракрасный для мониторинга состояния растительности [4].

Технические характеристики БЛА CamIRGreen: база корпуса – 550 мм, максимальный взлетный вес – 2,5 кг, грузоподъемность – 1 кг, полетное время – 40 мин, рабочая высота съемки – 150–190 м, уровень пылевлагозащищенности – IP 53, выполнение полетного задания при постоянном ветре до 5 м/с (с порывами до 10 м/с), позиционирование в пространстве по GPS/ГлоНАСС с точностью 1,2 м, дальность телеметрии – 1 км, автоматический полет по точкам, максимальная скорость – 40 км/ч, скорость вертикального подъема – 5 м/с, вес пустого БЛА – 1,5 кг, время заряда батареи – 40 мин, температурный режим от –20 до 40 °С. Настройка летных параметров БВА и планирования маршрутов полетов со съемкой территории в автоматическом режиме осуществляется в бесплатном ПО Mission Planner (ARDUPILOT).

Рис. 1. Вид опытной модели БВА CamIRGreen 1

**Апробация БВА и обработка данных съемки.** Апробация и доводка БВА комплекса CamIRGreen 1 проведена в период с апреля по июль 2019 г. на сельскохозяйственных полях Сухобузимского и Минусинского районов. В процессе обработки данных аэрофотосъемки и создания карт состояния сельскохозяйственной растительности выполнены следующие этапы: преобразование форматов исходных фалов (JPG и RAW) в GeoTIFF и их калибровка, построение ортофотомозаики, расчет вегетационных индексов, создание карт. Первых два этапа выполнены в специализированном ПО MAPIR Camera Control. На этапе калибровки набора данных используется снимок калибровочной мишени для нормализации значений пикселей изображений по эталонам величинам отражательных поверхностей мишени. Создание ортофотомозаики происходит в несколько этапов при использовании фотограмметрического ПО Agisoft Metashape Professional (версия 1.5): выравнивание позиций снимков и поиск связующих точек, построение разреженного облака точек, карты высот и итоговой ортофотомозаики. Дальнейшие этапы обработки растровых слоев выполнены в стандартном ГИС пакете QGIS (вер. 3.4.6), в частности визуализация, обрезка, расчет различных вегетационныйх индексов, пространственный анализ. На рис. 2 представлен результат апробации комплекса БВА CamIRGreen 1 в виде карты (ортофотомозаики) вегетационного индекса NDVI на опытном поле в Сухобузимском районе Красноярского края.

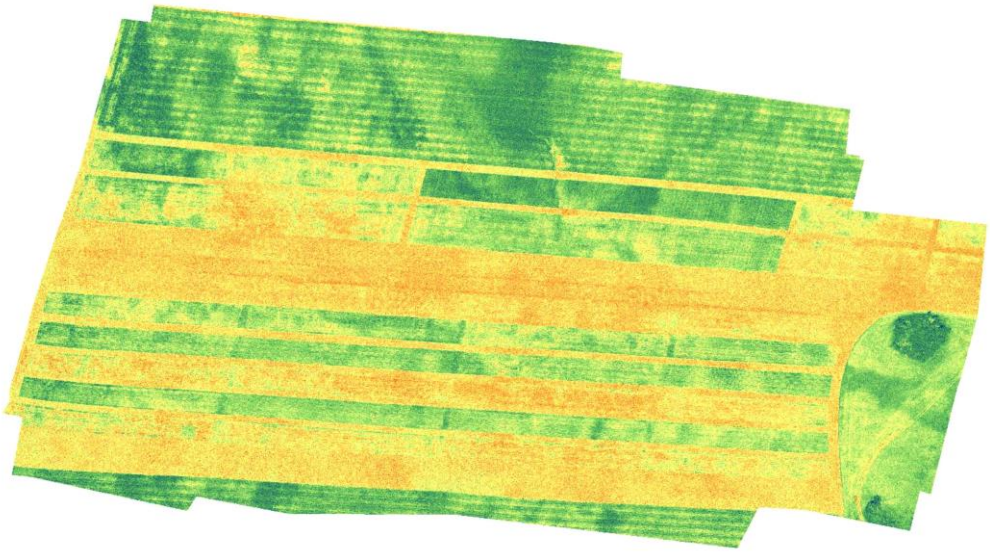


Рис. 2. Ортофотомозаика индекса NDVI, рассчитанного для опытного поля в Сухобузимском районе, июнь 2019 г.

**Результаты и выводы.** Опытная модель БВА CamIRGreen 1 представляет собой роботизированный аппаратно-программный комплекс на базе (корпусе) БВА оригинальной авторской конструкции, который был успешно разработан, изготовлен и апробирован в ряде задач агромониторинга. CamIRGreen 1 позволяет производить аэрофотосъемку территорий в высоком разрешении в различных климатических условиях со следующими основными показателями эффективности: максимальная площадь покрытия снимками за один полет ≈100 Га, пространственное разрешение 4 см на пиксель, себестоимость эксплуатации БВА 10 руб/га (без учета транспортных издержек) [5]. В работе подтверждена возможность автоматизированного производства деталей корпуса для сборки или ремонта БВА, при этом не требуются подгоночные операции.

Модель БВА CamIRGreen 1 подходит для мелкосерийного производства на любых 2d-фрезерных станках с ЧПУ (в том числе DIY станки, фрезеры для рекламных конструкций) с точность изготовления деталей не менее 0,10 мм. Коммерциализация проекта предполагает встраивание аппаратно-программного комплекса в технологический процесс производства аграрной продукции мелкими и средними крестьянско-фермерскими хозяйствами, и крупными агрохолдингами.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-74-10048).*

**Список литературы**

1. Точное земледелие в России. URL: https://www.dairynews.ru/news/tochnoe-zemledelie-mirovoy-trend.html (дата обращения 10.03.2019).

2. Свойства углепластиков. URL: https://viam.ru/public/files/1996/1996-202215.pdf (дата обращения 10.03.2019).

3. Аэродинамические расчеты. URL: http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml (дата обращения 10.03.2019).

4. Мультиспектральная камера Mapir Survey3N. URL: https://www.mapir.camera/pages/survey3-cameras#specs (дата обращения 16.05.2019)

5. Агроскан24. Беспилотная мобильная платформа для точного земледелия. Экономические показатели / А.Г. Усынина, Р.Е. Акимов, М.В. Титович [и др.]: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. 9–13 апреля 2018 г., Красноярск: в 3 т. Т. 3 / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. URL: https://apak.sibsau.ru/page/materials.

УДК 582

**В.А. Хамедов**

Кандидат технических наук, Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия
e-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ (НА ПРИМЕРЕ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)

Работа посвящена обсуждению перспективных возможностей автоматизации управления лесным хозяйством на примере Ханты-Мансийского автономного округа. Основными задачами автоматизации является повышение эффективности исполнения своих полномочий региональным органом государственной власти в условиях роста объема использования лесов. Представлен обзор существующего состояния автоматизации, рассмотрено направление развития и внедрения автоматизированных систем управления на уровне управления лесным хозяйством региона.

*Ключевые слова: система управления лесным хозяйством, автоматизация технологических процессов, дежурная карта лесных участков, оперативный спутниковый мониторинг.*

Ханты-Мансийский автономный округ является одним из крупных лесных регионов, на территории которого активно развиваются предприятия нефтегазодобывающего сектора и лесопромышленной отрасли, что приводит к резкому увеличению количества используемых лесных участков. По данным Рослесхоза, согласно отчетной форме «6-ОИП», за первое полугодие 2018 г. в РФ в аренду, постоянное (бессрочное) и безвозмездное пользование было предоставлено 81 729 лесных участков на общей площади 236 304 101,9 га, в том числе в ХМАО 17 806 лесных участков на общей площади 3 382 465 га (таблица).

Таблица

| Наименование субъекта РФ | Количество договоров, шт. | Общая площадь лесных участков, га |
|---|---|---|
| Уральский федеральный округ | 25 368 | 19 151 587,7 |
| **в том числе в Ханты-Мансийском автономном округе** | **17 806** | **3 382 465,0** |
| Сибирский федеральный округ | 13 459 | 69 533 950,3 |
| Приволжский федеральный округ | 10 625 | 20 106 297,0 |
| Дальневосточный федеральный округ | 9 105 | 58 715 808,1 |
| Северо-Западный федеральный округ | 8 561 | 54 369 205,4 |
| Центральный федеральный округ | 7 340 | 13 488 755,5 |
| Южный федеральный округ | 3 693 | 806 182,9 |
| Северо-Кавказский федеральный округ | 3 578 | 132 314,9 |
| Всего в Российской Федерации | 81 729 | 236 304 101,9 |

В регионе наблюдается ежегодная положительная динамика использования лесных участков, что приводит к увеличению объема оказываемых услуг региональным органом государственной власти – Департаментом недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа-Югры (рис. 1).

© Хамедов В.А., 2019

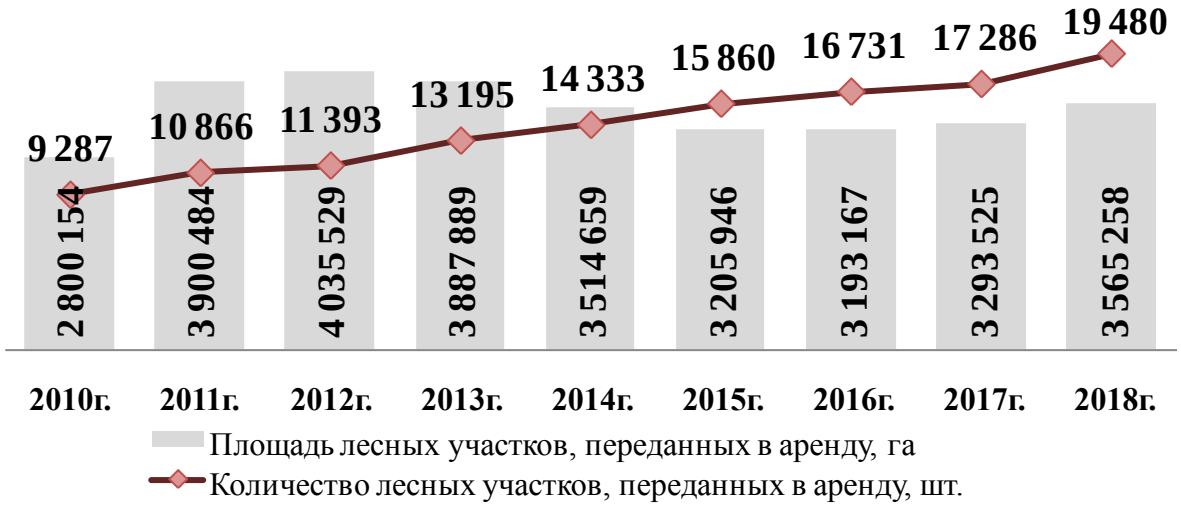



Рис. 1. Динамика использования лесных участков в регионе
за период с 2010 по 2018 г.

Для обеспечения соблюдения установленных законодательством РФ регламентных сроков и в целях повышения эффективности работы департамента необходима разработка системы устойчивого управления лесным хозяйством региона.

Устойчивое управление лесным хозяйством неразрывно связано с созданием и развитием информационной системы о лесах и динамических процессах в лесных экосистемах, объединяющей данные периодической статистической и бюджетной отчетности, государственной инвентаризации лесов, лесоустройства, лесопожарного и лесопатологического мониторинга, мониторинга лесопользования [1]. С этой целью в регионе разрабатывается система управления технологическими процессами в лесном хозяйстве, в основе которой специализированный программный комплекс «АВЕРС: Управление лесным фондом ПРОФ» совместно с ГИС для работы с материалами лесоустройства «ЛесИнфорг». Общая схема построения разрабатываемой системы представлена на рис. 2.

Автоматизация технологических процессов лесного хозяйства на основе разрабатываемой системы способствует повышению эффективности и контролю текущего состояния взаимоотношений с арендаторами лесных участков. Качественно новым явлением становится системный подход к каждому отдельному лесному участку, выраженный в его полном таксационно-лесоводственном описании и постоянном отслеживании его динамики. Использование технологий спутниковой съемки территории позволяет организовать системный мониторинг активно обустраиваемых территорий в условиях воздействия нефтегазового комплекса [2], проводить оценку ресурсной базы [3] лесных участков и их фактического состояния [4]. Комплекс мероприятий позволит реализовать адаптивное управление лесами, являющееся основой устойчивого управления [1], при котором действия планируются и выполняются, а результаты выполняемых действий контролируются с целью корректировки будущих планов.

Комплексное использование информационных ресурсов является перспективным развитием информационных систем в лесном хозяйстве региона. Как отмечено в [5], широкое использование междисциплинарного подхода в лесопользовании позволяет исследовать составляющие в рамках единой системы и оптимизации параметров по обобщенным критериям эффективности. На основе результатов мониторинга после оценки показателей эффективности лесопользования могут быть скорректированы критерии оптимизации отдельных технологических операций, выполняемых в процессе лесопользования.

Рис. 2. Общая схема построения автоматизированной системы управления технологическими процессами

Размещение информации о лесах, расположенных в границах автономного округа, на общедоступных ведомственных информационных ресурсах способствует открытости информации о деятельности регионального органа государственной власти в области лесных отношений и получению инвесторами актуальной и достоверной информации об актуальном состоянии лесных территорий.

**Список литературы**

1. Исаев А.С., Коровин Г.Н. Актуальные проблемы национальной лесной политики. М., 2009. 108 с.

2. Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестн. СГУГиТ. 2015. № 3 (31). С. 16–31.

3. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) / Е.Н. Сочилова, Н.В. Сурков, Д.В. Ершов, В.А. Хамедов // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. С. 1–22.

4. Хамедов В.А. Использование ИК-диапазона для обнаружения лесных участков с порубочными остатками // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы V Междунар. науч. конф. 2018. С. 224–227.

5. Романов Е.М., Онучин Е.М. Подходы к разработке и исследованию инновационной системы эффективного устойчивого лесопользования и лесовосстановления // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 3–9.

# Секция

# МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 528.854

**А.И. Алексанин[1], В. Ким[2]**

[1] Доктор технических наук, [2] Кандидат технических наук
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
e-mail: aleks@iacp.dvo.ru, vkim@dvo.ru

## ОБНАРУЖЕНИЕ РУБОК ДЕРЕВЬЕВ ПО ТЕНЯМ

Рассмотрена проблема автоматического нахождения рубок отдельных деревьев по данным прибора «Геотон» спутника Ресурс-П. В работе рассматривается алгоритм обнаружения рубок отдельных деревьев и разобрана его работа на примере обнаруженных незаконных рубок.

*Ключевые слова: Ресурс-П Геотон, выборочные рубки деревьев, анализ теней деревьев.*

Контроль рубок леса является актуальной проблемой лесного хозяйства России. Использование данных спутникового дистанционного зондирования позволяет организовать регулярный мониторинг лесов на огромных площадях. Наиболее распространенный подход к детектированию рубок летом основан на определении изменчивости яркости отдельных спектральных каналов или изображений параметров леса (в первую очередь вегетационного индекса). Для выделения изменений используются пороговые методы, параметры которых подбираются экспериментально [1] либо адаптивно [2]. Тем не менее отмечается, что не всегда изменение вегетационного индекса способствует обнаружению вырубок.

В Приморском крае преобладают незаконные вырубки отдельных деревьев ценных пород. Вырубка отдельных деревьев в лесу со сплошной кроной сопровождается появлением области тени в месте вырубки. Часто одновременно вырубленные деревья открывают доступ к солнцу для других деревьев, что резко повышает их яркость на изображениях. В работе рассматривается проблема обнаружения рубок отдельных деревьев по изменчивости яркостных характеристик в местах рубок.

**Используемые данные и алгоритмы их обработки.** Исходными данными были панхроматические и мультиспектральные изображения прибора «Геотон-Л1» уровня обработки 1А. Использовались панхроматические изображения лесных участков Красноармейского района Приморского края, полученные радиометром «Геотон» спутника Ресурс-П № 1 за 14.09.2015, 25.08.2015, 10.08.2015. Обозначим их как изображения с номерами 1, 2 и 3. Изображение за 25.08.2015 использовалось в качестве эталона. Для совмещения изображений применялся созданный недавно алгоритм [3]. Точность совмещения, оцениваемая алгоритмом в каждой точке изображения, лежала в пределах одного пикселя (0,7 м). На выбранном участке леса представителями фонда дикой природы был зафиксирован факт незаконной вырубки четырех деревьев вблизи грунтовой дороги.

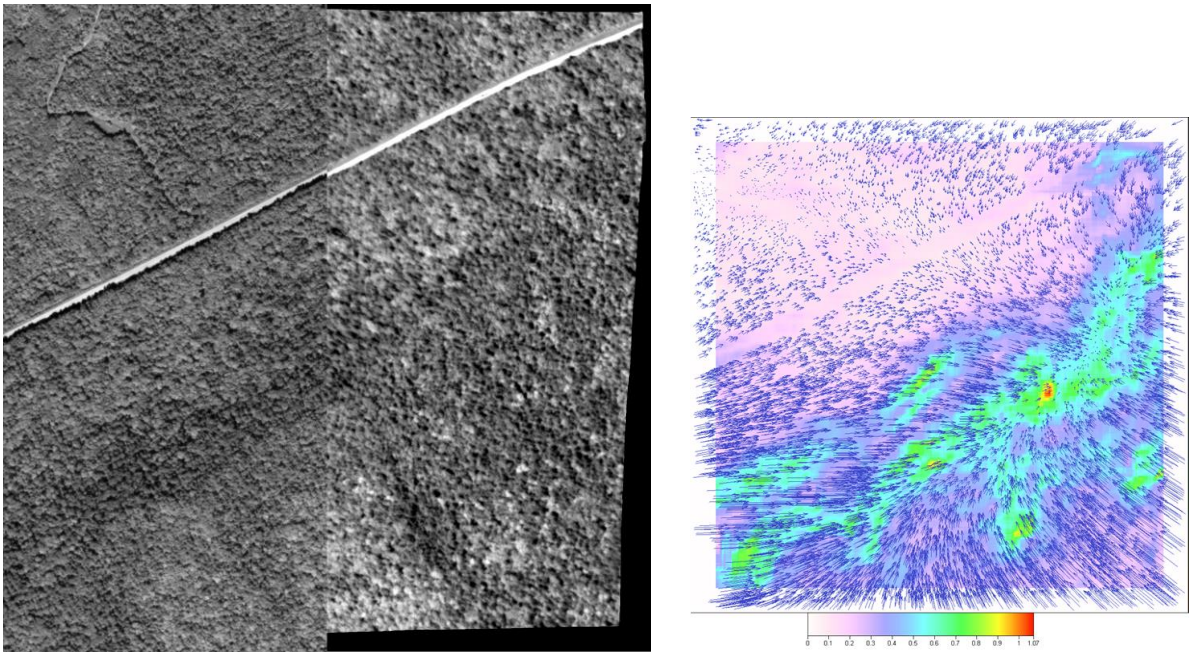
Для автоматического определения мест рубок был разработан алгоритм анализа теней, появляющихся в кроне леса.

© Алексанин А.И., Ким В., 2019

**Алгоритм**

1. Совмещение изображений с пиксельной точностью.
2. Фильтрация облачности и объектов, не относящихся к лесу (по NDVI).
3. Выравнивание яркостных характеристик сравниваемых изображений на основе близости средних и дисперсий.
4. Построение разности яркостей с двумя предшествовавшими изображениями и выбор порогов выделения теней по гистограмме разностей для последнего по времени изображения. Выделение аномалий яркости.
5. Сравнение аномалий, полученных на последней паре изображений, с аномалиями, полученными на предшествующих изображениях. Фильтрация идентичных аномалий.
6. Фильтрация аномалий с малой площадью по разности последних по времени изображений.
7. Подтверждение достоверности обнаруженных аномалий, обусловленных изменчивостью лесного полога, по последовательности изображений.

**Эксперименты и результаты.** Задача обнаружения вырубок состоит в сравнении пары разновременных снимков лесных участков и выявлении значимых различий. Для попиксельного сравнения снимков исключительно важна точность совмещения изображений. На рис. 1 представлены результаты совмещения с эталонным изображением изображения за 10.08.2015. Векторы смещений показывают значительную нелинейность трансформации изображения и достигают величин в 150 пикселей. Так, согласно расчетам (рис. 1, *а*), почти везде ошибка совмещения не превышает 1 пиксель.

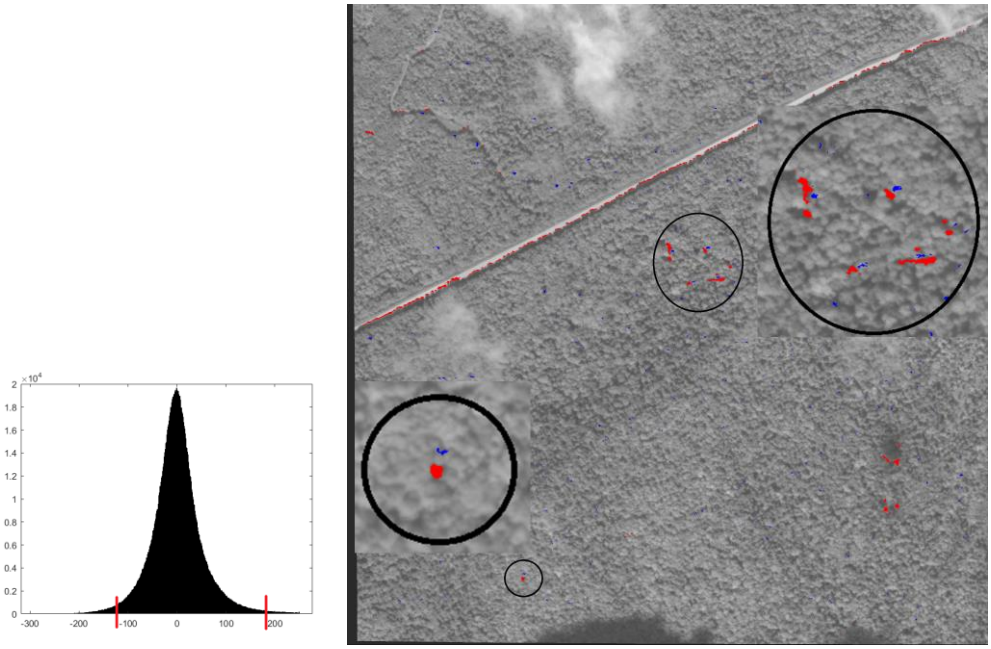


*а* *б*

Рис. 1. Изображение *а* – фрагменты двух изображений, состыкованных по произвольной линии разреза. Фрагмент первого изображения слева – эталонное изображение, фрагмент второго справа – изображение, прошедшее обработку алгоритмом. Изображение *б* – векторы смещений на карте точности расчета векторов смещений в пикселях

На рис. 2, *а* приведена гистограмма и соответствующие пороги для разности изображений 1 и 2; на рис. 2, *б* – выделенные области аномалий изменчивости яркости по заданным порогам. Всего выделилось более тысячи аномалий. Основная причина появления аномалий – ухудшение точности привязки отдельных деревьев из-за их рас-

положения ниже или выше среднего уровня полога в их окрестности. Алгоритм совмещения гарантирует точность только для окрестности каждого пикселя. Использовался линейный размер окрестности в 200 пикселей. Сравнение аномалий первой пары с аномалиями, выделившимися по парам изображений 1 – 3 и 2 – 3 позволяет большинство аномалий отбраковать, так как они не являются вновь появившимися. Из оставшихся выделяется только два места, где аномалии повышенной и пониженной яркости расположены близко друг к другу. Одно из них – место подтвержденной незаконной рубки; второе – скорее всего, место падения дерева.




*а* *б*

Рис. 2. Гистограмма разностей изображений 1 и 2 и выбранные пороги (*а*); изображение лесного полога за 25.08.2015 с выделенными аномалиями пониженной (красный цвет) и повышенной (синий цвет) яркостей. Кружки – области пониженной и повышенной яркости, расположенные вблизи друг друга (*б*)

**Заключение.** Рассмотрены проблемы и методика автоматического обнаружения незаконных рубок отдельных деревьев летом по спутниковым данным. Для нахождения таких рубок по панхроматическим спутниковым изображениям прибора «Геотон» использовалось совмещение лесных пологов на последовательности изображений с пиксельной точностью. Резкая изменчивость яркости какой-либо области может указывать на рубку или падение дерева. Незаконная вырубка четырех деревьев, обнаруженная при проведении спутникового мониторинга незаконных рубок в Красноармейском районе Приморского края, подтверждает возможность обнаружения рубок по аномалиям яркости.

**Список литературы**

1. Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2, № 2. С. 217–227.

2. Борзов С.М., Потатуркин О.И. Обнаружение выборочных рубок леса по данным дистанционных измерений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 87–93.

3. Совмещение изображений с российских спутников Ресурс-П / А.И. Алексанин, С.М. Краснопеев, М.А. Морозов, Е.В. Фомин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 18–28.

УДК 630(075.32):630.627.3

**О.С. Артемьев**
Доктор сельскохозяйственных наук,
Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: ol.artemjev2010@yandex.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ЛАНДШАФТНОЙ ТАКСАЦИИ ЛЕСОПАРКОВЫХ ЛЕСОВ

Приведены разработанные методики, основанные на применении дистанционных методов, для ландшафтной таксации лесопарковых лесов. Изложены методики дешифрирования по аэрокосмоснимкам прогулочной дорожно-тропиночной сети. Методики с использованием наземных снимков позволяют повысить точность оценки ландшафтно-архитектурных показателей: сомкнутость полога древостоя, оценка эстетичности участка, оценка проходимости участка, санитарно-гигиеническая оценка.

*Ключевые слова: аэрофотоснимки, космические снимки, наземные цифровые снимки, ландшафтная таксация, лесопарковые леса.*

**Введение.** Лесопарковые леса являются одной из наиболее ценных категорий леса, и вследствие этого разработки по улучшению их таксации являются актуальными.

**Предлагаемые методики ландшафтной таксации.** Посещаемость лесопарковых лесов в большей степени зависит от существования прогулочной дорожно-тропиночной сети. К проектированию прогулочной дорожно-тропиночной сети следует отнестись с особым вниманием, так как допущенные при этом ошибки не только уменьшат посещаемость объекта рекреации, но и вызовут необоснованные затраты на строительство тех прогулочных дорог и троп, которые будут мало посещать.

Для улучшения качества проектирования прогулочной дорожно-тропиночной сети предлагается следующая методика.

На первом этапе по цветным спектрозональным аэрофотоснимкам или цветным спектральным космоснимкам производится дешифрирование существующей дорожно-тропиночной сети. Необходимо использовать крупномасштабные аэрокосмоснимки. Дешифрирование дорог не вызывает затруднений и выполняется по существующим методикам. Дешифрирование прогулочных троп ведется на основе разработанных автором прямых и косвенных дешифровочных признаков по стереопарам аэрокосмоснимков [1].

В дополнение к дешифровочным признакам рекомендуется использование «эталонов», т.е. стереопар снимков с уже дешифрированной тропиночной сетью.

В полевой период производится наземное обследование дорожно-тропиночной сети, при котором проверяется, а при необходимости исправляется, схема дорожно-тропиночной сети, составленная по данным дешифрирования. Одновременно на эту схему наносятся тропы, не опознанные на аэрофотоснимках. Для этого на трассе неопознанной тропы через 30 м берутся точки, местоположение которых на аэроснимке или космоснимке находится путем их привязки к видимым на снимке элементам местности. Найденные точки наносятся на снимок и соединяются между собой, образуя трассу тропы.

Для оценки качества троп и дорог определяется по элементам их ширина, тип покрытия. Под элементом тропиночной сети понимается участок тропы от одного пере-

© Артемьев О.С., 2019

сечения тропы с другой тропой или дорогой до следующего пересечения. Кроме того, делается глазомерная оценка элементов прогулочной тропиночной сети по трем шкалам: по шкале оценки эстетичности окружающих тропы лесопарковых ландшафтов (по Н.М. Тюльпанову) [2], по шкале оценки нагрузки тропиночной сети [1, 3] и по шкале оценки проходимости тропиночной сети [1, 3].

На втором этапе полученные данные о площади дорожно-тропиночной сети сравниваются с нормативными. Если по данным инвентаризации площадь дорожно-тропиночной сети превышает нормативную, то часть троп не включается в проектируемую дорожно-тропиночную сеть, т.е. на этих тропах не будут вестись работы по их благоустройству. В первую очередь исключаются тропы, проходящие по территории с 4-й и 5-й стадиями рекреационной дигрессии леса (участки, наиболее пострадавшие от рекреационной нагрузки), а также тропы, имеющие по шкалам наиболее низшие баллы. При этом необходимо следить за тем, чтобы исключение элементов тропиночной сети не разъединяло между собой остальные элементы. Все дороги включаются в проект дорожно-тропиночной сети. Исключение элементов тропиночной сети производится до тех пор, пока площадь дорожно-тропиночной сети не станет нормативной.

В том случае, если площадь существующей прогулочной дорожно-тропиночной сети менее нормативна, рекомендуется первоначально проектировать объекты массового посещения (пляжи, зоны отдыха и т.п.), а уже затем проектировать новые дороги к ним. В настоящее время ландшафтно-архитектурные показатели при ландшафтной таксации оцениваются глазомерно [2, 3]. Для повышения точности таксации этих показателей предлагается методика с использованием наземных цифровых снимков.

При натурном обследовании территории в соответствии с существующей методикой была произведена оценка трех ландшафтно-архитектурных показателей: эстетичность ландшафта, санитарно-гигиеническая оценка и проходимость обследуемого лесотаксационного участка.

Таксация осуществлялась с использованием глазомерного метода. Для оценки ландшафтно-архитектурных показателей использовались шкалы, применяемые при ландшафтной таксации [2, 3]. Одновременно с оценкой ландшафтно-архитектурных показателей осуществлялась наземная съемка обследуемых выделов на цифровую фотокамеру. Для того чтобы в камеральных условиях знать, какой участок изображен на снимке, велась запись сведений о каждом обследуемом участке. Место съемки выбиралось с тем условием, чтобы не снимать против солнца. Были сделаны цифровые изображения 58 участков.

В камеральный период путем изучения изображений обследуемых участков на мониторе компьютера была произведена оценка ландшафтно-архитектурных показателей. Разница в оценке ландшафтно-архитектурных показателей по существующей и по предлагаемой методикам дана в таблице.

Таблица

Точность оценки ландшафтно-архитектурных показателей

| Методика таксации | | Количество выделов, шт. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | класс эстетичности лесопаркового ландшафта | | | проходимость участка | | | санитарно-гигиеническая оценка | | |
| | | 1 | 2 | 3 | хорошая | средняя | плохая | высокая | средняя | слабая |
| Существующая | | 24 | 25 | 9 | 14 | 21 | 23 | 13 | 24 | 21 |
| Предлагаемая | | 25 | 25 | 8 | 16 | 19 | 23 | 11 | 26 | 21 |
| Разница | шт. | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| | % | 7 | 0 | 11 | 14 | 18 | 0 | 15 | 14 | 0 |

Анализ данных, приведенных в таблице, показал, что максимальное отклонение в оценке ландшафтно-архитектурных показателей составляет 18 % (при оценке средней

проходимости участка). Среднее отклонение при оценке класса эстетичности лесопаркового ландшафте составляет 6,0 %, при оценке проходимости участка – 10,6 %, при санитарно-гигиенической оценке – 9,6% [4]. В таксации при оценке показателей с использованием глазомерного метода такая разница считается допустимой.

Кроме того, при проектировании мероприятий в лесопарковых лесах очевидно, что для проектировщика будет более информативен цифровой снимок выдела, чем, например, оценка его эстетичности по трехбалльной шкале.

Для оценки такого ландшафтно-архитектурного показателя, как сомкнутость полога древостоя, использовались снимки, полученные при съемке полога с Земли, причем оптическая ось фотоаппарата была направлена вертикально вверх. Затем с помощью электронного планиметра вычислялись площадь крон и сомкнутость полога. Одновременно со съемкой глазомерно оценивалась сомкнутость полога. Сравнение данных о сомкнутости полога полученных глазомерно и по предлагаемой методике показало, что разница в средних значениях незначительна и составляет 0,08 единицы.

**Заключение.** Предлагаемая методика проектирования прогулочной дорожно-тропиночной сети с использованием аэрокосмоснимков позволит повысить ее качество. Оценка ландшафтно-архитектурных показателей: эстетичность ландшафта, санитарно-гигиеническая оценка, проходимость обследуемого лесотаксационного участка и сомкнутость полога древостоя, – произведенная по предлагаемой методике, основанной на дешифрировании наземных цифровых фотоснимков с использованием компьютера, повышает их информативность и достоверность.

**Список литературы**

1. Артемьев О.С. Методы таксации городских насаждений: монография. Красноярск: СибГТУ, 2003. 100 с.

2. Тюльпанов Н.М. Лесопарковое хозяйство: учеб. пособие. Л.: Стройиздат, 1975. 160 с.

3. Основы лесопаркового хозяйства: учебник / О.С. Артемьев, Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова [и др.]. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 160 с.

4. Артемьев О.С. Методика оценки показателей, определяемых при ландшафтной таксации, с применением материалов наземной цифровой фотосъемки // Лес. журн. 2011. № 4. С. 137–139.

УДК 528.8.04, 528.88

**Б.И. Борде**
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: bborde@sfu-kras.ru

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КАМПУСА

Специализированные САПР используются для создания управляющих вычислительных систем. Развитие информационных технологий привело к появлению комплексных информационных моделей объектов и моделей целых кампусов. Использование множества информационных моделей объектов позволяет оптимизировать структуру системы и алгоритм управления в различных условиях.

*Ключевые слова: программный комплекс автоматизации проектирования, информационные правила выбора модели кампусов, производительность труда инженера.*

Появление комплексных САПР для проектирования неподвижных и мобильных объектов и стандартов их представления привело к созданию новых инструментальных средств [1–6]. Проектирование здания начинается с анализа участка и возможных внешних воздействий. В соответствии с основной функцией и критериями эффективности выбирается площадь и этажность здания. Проектируется конструкция здания с учетом энергоэффективности. Размещается основное оборудование здания в соответствии с нормами. Затем производится трассировка соединений для всей системы и ее моделирование с системами управления.

Вычислительная сеть может находиться в здании или на открытом пространстве. Для неподвижных объектов, например зданий, подходит среда Autodesk REVIT [6] и отечественная АСКОН RENGA с возможностью автоматического размещения в помещениях сетевых рабочих мест в соответствии с нормами. Управление климатом в компьютерных классах может выполняться вычислительными устройствами на микросхемах или разработанными студентами ИКИТ СФУ под руководством автора системами на базе однокристальных микроконтроллеров INTEL QUARK D2000. Средой разработки систем на базе D2000.служит Intel System Studio, в которой отлаживается программа и сохраняется результат в памяти процессора. Входные АЦП и компараторы встроены в кристалл. Для управляемых внешних устройств нужны усилители, например мощные ключи с малым током управления.

Кампус университета состоит из множества зданий, дорог и подземных коммуникаций и является объектом более высокого уровня со средой Autodesk INFRAWORKS. Кампус университета – часть объекта «город». Процесс проектирования моделей начинается с нижнего уровня и заканчивается верхним, но является итерационным до удовлетворения требований задания.

Проектирование в среде САПР может выполняться инженерами с помощью команд. В САПР REVIT могут работать различные специалисты: архитекторы, конструкторы и системотехники – специалисты по инженерным системам. Инженеры – творческие личности, и при проектировании с помощью команд трудно достичь повторяемости результатов. Повышение производительности труда инженеров и повторяемости результатов можно достичь при автоматическом выполнении проектных проце-

© Борде Б.И., 2019

дур. Для программирования в САПР и создания проектных процедур появились унифицированные языки типа NetScriptCAD [3–6], а в INFRAWORKS встроен язык Java Script (JS). Для конкретного объекта создают модуль проектирования с координатами в системе LL84. Для многократного использования процедур координаты объекта нужно вынести в отдельные текстовые файлы, именуемые в соответствии с типом объекта и вариантом размещения. Многовариантное проектирование позволяет проводить оптимизацию, но нужны правила выбора вариантов в форме базы знаний [1–4]. Примеры имен процедур для INFRAWORKS приведены в табл. 1 и 2.

Сначала создается каталог проекта информационной модели (ИМ) [6] кампуса. Для основных объектов формируется подкаталог RVT, в который загружаютя ИМ зданий и других объектов. Вся информация должна находиться внутри каталога кампуса для возможности относительной адресации. Имя информационной модели образуется из имени объекта и года использованного программного комплекса для создания ИМ.

Таблица 1

Процедуры проектирования ИМ университетских кампусов

| Правила выбора вариантов | Наименование процедуры | Назначение | Параметры |
|---|---|---|---|
| | Main.js | Главная процедура | Тип объкта |
| Правила выбора вариата объекта RuleBuild | Build.js | Размещение объктов из подкаталога RVT | Имя, типы координат центра и рамеры |
| | Road.js | Чтение и размещение центров концов участков дорог в соответствии с их стилями | |
| | Pipe.js | Чтение и размещение центров концов участков трубопроводов в соответствии с их стилями | |

Таблица 2

Координаты проектирования ИМ университетских кампусов

| Наименование файла | Назначение | Примечание |
|---|---|---|
| SFU2Main.txt | Координаты границ кампуса | |
| SFU2Build.txt | Координаты центров объектов из RVT | |
| SFU2Road.txt | Координаты центров концов участков дорог в соответствии с их стилями. | |
| SFU2pipe.txt | Координаты центров концов участков трубопроводов и их стили | |

Процедуру Pipe.js можно использовать для чтения файлов координат концов участков трубопроводов горячей и холодной воды, канализации. Специализированная вычислительная система воспринимает информацию от датчиков и управляет вентилями с шаговыми двигателями. Вентиль управляется двоичным сигналом и находится в открытом или закрытом состоянии. Процедуру Pipe.js можно применять для размещения других линейных объектов. Такими объектами являются сильноточные и слаботочные кабельные системы, проводные компьютерные сети.

Результаты проектирования в INFRAWORKS сохраняются в двух файлах для каждого варианта с расширениями .sqllite и .files, последний из которых занимает значительный объем. Проектирование производится из клиентской части и серверной системы, установленной в Autodesk [6]. В ряде случаев нет смысла хранить результат,

а лучше выполнить процедуры заново. Сервис доступен после регистрации на Autodesk.

Таблица 3

Основные объекты ИМ университетского кампуса СФУ2

| Наименование файла | Назначение | Примечание |
|---|---|---|
| SFU2G2017.rv<br>SFU2G2020.rvt | Главный корпус политехнического института | |
| SFU2B2014.rvt | Корпус института инженерной физики и радиоэлектроники СФУ | ул. Киренского, 28, корпус № 12 (Б), |
| SFU2D2017.rvt | Корпус факультета энергетики ПИ СФУ | ул. Киренского, 26а, корпус № 15 (Д) |
| SFU2J2017.rvt | Корпус института космических и информационных технологий СФУ | ул. Киренского, 26б, корпус № 17 (Ж) |
| SFU2V2017.rvt | Корпус факультета транспорта ПИ СФУ | ул. Борисова, 20, корпус № 13 (В) |
| SFU2H52017.rvt | Общежитие 5 | ул. Борисова, 24 |
| SFU2H82017.rvt | Общежитие 8 | ул. Борисова, 6 |
| SFU2H112017.rvt | Общежитие 11 | ул. Борисова, 22 |

Для быстрой проверки достоверности координат объектов можно воспользоваться коробочными моделями, и только после проверки стоит переходить к полноценным моделям в Revit с точками примыкания коммуникаций. Многовариантное проектирование достигается за счет управления текстовыми файлами координат объектов и правил выбора объектов RuleBuild.

Важным и трудоемким является проектирование зеленых зон. Для этого создана универсальная процедура Park.js. Задаются координаты точек излома периметра парка, координаты границ пешеходных зон со скамейками для отдыха и урнами. Для этого создано дополнение библиотеки компонент, включая деревья и кустарники, размещение которых производится по определенным правилам и нормам. Необходима управляющая вычислительная система с датчиками и исполнительными устройствами автоматического полива и дозирования удобрений.

**Заключение.** Развитие информационных технологий и комплексных САПР позволило создать комплексные информационные модели объектов (ИМ). Информационные модели объектов дают возможность определить параметры для расчета систем управления. Предложены методы автоматизации создания множества ИМ объектов и множество правил выбора для генерации вариантов и оптимизации. При этом повышается производительность труда инженеров при сохранении разнообразия объектов.

**Список литературы**

1. Основы автоматизированного проектирования: учебник / под ред. А.П. Карпенко. М., ИНФРА-М, 2015. 329 с.

2. Артамонов Е.И. Структурное проектирование систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 2. С. 3–10

3. Борде Б.И. Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем. Красноярск, 2001. 352 с.

4. Борде Б.И. Программно-методический комплекс «Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем». Красноярск: КГТУ, 2008. Доступ в сети СФУ.

5. Борде Б.И. Сетевые сервисы проектирования неоднородных вычислительных систем // Тр. Междунар. конф. CAD/CAM/PDM – 2012. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 242–244.

6. Autodesk: офиц. сайт. – URL: http://www.autodesk.ru.

УДК 528

**Е.В. Волкова[1], А.А. Косторная[2]**

[1] Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
ФГБУ «НИЦ "Планета"», Москва, Россия
[2] Аспирант, младший научный сотрудник,
СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"», Новосибирск, Россия
e-mail: quantocosa@bk.ru, kostornaya@rcpod.ru

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ СКАНЕРОВ МСУ-МР (КА МЕТЕОР-М № 2) И AVHRR (КА NOAA-18, 19, METOP-B) НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Проведено сравнение качественных и количественных характеристик облачного покрова, восстановленных двумя различными методиками автоматической идентификации облачности и классификации ее параметров по данным радиометров с полярно-орбитальных спутников. Испытания проводились в весенний (март – май) и летний (июнь – август) периоды 2019 г. над Западной Сибирью (49–66° с.ш. и 60–95° в.д.).

*Ключевые слова: МСУ-МР, Метеор-М № 2, AVHRR, детектирование облачности, параметры облачного покрова.*

Автоматические системы дешифрирования спутниковых данных имеют широкое применение, в том числе в метеорологии. Программные комплексы, обнаруживающие облачные поля и восстанавливающие их качественные и количественные характеристики, позволяют проводить оперативную работу по метеобеспечению в условиях ограниченного времени. Авторами выполнено сравнение выходных продуктов методики дешифрирования облачного покрова (МДОП), разработанной в СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"», и комплексной пороговой методики (КПМ), созданной в ФГБУ «НИЦ "Планета"». В обеих методиках используются данные сканирующих радиометров с полярно-орбитальных метеоспутников и различные алгоритмы обработки спутниковой информации.

**МДОП.** Алгоритмическое ядро методики составляют адаптированные для Западной Сибири алгоритмы AWG (NOAA Algorithm Working Group), последовательно обнаруживающие облачность на спутниковом изображении (построение облачной маски) и восстанавливающие ее характеристики (параметры верхней границы облачности (ВГО), фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО, оптические и микрофизические параметры облачных частиц) [1]. В качестве исходных данных МДОП используют измерения радиометра AVHRR с КА NOAA-18, NOAA-19 и MetOp-B, а также значительный объем дополнительной информации: численные прогнозы погоды (ЧПП), цифровые маски водоемов, пустынь и т.п. Итоговыми информационными продуктами, поступающими потребителям, являются карты классификации облачности по типам, высоте и температуре ВГО. МДОП прошла ряд испытаний для установления точности расчетов. Оперативные сравнения с данным доплеровского метеолокатора показали средние значения достоверности для типов облачности ~97 %, а для высоты ВГО – ~80 % [2]. Решением Центральной методической комиссии (ЦМКП) Росгидромета продукты методики рекомендованы к использованию в работе метеоподразделений как дополнение к результатам синоптических и радиолокационных наблюдений.

© Волкова Е.В., Косторная А.А., 2019

**КПМ.** В качестве предикторов КПМ использует измерения сканера МСУ-МР с российского полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 2 в каналах 4–6 (λ = 3, 8, 11 и 12 мкм), а также их разности. Пороговые значения предикторов рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения как функции ряда параметров. Дополнительно используются прогностические поля о вертикальном распределении температуры воздуха на стандартных барических уровнях атмосферы и атмосферном давлении на уровне моря, цифровая модель рельефа и параметры облачности и осадков, полученные на начальных этапах классификации. Выходными продуктами работы КПМ являются оценки параметров облачного покрова (облачная маска, типы облачности, максимальная и суммарная водность облачного слоя, температура и высота ВГО, высота нижней границы облачности, толщина облачного слоя, фазовое состояние воды в облачных частицах вблизи ВГО, оптические плотность и толщина облачного слоя, эффективный радиус облачных частиц), характеристики осадков (зоны осадков разной интенсивности, тип осадков у поверхности земли, суточные, месячные и годовые суммы осадков) и опасных явлений погоды (ОЯП) (зоны гроз, града и обледенения разной интенсивности) [3]. Проведенная валидация расчетов КПМ над Западной Сибирью по данным наземных метеонаблюдений за 2017–2018 гг. показала достаточно высокую точность восстановления параметров облачного покрова, осадков и ОЯП для каждого пиксела спутникового изображения. Результаты также хорошо согласуются с климатическими оценками, синоптическими ситуациями и аналогичными расчётами по данным МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 для Европейской территории России [4].

**Условия сравнения.** Сравнивалось шесть восстановленных МДОП и КПМ параметров облачного покрова: тип облачности, фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО и эффективный радиус облачных частиц, оптическая плотность облачного слоя, температура и высота ВГО. Так как МДОП и КПМ используют информацию сканирующих устройств, установленных на разных метеоспутниках, необходимым условием сравнения было временно́е и пространственное совмещение спутниковой информации. С учетом времени развития облачности в летний период разница между сроками съемок задавалась не более 7 минут. Территория проведения испытаний – Западная Сибирь (49–66° с.ш. и 60–95° в.д.). Минимальное покрытие рассматриваемой территории расчетными данными составляло не менее 30 %. Учет смещения облачных массивов производился путем выбора пикселов на классифицированных изображениях МСУ-МР и AVHRR со значением корреляции в заданном окне больше порогового. Для сравнения двух методик использовались данные в конвективно-неустойчивые периоды года с большим количеством ОЯП – весенний и летний.

**Результаты за весенний период.** Выборка для сравнения двух методик за период с марта по май составила 45 сроков (все сроки – данные радиометра AVHRR КА NOAA-18). В 62 % сроков количество пикселов, детектированных как облачные, у МДОП оказалось больше, чем у КПМ.

Сравнение двух методик показало, что в 50 % случаев КПМ завышает значения температуры ВГО относительно МДОП (из них 71 % в дневное время). Ночью и вечером КПМ всегда занижает значения высоты ВГО относительно МДОП. Средние абсолютные отклонения значений температуры и высоты ВГО достигают 10,7 К и 1,6 км, а СКО – 12,3 К и 2 км соответственно. Совпадение оценок оптической плотности и эффективного радиуса частиц, полученных МДОП и КМП, не высоко и составляет 10 и 15 % соответственно.

Установлено, что КПМ более детально распределяет облачные частицы по их фазовому состоянию в отличие от МДОП: все четыре класса (кристаллическая облачность, облачность смешанного строения с преобладанием кристаллов, облачность смешанного строения с преобладанием капель, жидко-капельная облачность) были отмечены на спутниковых снимках за рассматриваемый период. Средняя величина соответствия оценок

МДОП и КПМ для кристаллической облачности и облачности смешанного строения составила около 50 %, для жидко-капельной облачности значительно меньше – 22 %. В ночное и вечернее время совпадение оценок обеими методиками выше.

**Выводы.** Проводимое сопоставление направлено на повышение достоверности восстановления характеристик облачности в Сибирском регионе.

**Список литературы**

1. Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным / А.А. Косторная, Е.И. Сапрыкин, М.Г. Захватов, Ю.В. Токарева // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 16–24.

2. Косторная А.А., Захватов М.Г., Токарева Ю.В. Результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным // Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. А.А. Алексеевой. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. С. 158–170.

3. Волкова Е.В., Гиричев Д.Б. Определение параметров облачного покрова и осадков по данным МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для территории Западной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. С. 166.

4. Волкова Е.В. Определение параметров облачного покрова и осадков по данным МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. С. 300–320.

УДК 528.813

**П.Н. Дагуров[1, 2], А.В. Дмитриев[1],**
**С.И. Добрынин[3], Т.Н. Чимитдоржиев[1]**

[1] Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия
[2] Бурятский государственный университет, Улан-Удэ, Россия
[3] Бурятский институт инфокоммуникаций СибГУТИ, Улан-Удэ, Россия
e-mail: pdagurov@gmail.com

# ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА РАДАРНОЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Исследовано зондирование снежного покрова методом радарной интерферометрии. Разработана приближенная модель интерферометрического зондирования. Выполнен анализ влияния рельефа на оценку параметров снежного покрова. Приведены результаты численных оценок. Показано, что рельеф может заметно влиять на интерферометрическую фазу.

*Ключевые слова: водный эквивалент снега, радарная интерферометрия, рельеф.*

**Введение.** Основными характеристиками снежного покрова, определяющими его влияние на окружающую среду, являются его толщина и водный эквивалент снега (snow water equivalent – SWE) [1]. Водный эквивалент снега определяет содержание воды в снежном покрове. В частности, для однородного снега с постоянной глубиной SWE определяется как произведение глубины снежного покрова $d$ и его плотности $\rho_s$, отнесенной к плотности воды $\rho_w$, и выражается в единицах длины.

Одним из методов микроволнового зондирования земных покровов является метод радарной интерферометрии [2]. Возможность измерений SWE с помощью радарной интерферометрии исследовалась в [3–5]. В работе [6] была предложена модель обратного рассеяния от шероховатого снежного покрова на шероховатой земной поверхности. В настоящей работе рассматривается более общий случай рассеяния от снежного покрова на поверхности с рельефом.

**Влияние рельефа на интерферометрическую фазу.** На рис. 1 показана геометрия задачи и траектории микроволн, по которым они распространяются в отсутствие снежного покрова и при его наличии для случая отсутствия рельефа. В отсутствие снега волна *1*, падающая из воздуха на почву под углом $\theta_i$ рассеивается обратно шероховатостями почвы в виде волны $w_{ag}$ (красная штриховая линия). Отметим, что на рис. 1 траектории падающих волн показаны сплошными линиями, а траектории рассеянных волны штриховыми линиями. В присутствии снежного покрова волна *2* при падении на снег из воздуха под углом $\theta_i$ после преломления и распространения в снежном слое падает на границу «снег – земля» под углом $\theta_t$ и рассеивается обратно теми же шероховатостями почвы в виде волны $w_{sg}$, траектория которой показана зеленой штриховой линией. Далее для наглядности учитываем только эту основную волну, рассеянную от почвы, и в первом приближении пренебрегаем влиянием других рассеянных волн.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда снег лежит на почве в гористо-холмистой местности без лесного покрова. Полагаем, что рельеф описывается известной цифровой моделью рельефа (ЦМР). Будем рассматривать взаимодействие волн с поверхностью снега и почвы в приближении касательной плоскости и геометрической оптики, полагая, что лучи взаимодействуют с плоскостями, касательными к поверхности почвы и снега в точке падения волны, как показано на рис. 1.

© Дагуров П.Н, Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Чимитдоржиев Т.Н., 2019

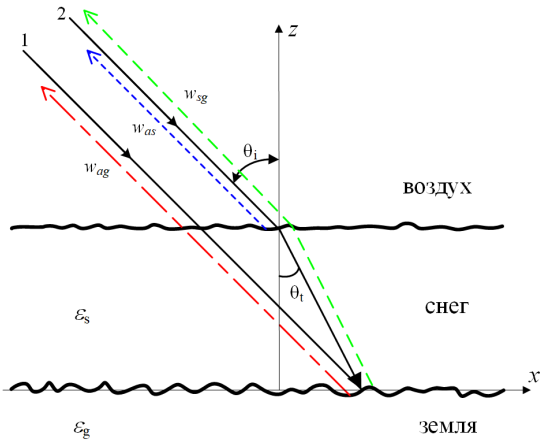



Рис. 1. Геометрия обратного рассеяния волны почвой
без снежного покрова и со снежным покровом

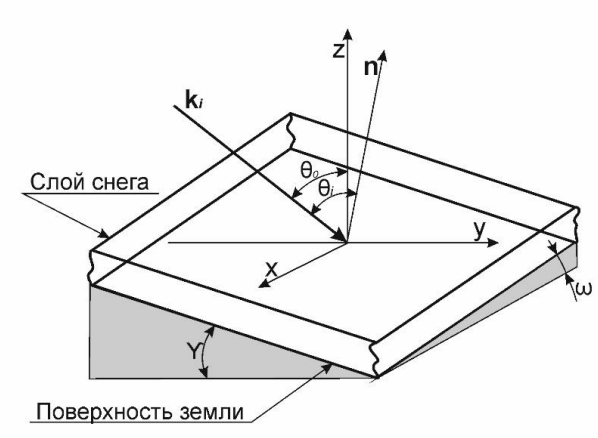



Рис. 2. Геометрия задачи о падении волны
на касательную плоскость с локальными наклонами

Таким образом, задачу можно сформулировать следующим образом. На слой снега, ограниченный граничными плоскостями «воздух – снег» и «снег – почва», падает волна под углом падения к поверхности снега $\theta_i$, который после преломления в снеге под углом $\theta_t$ и прохождения толщи снега рассеивается обратно. Номинальный угол падения (угол обзора), определяемый по отношению к вертикальной оси *z*, равен $\theta_0$. Волновой вектор волны $\boldsymbol{k_i}$ лежит в плоскости *yz* и единичный волновой вектор имеет вид

$$\hat{k}_i = \sin\theta_0 \mathbf{j} - \cos\theta_0 \mathbf{k} \quad \text{(j, k – единичные орты осей } y \text{ и } z\text{).}$$

Плоскости «воздух – снег» и «снег – почва» параллельны друг другу, и расстояние между ними по вертикали (толщина снега) равно *d*. Локальный наклон этих плоскостей, определяемый из ЦМР, по отношению к горизонтальной плоскости составляет угол γ по радиолокационной координате «дальность» (ось *y*) и ω по координате «азимут» (ось *x*). Угол падения волны на горизонтальную поверхность (номинальный угол падения) составляет $\theta_0$. Необходимо найти интерферометрическую фазу Φ волны в рассматриваемом случае неровного рельефа.

Локальный угол падения $\theta_i$, равный углу между единичной нормалью $\hat{n}$ к поверхностям снега и земли и единичным волновым вектором $\hat{k}_i$, рассчитывается по формуле

$$\cos\theta_i = -\hat{k}_i \cdot \hat{n} = \frac{tg\gamma \sin\theta_0 + \cos\theta_0}{\sqrt{1 + tg^2\gamma + tg^2\omega}}. \qquad (1)$$

Из формулы (1) следует, что наибольшее влияние на локальный угол отражение оказывает наклон рельефа по координате «дальность». Далее полагаем, что ω = 0.

Из геометрии задачи следует, что интерферометрическая фаза

$$\Phi = 2k\sqrt{\varepsilon_s}\, l_s - 2kl_a\,, \qquad (2)$$

где $l_s = \dfrac{d_1 \cos\gamma}{\cos\theta_t}$ – путь, пройденный волной в снегу; $l_a = l_s \cos(\theta_i - \theta_t)$ – путь, пройденный в воздухе волной *2* дополнительно к пути, пройденному в воздухе волной *1*. Диэлектрическая проницаемость снега зависит только от плотности снега ρ и определяется соотношением [7]

$$\varepsilon_s = 1 + 1.6\rho + 1.86\rho^3 .$$

Выражение (2) принимает вид

$$\Phi = \frac{2kd_1 \cos\gamma}{\cos\theta_t}\left[\sqrt{\varepsilon_s} - \cos(\theta_i - \theta_t)\right]. \qquad .$$

После упрощения получим

$$\Phi = 2kd_1 \cos\gamma\left(\sqrt{\varepsilon_s}\cos\theta_t - \cos\theta_i\right).$$

Переходя к номинальному углу падения по отношению к вертикали (углу обзора космического радара) $\theta_0$, имеем

$$\Phi = 2kd_1 \cos\gamma\left(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2(\theta_0 - \gamma)} - \cos(\theta_0 - \gamma)\right). \qquad (3)$$

Выражение (3) справедливо как для случая, когда поверхность снега составляет положительный угол $\alpha$ с горизонтальной поверхностью (передний склон), так и для отрицательных значений $\alpha$ (задний склон).

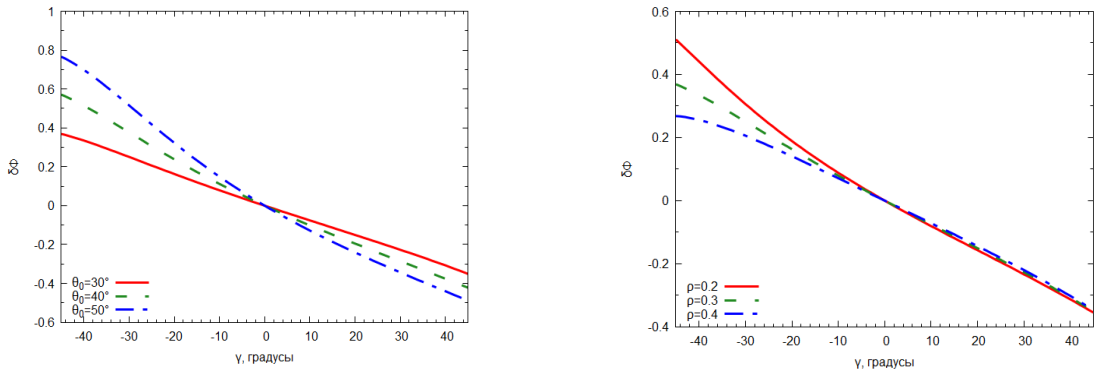
Разность интерферометрических фаз для случаев неровного и гладкого рельефа имеет значение

$$\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0 = 2kd_1\left[\cos\gamma\left(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2(\theta_0 - \gamma)} - \cos(\theta_0 - \gamma)\right) - \left(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta_0} - \cos\theta_0\right)\right]$$

и относительная разность фаз

$$\delta\Phi = \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} = \left[\frac{\cos\gamma\left(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2(\theta_0 - \gamma)} - \cos(\theta_0 - \gamma)\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta_0} - \cos\theta_0\right)} - 1\right]. \qquad (4)$$

**Результаты**. На рис. 3 приведены результаты расчетов по формуле (4) в зависимости от угла γ при различных значениях $\theta_0$ и ρ. Эти результаты показывают, что влияние наклонов рельефа на относительную фазу может быть достаточно значительным. Для крутых склонов с значениями γ порядка 45° относительные изменения фазы достигают 40 %. Однако при сравнительно пологих склонах при углах наклона, меньших 10°, эти изменения не превышают 10 %.




*а* *б*

Рис. 3. Зависимости относительного изменений интерферометрической фазы радарной волны от угла наклона рельефа вдоль координаты «дальность»: *а* – при различных $\theta_0$; *б* – при различных ρ

**Список литературы**

1. Rees W.G. Remote sensing of snow and ice. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. 302 p.

2. A tutorial on synthetic aperture radar / A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis [et al.] // IEEE Geosci. Remote Sensing Mag. 2013. Vol. 1, № 1. P. 6–43.

3. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow / T. Guneriussen, K.A. Hogda, H. Johnsen, I. Lauknes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. № 10. P. 2101–2108.

4. Snow water equivalent of dry snow measured by differential interferometry / S. Leinss, A. Wiesmann, J. Lemmetyinen, I. Hajnsek // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2015. Vol. 8, № 8. P. 3773–3790.

5. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия L-диапазона для определения параметров снежного покрова / П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев, А.В. Дмитриев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 14. URL: http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf.

6. Интерферометрическая модель радарного зондирования снежного покрова / П.Н. Дагуров, А.К. Балтухаев, А.В. Дмитриев [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы V Междунар. науч. конф. 2018. С. 109–112.

7. Mätzler C. Microwave permittivity of dry snow // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1996. Vol. 34, № 2. P. 573–581.

УДК 630*587/587.2/587.3/587.5

**И.М. Данилин[1, 2], Р.А. Зиганшин[1], И.А. Целитан[1]**

[1] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: danilin@ksc.krasn.ru, kedr@ksc.krasn.ru, igor57@akadem.ru

# ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ЛАНДШАФТНОЙ ОСНОВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Рассмотрены разработки, направленные на использование дистанционных методов и ландшафтного подхода при мониторинге лесных территорий, представляющие интерес для гражданских отраслей (лесное хозяйство, природопользование, экологический мониторинг) и решения различных инженерных и военных задач (инженерное проектирование при размещении и обустройстве военных объектов, дорожной сети, разведка, маскировка/демаскировка и др.).

*Ключевые слова: ландшафтный подход, перспективные методы дистанционного зондирования лесов.*

В Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН продуктивно разрабатывались дистанционные методы зондирования различных компонентов природных территориальных комплексов, в частности исследовали возможности ландшафтного метода инвентаризации лесов. Достоинства данного подхода для лесопользования заключаются в возможности внедрения в практику лесного хозяйства и лесоэкологического мониторинга перспективного участкового метода лесоустройства [3, 4], при котором лесная площадь делится на относительно однородные внутри себя хозяйственные участки (таксационные выделы) по двум критериям:

1) по условиям местопроизрастания (при использовании контурного ландшафтного дешифрирования аэрокосмических снимков);

2) таксационным показателям насаждения (при использовании классификации типов леса, т.е. лесотипологической схемы).

Таксационные выделы при закреплении их в натуре получают маркированные площади и границы.

При ведении в лесничествах интенсивного хозяйства в процессе лесопользования возникают следующие вопросы: выбор предпочтительных древесных пород; оптимальные состав и структура насаждений; ориентирование на определенные основные сортименты древесины в возрасте основной рубки; учет требований лесопотребления и определение средообразующей роли насаждений (все виды его защитных свойств в экосистемах). Участковый метод лесоустройства, в отличие от принятого сейчас метода классов возраста, позволяет учитывать природно-хозяйственные особенности каждого насаждения в отдельности, что делает лесное хозяйство в объекте лесоустройства более эффективным.

Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает высокий уровень достоверности данных о состоянии лесного покрова, в том числе для определения ключевых структурных характеристик лесов, решения различных прикладных задач, связанных с размещением на лесных территориях объектов дорожной сети, инженерной и военной инфраструктуры.

© Данилин И.М., Зиганшин Р.А., Целитан И.А., 2019

Находят применение три основных метода ДЗЗ: наземное (TLiDAR) и воздушное лазерное сканирование (LiDAR), цифровая аэрофотосъемка и снимки со спутников [1, 2, 7–12].

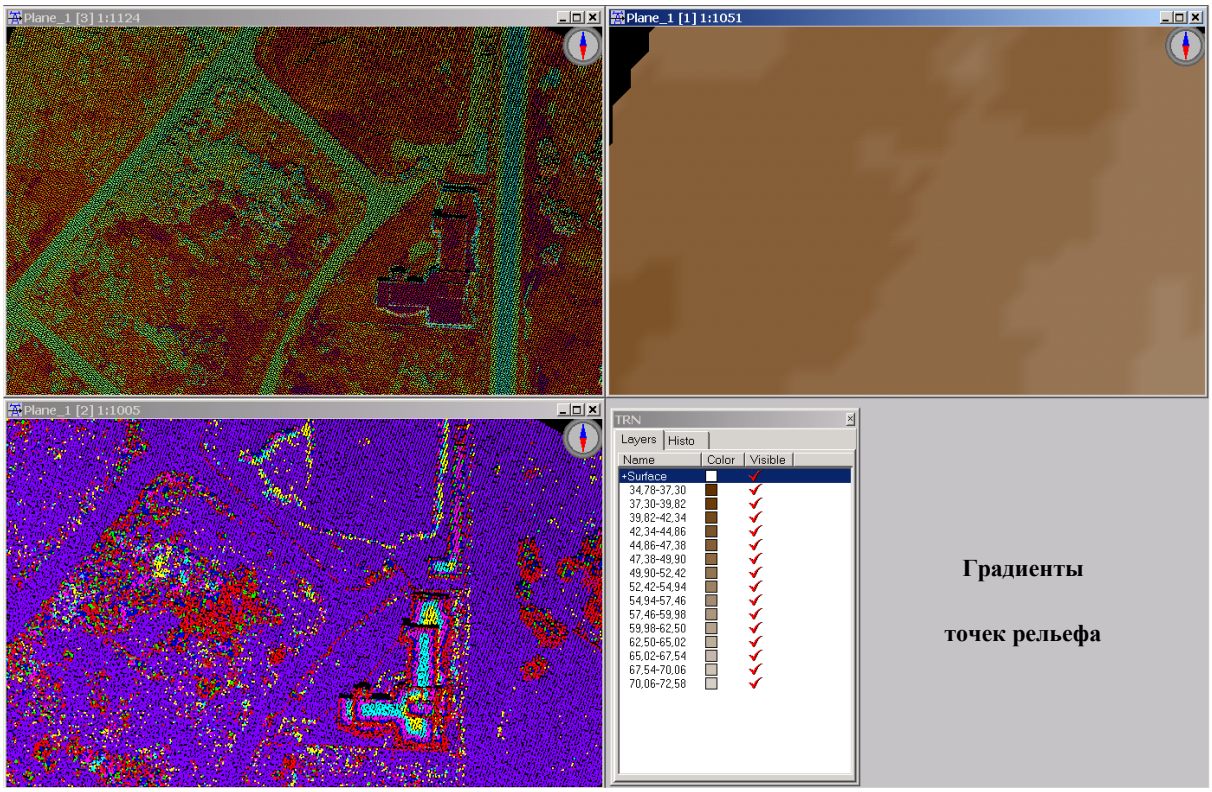



Рис. 1. Триангуляционная модель пространственной связанности точек рельефа лесной территории, построенная по данным воздушного лазерного сканирования

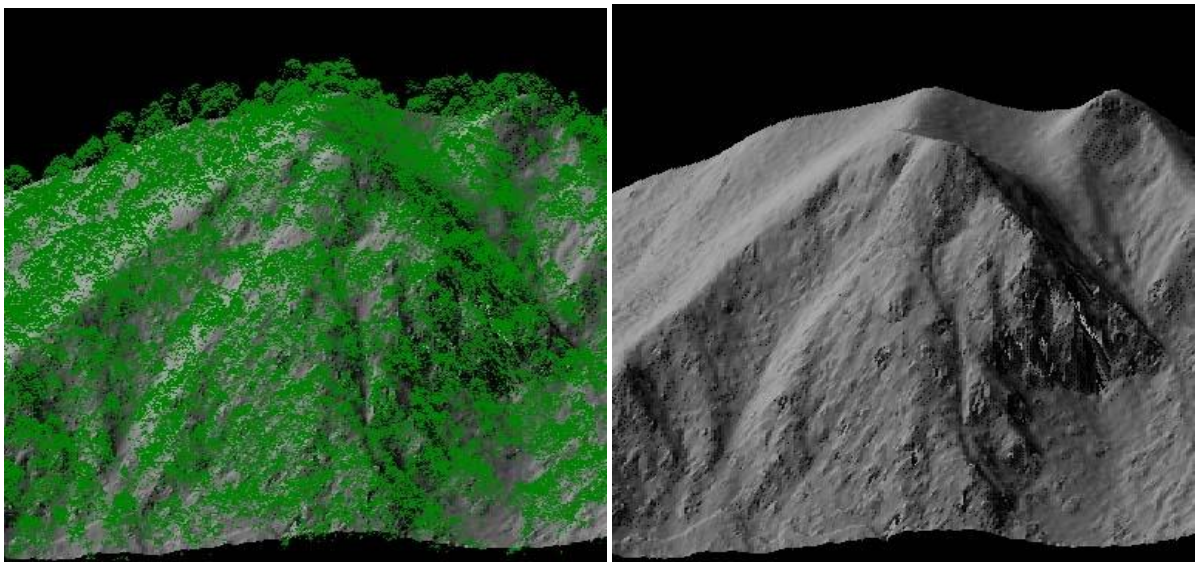


Рис. 2. 3D-визуализация элементов рельефа под кронами деревьев по данным лазерного сканирования

Трехмерное моделирование рельефа и растительности представляется первоочередной задачей при построении лесных ландшафтных сцен, потому как именно каче-

ственные модели рельефа/растительности отвечают за визуализацию трехмерных сцен лесных территорий. Высокоточное моделирование лесной растительности по данным лазерной локации, цифровой аэрокосмической съемки и спутникового позиционирования позволяет рассчитывать достоверные структурные и статистические характеристики лесов и морфометрические показатели растительности, скрытого под ней рельефа, объектов инженерной и военной инфраструктуры, создавать высокоточные детализированные цифровые карты распределения лесной растительности [1, 2, 7–9] (рис. 1–3).

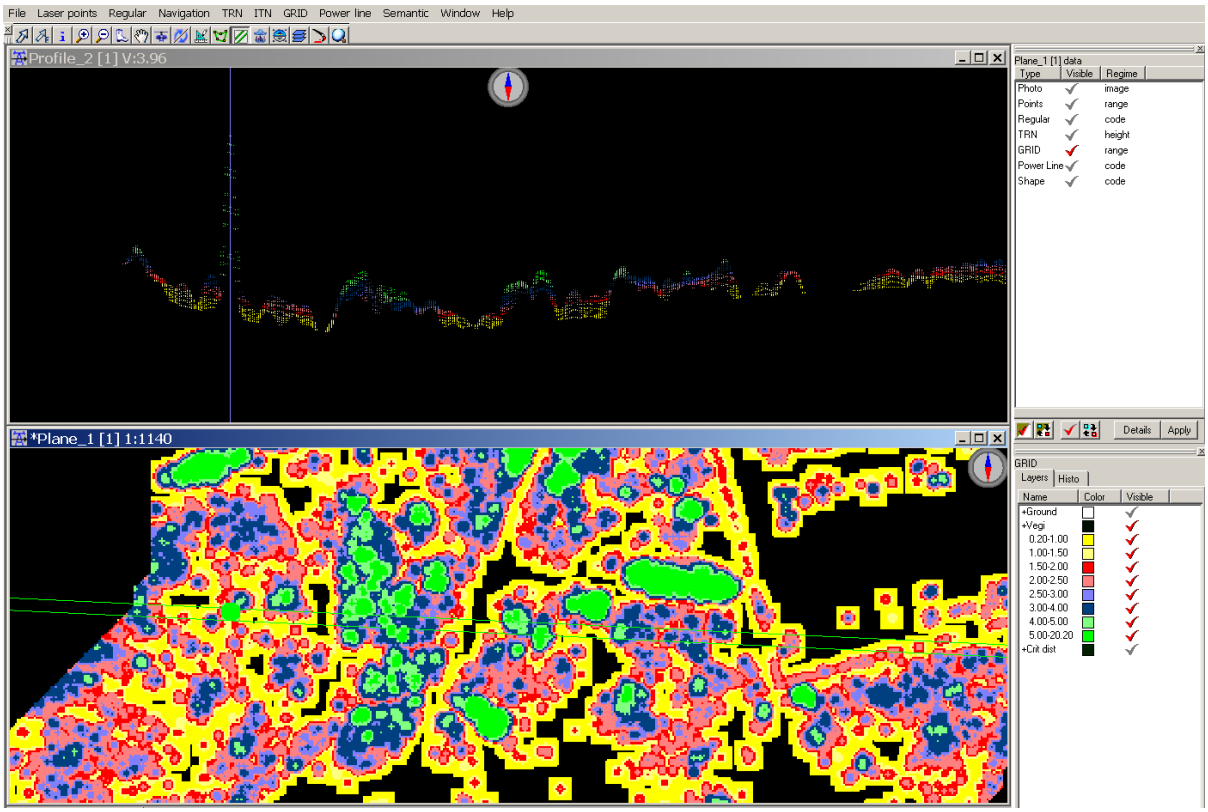



Рис. 3. Создание базовой карты распределения лесной растительности по высотам

В процессе разработки технологии мониторинга лесных территорий получены патенты РФ на изобретения способов бонитирования и определения полноты сложных, смешанных, разновозрастных насаждений [5, 6].

**Список литературы**

1. Данилин А.И., Данилин И.М. Свищев Д.А. Зондирование лесного покрова высокочастотными импульсными лазерами и цифровыми аэро- и космическими фотоаппаратами сверхвысокого разрешения: опыт применения в Сибири // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5 (51). С. 85–89.

2. Данилин И.М., Фаворская М.Н. Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Исследования Земли из космоса. 2013. № 2. С. 62–73.

3. Зиганшин Р.А. Таксация горных лесов на природной основе. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 204 с.

4. Зиганшин Р.А. Лесной массив: географические и лесотаксационные признаки и критерии // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 50–68.

5. Пат. № 2535725 РФ. Способ бонитирования сложных, смешанных, разновозрастных насаждений / Зиганшин Р.А. Приоритет 25.03.2013; зарег. 16.10.2014. М.: Роспатент, 2014.

6. Пат. № 2531329 РФ. Способ определения полноты сложных смешанных, разновозрастных древостоев / Зиганшин Р.А. Приоритет 25.03.2013; зарег. 22.08.2014. М.: Роспатент, 2014.

7. Ткачева А.А., Данилин И.М. Использование данных лазерного сканирования в моделировании лесных ландшафтных сцен // Журнал Сиб. федер ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 727–740.

8. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Брюханов Н.В. Погрешности дешифрирования лесов Приангарья методом классификации пикселей спутникового снимка // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 56–67.

9. Dong P., Chen Q. LiDAR remote sensing and applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 200 p.

10. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in Western Oregon, USA / A.T. Hudak, A.T. Haren, N.L. Crookston [et al.] // For. Sci. 2014. Vol. 60, № 2. P. 253–269.

11. Rahman M.Z.A., Gorte B.G.H., Bucksch A.K. A new method for individual tree delineation and undergrowth removal from high resolution airborne lidar // Laser scanning 2009, IAPRS / F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, G. Vosselman (Eds). Sept. 1–2, 2009. Paris, France. 2009. Vol. XXXVIII. Part 3/W8. P. 283–288.

12. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization / M.A. Wulder, T. Han, C.J. White [et al.]/ // Rem. Sens. Environ. 2007. Vol. 110. P. 123–137.

УДК 630*587.2/587.5

**И.М. Данилин[1, 2], И.А. Целитан[1]**

[1] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: danilin@ksc.krasn.ru, igor57@akadem.ru

# АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Обсуждаются алгоритмы обработки данных лазерного сканирования и определения таксационных (морфоструктурных) характеристик насаждений и отдельных деревьев с использованием методов полигонального моделирования и автоматизированного дешифрирования геометрически сложных лесных сцен и объектов.

*Ключевые слова: цифровые модели рельефа, лесные ландшафтные сцены, морфоструктурные характеристики деревьев, полигональное моделирование.*

**Введение.** Разработка эффективных алгоритмов обработки данных лазерного сканирования и автоматизированного определения таксационных показателей насаждений является нетривиальной задачей и одним из важнейших направлений в развитии и совершенствовании методов дистанционного мониторинга лесов. Решение этой задачи основывается на построении цифровых моделей лесных ландшафтных сцен и моделировании пространственной структуры леса [1–19]. Построение цифровых моделей предполагает обработку двух типов интегрированных данных – лазерного (или радарного) сканирования и цифровой воздушной и спутниковой съемки, выполняется в виде последовательных этапов, каждый из которых представляется отдельной задачей моделирования.

**Материалы и методы.** На первом этапе выполняется построение цифровой модели рельефа (ЦМР) участка земной поверхности по лазерным данным [2, 3, 6, 7]. В современных ГИС используются несколько типов ЦМР в зависимости от формы представления данных: с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках; с нерегулярным представлением точек; с изолинейным заданием точек (расположенных равномерно на изолиниях или с учетом их кривизны). Для построения трехмерных моделей рельефа и растительности применяются такие методы, как интерполяция на основе минимальной кривизны, ближайшего окружения, триангуляции, регрессионных зависимостей, сферических сплайнов и т.д.

На втором этапе производится текстурирование ЦМР построением нижнего яруса леса, а также осуществляется выделение и визуализация слоя деревьев (верхнего яруса древостоя) как с использованием лазерных/радарных данных, так и цифровой аэрокосмической съемки [2, 3, 6, 7, 9–12, 18, 19].

На третьем этапе реалистичность созданной трехмерной (3D) ландшафтной модели дополняется за счет «наложения» эффектов таких природных явлений, как дождь, снег, туман, степень и направление освещенности и т.п. [2, 3, 9, 10].

Существуют различные алгоритмы моделирования лесной растительности. Наиболее часто применяемые на практике – использование грамматик L-систем и алгоритмов Ray Tracing и Space Colonization [2, 9, 10, 13].

© Данилин И.М., Целитан И.А., 2019

Моделирование растительности в 3D-пространстве включает в себя как процесс создания 3D-модели отдельно стоящего дерева, так и моделирование лесной сцены, в которой необходимо учитывать взаимовлияние деревьев друг на друга. Дерево является основным объектом моделирования, в силу присущей ему сложной структуры ветвления (моноподиальный, симподиальный, тернарный) у различных пород деревьев. Кустарники рассматриваются как частный случай дерева с тернарным типом ветвления без выраженного ствола.

При рассмотрении существующих подходов к моделированию отдельных деревьев выделяются три основные из них:

- полигональное моделирование (polygon-based modelling);
- моделирование на основе изображений объекта (image-based modelling);
- моделирование на основе шаблона/эскиза модели (sketch-based modeling) [2, 9, 10].

Перспективным представляется также метод построения трехмерных объектов лесных сцен с помощью вокселей, ромбов вращения – эллипсоидов, квадрик, суперквадрик [3].

**Результаты и обсуждение.** В одной из последних версий Exelis ENVI LiDAR v5.3 [8] представлены модули, позволяющие в автоматическом режиме обрабатывать лазерные сканы и интерполировать слои земли, лесной растительности, объектов инженерной инфраструктуры. Данная программа дает возможность выполнять реконструкцию каждого дерева и формировать их совокупности в отдельный слой как в ЦМР, так и записывает в шэйп-файл в формате ArcGIS или CSV (текстовый) в виде цифровых последовательностей, отображающих координаты, средние радиусы и высоту крон каждого дерева (таблица).

Таблица

Отображение пространственных и морфометрических параметров деревьев в шэйп-файле, формируемом в программе Exelis ENVI LiDAR v5.3 [8]

| X | Y | Z | Radius, m | Height, m |
|---|---|---|---|---|
| 1480733.400002 | 327012.200000 | 141.634720 | 2.000 | 4.363 |
| 1480796.599998 | 327059.799999 | 134.478012 | 2.400 | 5.479 |
| 1480783.000000 | 327030.600000 | 136.346802 | 2.000 | 5.426 |
| … | | | | |

Массивы файлов точек лазерных отражений (в том числе необработанные, «сырые») открываются в форматах LAS или BIN кейгенов (кейген – англ. *key generato* – генератор ключей) программных продуктов Agisoft Metashape Professional [4], Agisoft Photoscan [5], российской группы компаний «Геоскан» [1], а также TerraMatch [14], TerraPhoto [15], TerraScan [16], финской компании Terrasolid [17], созданных для профессиональной обработки данных воздушного лазерного сканирования, инженерного и ландшафтного 3D-моделирования (рис. 1–2).

При детальном моделировании морфометрических параметров отдельных деревьев из исходного множества лазерных точек насаждения выделяются подмножества точек каждого отдельного дерева (рис. 3).

Более сложной задачей является адекватное выделение контуров соседних деревьев при их близком расположении друг с другом и перекрытии крон. Эта задача решается путем определения слоя (значение по оси *c* является постоянной величиной и принадлежит интервалу, равному 5–6 размерам высоты воксела или суперэллипсоида, принятого в сцене) с максимальным количеством точек (рис. 4) [3].

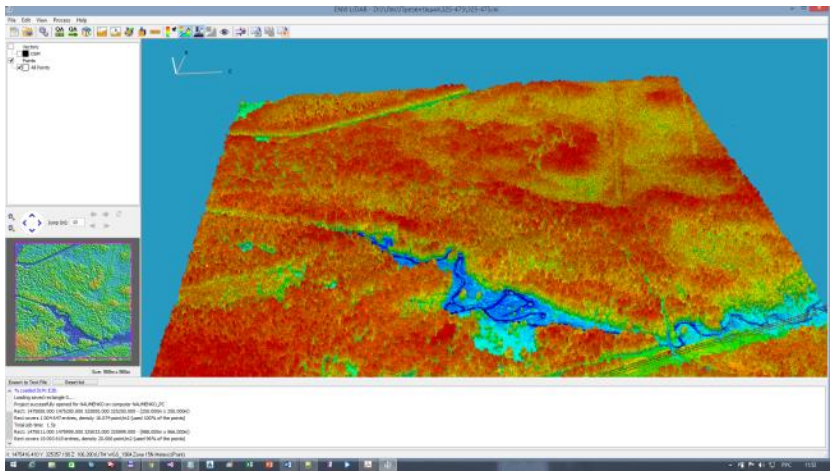


Рис. 1. Визуализация облака точек лазерных отражений лесной территории в рабочем окне программы Exelis ENVI LiDAR v5.3 [8]

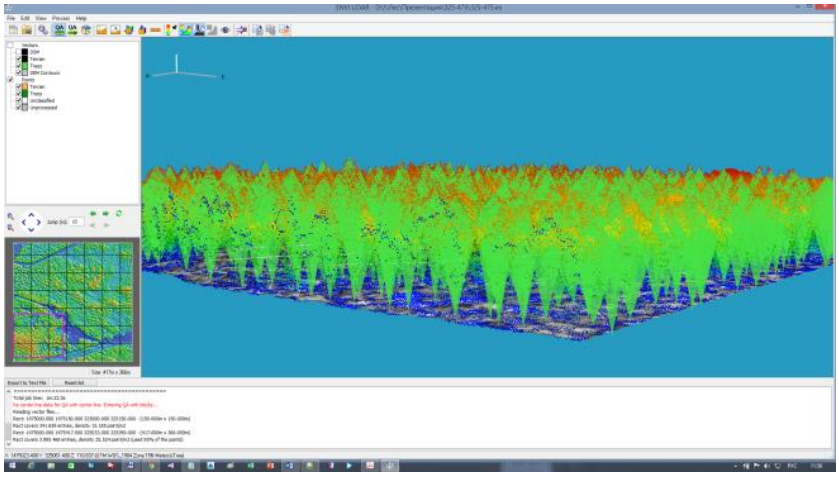


Рис. 2. Автоматически сгенерированная модельная 3D-реконструкция пространственной структуры насаждения и отдельных деревьев участка лесной сцены вокселами (ромбы вращения – эллипсоиды, квадрики)

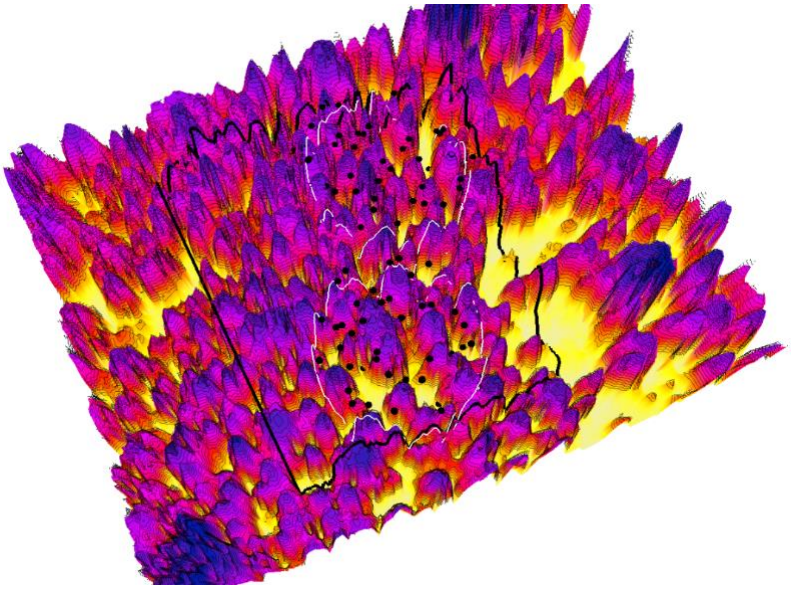


Рис. 3. Поле распределения древесного полога насаждения с маркированными центрами крон (черные точки) и граничными контурами (светлые линии) деревьев

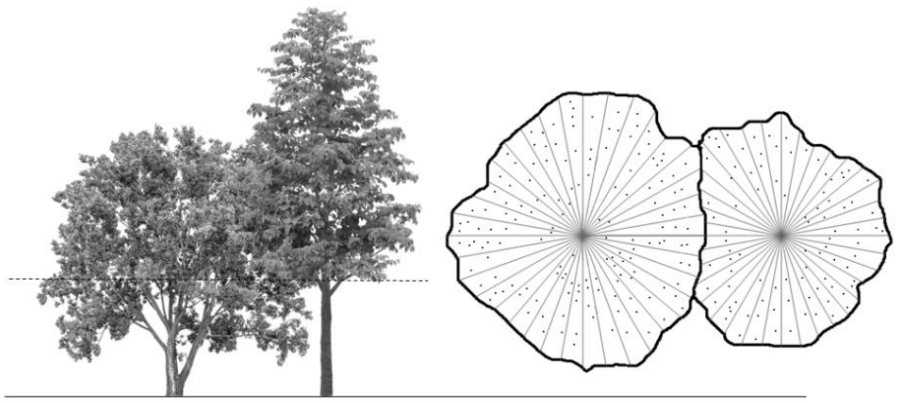


Рис. 4. Вычисление центра масс дерева для слоя с максимальным количеством точек лазерного сканирования

Для каждой области вычисляется центр масс, проекция которого на поверхность смоделированной ранее лесной сцены является основанием дерева. Далее, используя облако точек, относящееся к одному объекту, выполняется моделирование структуры ветвления на основе алгоритма Space Colonization [2, 9, 10, 13].

Основная идея данного подхода заключается в итеративном добавлении новых элементов (ветвей) к генерированной ранее геометрической структуре (полигональной модели) дерева. Данный алгоритм является адаптивным, т.е. процесс «роста» зависит от присутствия близлежащих объектов насаждения, соседства с другими деревьями, специфики пространственной структуры, других факторов.

Вычисления параметров полигональных моделей добавляемых морфоструктурных элементов крон деревьев производятся по формуле

$$f(x,y,z)=\left[\left(\frac{x}{a_1}\right)^{\frac{2}{e_2}}+\left(\frac{y}{a_2}\right)^{\frac{2}{e_2}}\right]^{\frac{e_2}{e_1}}+\left(\frac{z}{a_3}\right)^{\frac{2}{e_1}},$$

где $a_1$ – радиус по направлению оси $x$; $a_2$ – радиус по направлению оси $y$; $a_3$ – радиус по направлению оси $z$; $e_1$ – параметр формы плоскости, перпендикулярной оси $xy$; $e_2$ – параметр формы плоскости, параллельной оси $xy$ (рис. 5).

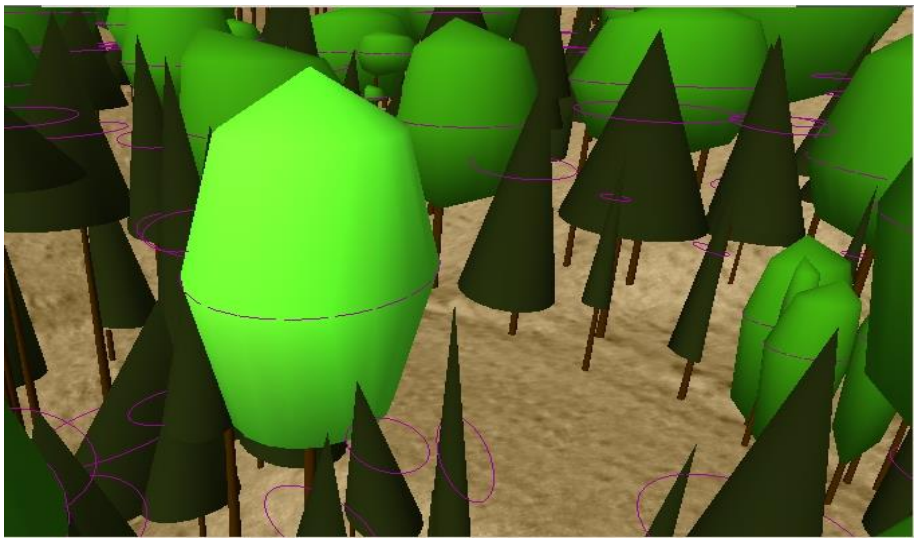


Рис. 5. Полигональные модели крон деревьев лиственных (светло-зеленые) и хвойных (темно-зеленые) пород

**Заключение.** Использование полигонального воксельного 3D-представления дает возможность моделировать лесные ландшафтные сцены по точкам лазерного сканирования с необходимой точностью для каждого типа возникающих задач. Одним из достоинств полигонального представления графики является снятие ограничений на геометрическую сложность сцены – единственным и универсальным фактором, влияющим на сложность моделируемых объектов, является воксельное разрешение. Использование алгоритма Ray Tracing позволяет получать реалистичные модели лесных ландшафтных сцен.

Вместе с тем следует отметить недостаток данного алгоритма – необходимость в пересчете пересечения луча визирования со всеми примитивами в сцене, что является довольно ресурсоемкой вычислительной процедурой. Преимущество данного подхода заключается в возможности добавления различных природных эффектов в сцену путем изменения яркости и цвета «поверхностных» вокселей без дополнительных перерасчетов в сцене. Для построения полигональной модели лесного участка размерностью 8 096 × 8 096 × 256 вокселей требуется не более 10 Мб машинной памяти. При этом для детализированной прорисовки геометрии крон и стволов отдельных деревьев рекомендуется использовать алгоритм Space Colonization.

**Список литературы**


1. Геоскан. СПб., 2019. URL: https://www.geoscan.aero/ru.
2. Данилин И.М., Фаворская М.Н. Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Исследования Земли из космоса. 2013. № 2. С. 62–73.
3. Ткачева А.А., Данилин И. М. Использование данных лазерного сканирования в моделировании лесных ландшафтных сцен // Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 727–740.
4. Agisoft Metashape Professional. СПб.: Геоскан, 2019. URL: https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/ meta-shape_pro.
5. Agisoft PhotoScan Professional Edition, версия 1.4. СПб.: Геоскан, 2018. URL: https://www.agisoft.com/pdf/ photoscan-pro_1_4_ru.pdf.
6. Danilin I.M., Medvedev E.M. Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning // J. Sib. Fed. Univ. Engineer. & Technol. 2011. Vol. 4, № 3. P. 326–336.
7. Dong P., Chen Q. LiDAR remote sensing and applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 200 p.
8. Exelis (ext. ITT) ENVI v53, IDL v8.5, LiDAR v5.3x64, 2018. URL: http://www.lavteam.org/tags/Exelis/.
9. Fusion of airborne LiDAR and digital photography data for tree crowns segmentation and measurement / M.N Favorskaya., A.A. Tkacheva, I.M. Danilin, E.M. Medvedev // Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. Smart Innovation, Systems & Technologies. Vol. 40 / E. Damiani, R.J. Howlett, L.C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro (Eds.). Springer Int. Publ., Switzerland, 2015. P. 191–201.
10. Realistic 3D modelling of forest growth with natural effect / M.N. Favorskaya, A.G. Zotin, I.M. Danilin, S.N. Smolentcseva // Advances in Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems & Technologie / G.P. Wren, L.C. Jain, K. Nakamatsu, R.J. Howlett (Eds.). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. Vol. 4ю P. 191–199.
11. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in Western Oregon, USA / A.T. Hudak, A.T. Haren, N.L. Crookston [et al.] // For. Sci. 2014. Vol. 60, № 2. P. 253–269.
12. Rahman M.Z.A., Gorte B.G.H., Bucksch A.K. A new method for individual tree delineation and undergrowth removal from high resolution airborne Lidar // Laser scanning 2009, IAPRS / F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, G. Vosselman (Eds). Sept. 1–2, 2009. Paris, France. 2009. Vol. XXXVIII. Part 3/W8. P. 283–288.
13. Runions A., Lane B., Prusinkiewicz P. Modeling tree with a space colonization algorithm // Proc. Eurogra-phics Workshop on Natural Phenomena. The Eurographics Ass., 2007. P. 63–70.

14. TerraMatch – Calibration and Strip Adjustment. Helsinki: Terrasolid, 2019. URL: http://www.terrasolid.com/products/terramatchpage.php#tmuav.

15. TerraPhoto – Ortho-Rectification of Images and Data Visualization. Helsinki: Terrasolid, 2019. http://www. terrasolid.com/products/terraphotopage.php.

16. TerraScan – Software for LiDAR Data Processing and 3D Vector Data Creation. Helsinki: Terrasolid, 2019. http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php#tsuav.

17. Terrasolid Point Cloud Intelligence. Software for Processing Point Clouds and Images. Helsinki: Terrasolid, 2019. http://www. terrasolid.com/home.php.

18. Demonstrating the transferability of forest inventory attribute models derived using airborne laser scanning data / P. Tompalski, J.C. White, N.C. Coops, M.A. Wulder // Rem. Sens. Environ. 2019. Vol. 227. P. 110–124.

19. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization / M.A. Wulder, T. Han, C.J. White [et al.] // Rem. Sens. Environ. 2007. Vol. 110. is. 1. P. 123–137.

УДК 528.72:528.8

**Л.Г. Евстратова**

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
e-mail: lge_21@mail.ru

# СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Современные цифровые методы обработки позволяют реализовать все потенциальные метрические свойства изображения как в геометрическом, так и в фотометрическом плане. Таким образом, основная задача современной фотограмметрии заключается в реализации потенциальных возможностей цифровых методов. В работе рассмотрены основные виды ошибок цифровых снимков и точность фотограмметрических измерений по цифровому изображению. Разработана структурная модель влияния ошибок цифровых снимков на точность получения фотограмметрической продукции на различных стадиях обработки. Показано, что внутренняя метрическая точность фотограмметрической информации (измерения или изображения) изменяется в зависимости от стадии фотограмметрической обработки. Обоснована необходимость хранения фотограмметрических данных на определенных этапах обработки, что дает возможность регулировать точность результатов фотограмметрической обработки. Точность результата обработки (ортофотоплан, карта, измерительная 3D-модель) можно повысить путем использования дополнительных данных, не выполняя заново сбор информации по снимкам. Это востребовано при совмещении информации различного уровня, собранной по разновременным аэрокосмическим снимкам с различными изобразительными и метрическими свойствами.

*Ключевые слова: аэрокосмические снимки, фотограмметрическая обработка, математическая модель, точность обработки.*

Достоверность полученной метрической и качественной информации как о текущем состоянии объекта, так и его ретроспективном состоянии по результатам совместной обработки космических и аэроснимков несомненна. Многие динамические процессы изучаются по разновременным снимкам, трехмерным моделям.

Расширение сферы использования методов цифровой фотограмметрии, повышение экономической эффективности выполнения работ, сокращение производственного цикла, создание новых видов продукции являются востребованными для решения задач, возникающих при управлении территориями.

Как известно, основное преимущество цифровых методов фотограмметрической обработки снимков – это их абсолютная гибкость и автоматизация измерений. Если аналоговые методы полностью бы зависели от физической реализации выбранной модели обработки (оптические, механические, оптико-механические приборы, фототрансформаторы), то с появлением аналитических методов стало возможным реализовать практически любую модель обработки снимков. Однако это относилось только к преобразованию (обработке) координат точек, измеренных на снимках, а не к самим изображениям.

С появлением цифровых методов стало возможным выполнять обработку как измерений, выполненных на снимках, так и собственно изображений. При обработке цифровых изображений стало возможным разделить процессы сбора информации и фотограмметрической обработки с целью получения пространственных координат точек объекта в заданной системе координат. В этом случае полученные измерения могут обрабатываться с различной точностью и детальностью в зависимости от исполь-

© Евстратова Л.Г., 2019

зующихся исходных данных: данных о калибровке камеры, наличии опорных точек, дополнительных данных о координатах центров фотографирования и т.д. в соответствии с выбранной математической моделью [1].

Актуальность работ по исследованию влияния ошибок снимков на точность получения результата и изменения точности на различных этапах фотограмметрической обработки аэрокосмических снимков связана с тем, что во многих современных цифровых технологиях ни в коей мере не использовали всех возможностей цифровых изображений.

В работе рассмотрены основные виды ошибок цифровых снимков и точность измерений по цифровому изображению. Ошибки цифрового снимка – это ошибки исходного снимка, ошибки, возникающие в процессе получения цифрового изображения и ошибки измерения координат точек цифровых снимков. Основное внимание уделяется изменению точности в процессе фотограмметрической обработки. В первую очередь следует отметить, что все ошибки делятся на систематические и случайные [2]. Систематические ошибки могут быть полностью исключены или, в крайнем случае, уменьшены при калибровке снимков и последующей фотограмметрической обработке. Влияние случайных ошибок может быть уменьшено за счет уравнивания измерений. Особенность измерения координат точек по цифровым снимкам заключается в том, что цифровое изображение – дискретное. Это отражается как на измерении, так и на отображении и снимков, и модели.

Для создания структурной модели учета изменения точности на различных этапах цифровой фотограмметрической обработки снимков, начиная от внутреннего ориентирования снимков до получения окончательных результатов обработки, введено понятие «внутренняя метрическая точность изображения» [1, 3].

Под внутренней метрической точностью изображения будем понимать измерительные свойства снимков, характеризуемые остаточными ошибками, вызванными расхождениями между истинными координатами точек на снимках и координатами, вычисленными в соответствии с математической моделью, выбранной для описания снимков:

$$v(x, y) = \left\| F_1(x, y) - F_2(x, y) \right\|,$$

где $F_1(x, y)$ − функция, описывающая истинное положение точек на снимке; $F_2(x, y)$ − вычисленные значения координат, определяющих положения точек на снимке в соответствии с выбранной математической моделью.

Таким образом, внутренняя метрическая точность снимков зависит как от свойств самого изображения, так и от математической модели, используемой для его описания и последующей фотограмметрической обработки.

Если при фотограмметрической обработке снимков использовать математическую модель центральной проекции, то все отклонения от принятой модели будут вносить ошибки в результаты обработки. Однако реальный снимок отличается от центральной проекции вследствие ошибок снимка, например, дисторсии, клиновидности светофильтра, рефракции. В период применения аналоговых методов фотограмметрической обработки практически не было возможности исключить влияния этих ошибок (можно было их лишь частично уменьшить за счет масштабных преобразований), и следовательно, внутренняя метрическая точность изображений соответствовала величине отклонений в положении точек на снимках от центральной проекции. Аналитическая и цифровая фотограмметрия позволила создать более детальную математическую модель изображения, учитывающую систематические искажения, что обеспечило повышение точности измерений по снимкам и повысило внутреннюю метрическую точность.

Для описания случайных ошибок введено понятие «предельная внутренняя точность изображения», которая характеризуется случайными ошибками в положении то-

чек на снимках и которая не может быть исключена за счет выбора той или иной модели описания снимков [3]. Теоретически точность фотограмметрических построений должна приближаться к предельной внутренней точности снимков.

При фотограмметрической обработке аналитическим и цифровым методами выделяют три типа используемых математических моделей:

- модель измерений (координат точек на снимках, координат точек моделей) [2–4];
- модели решения обратных задач [3, 6–8] для определения параметров модели, описывающей соответствующий этап обработки;
- модели вычислений (решение прямых задач), выполняющих преобразования координат или цифровых изображений [3; 7–10].

Для обработки снимков – процесса выполнения измерений – в настоящее время нет адекватной математической модели вследствие сложности формализации процесса измерения, поэтому данный этап характеризуется лишь точностью измерений или ошибками, вносимыми во время измерений.

При определении параметров модели фотограмметрической обработки снимков необходимо решать системы линейных уравнений, причем в результате решения могут быть внесены существенные ошибки, предельные значения которых определяются величиной обусловленности системы. Заметим, «загрубление» точности фотограмметрических построений при решении обратных задач происходит на этапе геодезического ориентирования модели.

Существует возможность управлять процессом обеспечения результирующей точности фотограмметрической обработки (процессы внешнего ориентирования модели, трансформирование), это достигается путем изменения количества и расположения опорных точек. Однако точность результата не может быть выше внутренней метрической точности, определяемой соотношением (1).

Основная идея, предложенная в работе, состоит в том, что если зафиксировать результат фотограмметрической обработки снимков на определенном этапе, то в дальнейшем можно изменить точность окончательного результата, применяя более детальную модель обработки или же используя дополнительные данные. Например, если выполнить векторизацию контуров и измерения координат точек по модели в системе координат цифрового изображения, то затем, используя детальную математическую модель, можно повысить точность окончательных построений. Таким образом, это позволяет использовать собранную информацию для трехмерных моделей, составления карт различных масштабов и получения моделей различной точности, не выполняя заново измерения координат определяемых точек, контуров, ЦМР.

В результате исследований составлена структурная схема изменения точности на каждом из этапов фотограмметрической обработки, которая обосновывает необходимость хранения фотограмметрических данных на определенных этапах обработки. Показана принципиальная возможность выполнять сбор информации в соответствии с внутренней точностью цифрового изображения. Пространственная информации об объекте в заданной системе координат получается после преобразования исходных координат в заданную систему на основе параметров фотограмметрической обработки, что позволяет регулировать точность результатов фотограмметрической обработки.

**Список литературы**

1. Гук А.П. Развитие фотограмметрических технологий на основе имманентных свойств цифровых снимков // Геодезия и картография. 2007. № 12. С. 26−29.

2. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Изд-во «Недра», 1982. 224 с.

3. Евстратова Л.Г. Разработка технологии создания цифровых карт по аэрокосмическим снимкам на основе метода свободно ориентированных моделей: дис. … канд. техн. наук. Новосибирск: ССГА, 2009. 174 с.

4. Нехин С.С. Об оптимальном геометрическом решении изображении, обрабатываемых на цифровой фотограмметрической системе // Геодезия и картография. 1996. № 6. С. 34–39.

5. Форсант Дж., Мольер К. Численные решения систем линейных уравнений. М.: Изд-во «Мир», 1969.

6. Книжников Ю.Ф. Цифровая стереоскопическая модель местности: экспериментальные исследования. М.: Изд-во «Научный мир», 2004. 244 с.

7. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. М.: Изд-во «Картгеоцентр – Геодезиздат», 2003. 296 с.

8. Журкин И.Г., Нейман Ю.М. Методы вычисления в геодезии. М.: Изд-во «Недра», 1988. 304 с.

9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Изд-во «Мир», 1982. Т. 1–2.

10. Гук А.П. Цифровая обработка снимков. Новосибирск: Изд-во СГГА, 1987.

УДК 550.8.053

**Е.А. Ерофеев[1], В.Н. Катаев[2]**

[1] Пермский университет (ПГНИУ), Пермь, Россия

[2] Доктор геологических наук, Пермский университет (ПГНИУ), Пермь, Россия

e-mail: erofeev-ea@yandex.ru, kataev@psu.ru

# МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ОЦЕНОЧНОГО КАРСТОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Публикация посвящена методике карстологического дешифрирования карстовых районов юга – юга-востока Пермского края по крупномасштабным космофотоснимкам высокого разрешения. В работе изложены методические подходы к выявлению карстовых форм на дневной поверхности с учетом различных условий рельефа: залесенности, освещенности, степени застройки, а также времен года. Предложены подходы к определению диаметров карстовых форм в зависимости от характера их геометрии и степени закрытости форм растительностью. Составлены схемы поверхностной закарстованности.

*Ключевые слова: карстовые формы, диаметр, плотность, космофотоснимки.*

Оценочное карстологическое дешифрирование выполнено в рамках решения научно-практических задач, а именно: идентификации визуально различимых на дневной поверхности карстовых форм – воронок, в том числе провального генезиса, локальных оседаний и их скоплений, называемых в карстологической литературе карстовыми полями. Помимо фиксации местоположения деформаций поверхности проведена их геометризация и определены: площадь, периметр, диаметр, плотность форм. Дешифрирование сопровождалось стандартной процедурой сбора и систематизации фактического материала, формированием баз данных поверхностной закарстованности и подготовкой геологической информации к последующему анализу. В результате дешифрирования и аналитических мероприятий были установлены закономерности влияния различных геологических и гидрогеологических факторов на пространственное распределение, интенсивность образования и параметры зафиксированных карстовых форм.

**Территория исследований.** Исследования были проведены на площадях развития карстующихся пород, которые в схеме карстологического районирования Пермского края соответствуют в структурно-тектоническом отношении восточной окраине Восточно-Европейской платформы и прилегающих частей Предуральского прогиба, а именно: Нижнесылвинскому, Иренскому, Кишертскому районам развития гипсового и карбонатно-гипсового карста, Осинцевскому району закрытого соляного и гипсового карста и району карбонатного карста Уфимского вала [1]. На указанной площади карстуются преимущественно сульфатные (гипс, ангидрит) отложения иренского горизонта кунгурского яруса и в меньшей степени карбонатные (известняк, доломит) породы филипповского горизонта кунгурского и артинского ярусов приуральского отдела пермской системы. Геолого-структурные условия – платформенные, карст относиться к голому, задернованному, на значительных площадях к подэлювиальному, в долинах рек к подаллювиальному, и к закрытому – под некарстующимися породами соликамского горизонта уфимского яруса приуральского отдела пермской системы. Карстовые формы – самые разнообразные: воронки, провалы, поноры, пещеры, карстовые лога, локальные понижения и пр. Наиболее распространенными на земной поверхности являются воронки, в том числе и провального генезиса. Общая площадь дешифрирования составляет 9 558,2 км$^2$.

© Ерофеев Е.А., Катаев В.Н., 2019

**Методика исследований**. В техническом отношении основу исследований составили спутниковые фотоснимки (КФС) высокого разрешения, предоставляемыми сервисами Google Maps, Bing Maps, Geo Hab, ESRI, Yandex. Просмотр и обоснование возможности использования снимков из доступного пакета космофотоматериалов по их качеству и разрешению, а также анализ текущей закарстованности, проводимый с целью выявления полей поверхностных карстовых форм, осуществлялись в программе SAS Planet.

Просмотр, анализ и векторизация КФС, которые по своему содержанию, качеству и разрешению удовлетворяли требованиям, предъявляемым к решению поставленных задач, осуществлялись в программе ARC GIS. Анализируемые КФС использовались в качестве фоновой подложки. Настройки рабочего проекта ARC MAP следующие: система координат WGS 1984 UTM Zone 40N, проекция Mercatora / WGS84. Поскольку карстологическое дешифрирование было основано на крупномасштабных КФС, поэтому определяющим фактором в выборе кондиционного фотоматериала, позволяющего с заданной точностью вычислять диаметр карстовых форм, стала разрешающая способность снимков.

Параметры и масштабы КФС оценивались в программе SAS Planet. Исходя из разрешающей способности снимков, определялся рабочий масштаб (уровень) фотоматериалов и расчетная теоретическая ошибка поперечника карстовых форм. Параметры отображения КФС в SAS Planet и Next Gis в растровом отображении с расширением JPG показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры КФС в растровом формате с расширением .jpg

| Уровень КФС | Масштаб | Разрешение, м/пикс | Размер jpg, пикс | Размер jpg, дюймы | Мп jpg | DPI jpg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| z19 | 1:1000–1:1330 | 0,32 | 256×256 | (3,56×3,56$^{//}$) | 0,1 | 72 |
| z18 | 1:1870–1:2500 | 0,64 | 256×256 | (3,56×3,56$^{//}$) | 0,1 | 72 |
| z17 | 1:3750–1:5000 | 1,29 | 256×256 | (3,56×3,56$^{//}$) | 0,1 | 72 |

Оцифровка карстовых форм производилась в рабочем масштабе 1:500 – 1:1000–1:2000 (z18-z19), при увеличении масштаба более 1:500 границы форм расплывались и теряли свою четкость, в таком случае оценка поперечников карстовых форм становилась бессмысленной. Основными дешифровочными признаками на КФС являются сами карстовые явления (количество и характер распространения по площади), легко узнаваемые геометрические параметры (как правило, округлая, симметричная в плане форма), которые визуально хорошо определяются на крупномасштабных снимках (рис. 1).

Цветные КФС высокого разрешения Google, Bing Maps, Yandex и пр. представляют собой хорошо читаемые фотоматериалы, на которых четко и однозначно отражаются элементы рельефа, гидросети, растительности, здания и сооружения. Дешифровочные признаки, как правило, хорошо выражены, а форма и цвет объектов позволяют с достаточной степенью надежности идентифицировать карстовые формы (главным образом воронки) на открытой местности.

Вышеперечисленное определило выбор территории исследований. Южная и юго-восточная части Пермского края заняты уникальным ландшафтом – Кунгурской лесостепью, для которой характерно преобладание степных участков с чередованием небольших лесных островков. Благоприятная природно-геологическая обстановка – значительные интенсивно закарстованные пространства, свободные от лесов, – обеспечили оптимальные условия для проведения процедуры дешифрирования и получения кондиционного исходного материала.

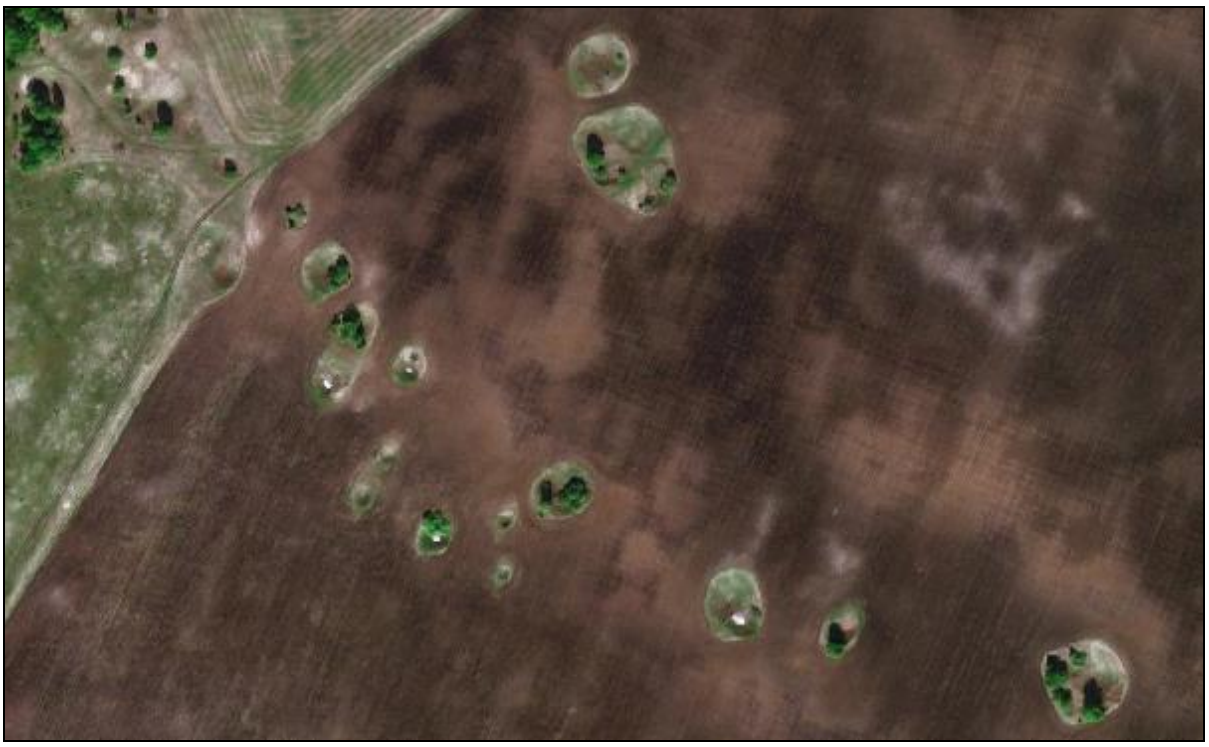


Рис. 1. Поля карстовых воронок в 2,3 км от с. Верх. Кунгур

Несомненным достоинством методического подхода является единый способ выявления карстовых форм в рельефе и оценка их параметров с заданной точностью (погрешностью) при фактической разрешающей способности КФС. Карстовые формы являются характерной особенностью рельефа Кунгурского, Ординского, Кишертского, Суксунского и других районов [1, 2]. Воронки легко узнаваемы и хорошо выделяются на снимках по своей форме в плане (круглая, овальная, вытянутая), а также по характеру расположения на местности большими или малыми группами (полями), как правило, хаотично и беспорядочно. Вместе с тем встречаются единичные воронки или их упорядоченные совокупности в виде цепочек вдоль разломов или групп линейных трещин. Со временем форма воронок в плане практически не меняется, но меняется форма их поперечного профиля за счет выполаживания бортов. Воронки зарастают густой травой, кустарником и деревьями. Растительность также является важным индикатором поверхностных карстовых форм при дешифрировании. Воронки являются точечными элементами водосбора талых и дождевых вод и тем самым создают условия для активного развития в их пределах травянистой и древесной растительности. На некоторых площадях встречаются воронки с разной степенью покрытости травой, кустарником, деревьями, что косвенно указывает на очередность провалообразования и позволяет оценивать размеры форм в зависимости от их относительного возраста.

Для существующих КФС (72 DPI) при максимально допустимых масштабах 1:500 – 1:1000 дешифрирования, когда 1 мм карты соответствует расстояние в 0,5–1,0 м, площадная визуализация форм размером до 1 м бессмысленна, поскольку ошибка в 1 мм может превышать фактический размер карстовой воронки. Геометризация форм от 1 м в масштабе 1:500 является более взвешенной. Так, 4 мм карты будет соответствовать воронка диаметром 2 м. По этой причине все формы размером менее 1 м не геометризованы [2].

Поперечные размеры карстовых форм, выявленных при дешифрировании, сравнивались на предмет их соответствия фактическим размерам в период проведения полевых заверочных работ в Кунгурском и Ординском районах. Проверка носила точечный характер, было замерено более 30 воронок с поперечными размерами от 5 до 40 м.

По результатам исследований установлено следующее: размеры форм (от 5 до 30 м), вычисленные дистанционно, в среднем оказались меньше фактических размеров (измеренных рулеткой) на 1,0–1,5 м. Диаметры форм размером 30 м и более на 1,0–2,0 м превышали фактический размер. В данном случае может иметь место как погрешность замеров рулеткой в условиях пересеченного рельефа, так и погрешность, вызванная при визуализации собственно указанных форм.

При дешифрировании и последующей векторизации карстовые формы делились на две группы (SHP-файлы): площадные и точечные. К первой отнесены те формы, для которых достаточно легко устанавливался диаметр. За «условный расчетный диаметр» карстовой формы принимался бóльший или внешний, визуально различимый диаметр (круг) воронки; при этом фактический материал, полученный при заверочных обследованиях карстовых полей показал, что в большинстве случаев для заросшей кустарником или молодым лесом воронки достаточно точно можно определить диаметр, поскольку кромка растительности обычно ограничена по контуру формы либо несколько превышает его. Для Кунгурского и Ординского районов натурные обследования подтвердили это предположение. На некоторых участках прослеживались динамика зарастания форм – одновременно встречались воронки (одинаковые по форме в плане и размеру) полностью открытые, частично заросшие и полностью закрытые растительностью, что позволило для заросших форм обосновать величину диаметра по аналогии с открытыми воронками (рис. 2). К этой же группе была отнесена и та часть форм, происхождение которых было под вопросом ввиду сильной заселённости, планировки рельефа, расположения в лесном массиве, в тени другого объекта и т.п.

Рис. 2. Методический подход к геометризации карстовых форм:
участок в 1,5 км от пос. Ключи

Массовые скопления воронок в местах выхода карстующихся пород на дневную поверхность детально анализировались и визуализировались точечными объектами, на карте плотности такие участки выделяются максимальной плотностью форм, которая достигает 600 шт/км$^2$ .

**Результаты карстологического дешифрирования.** В результате проведенных исследований получен объемный фактический материал, характеризующий поверхностную закарстованность южной и юго-восточной части Пермского края. Заверочные обследования подтвердили объективность проведенных работ [2, 3]. Статистические параметры карстологического дешифрирования представлены в табл. 2. Эмпирическое распределение диаметров полигональных карстовых форм соответствует логнормальному закону, средний диаметр достигает 18,5 м. Характер развития карстовых форм на дневной поверхности проиллюстрирован на карте плотности (рис. 3).

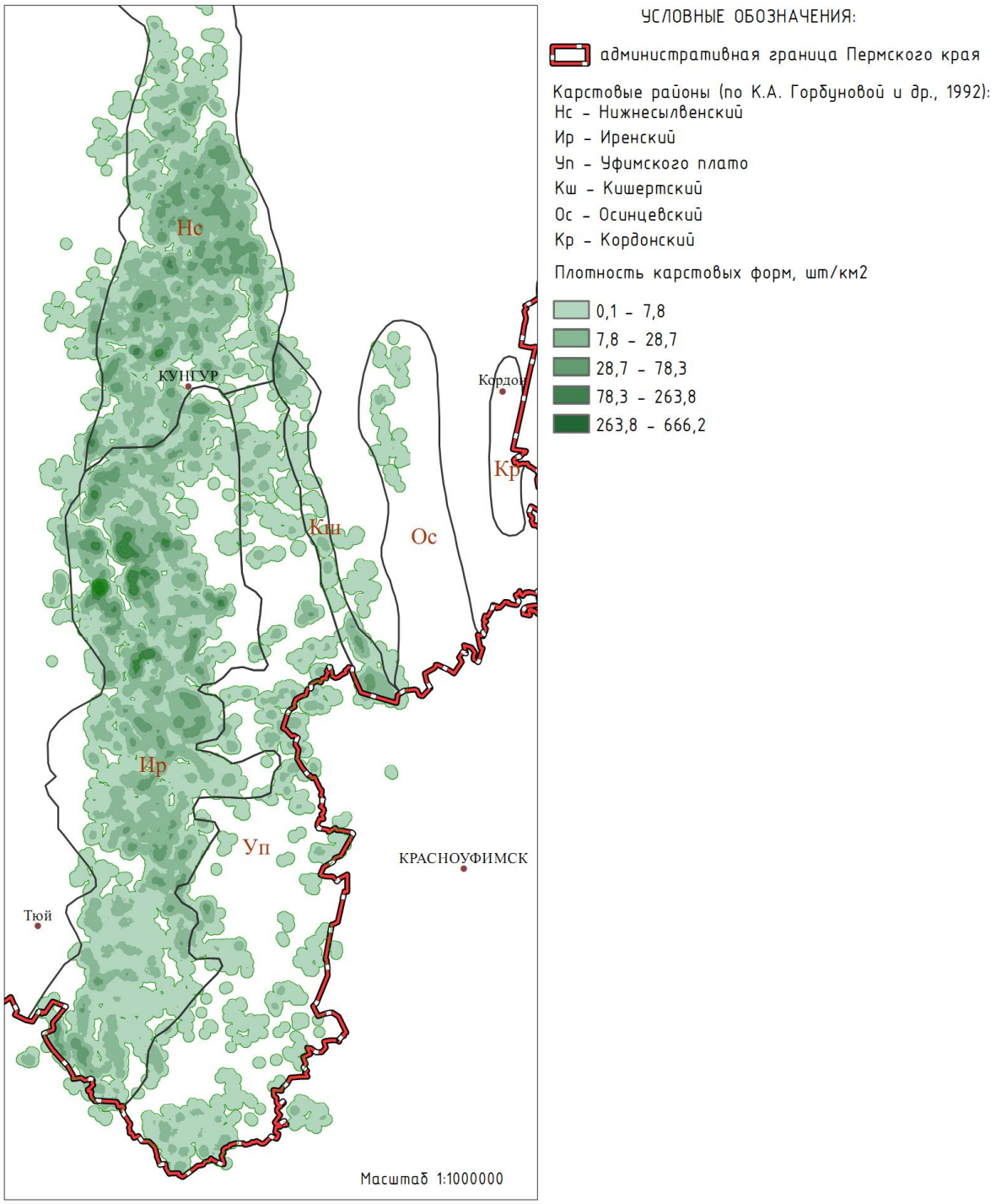



Рис. 3. Карта плотности поверхностных карстовых форм

Таблица 2

Общие статистические показатели дешифрирования территории

| Карстовый район | Число форм, шт. | Точечные объекты, шт. | Полигональные объекты, шт. | Площадь района, км$^2$ | Площадь форм, км$^2$ | Закарстованность, % | Условная плотность, шт/км$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кишертский | 1 954 | 648 | 1 306 | 306,33 | 0,81 | 0,26 | 6,38 |
| Иренский | 39 016 | 21 973 | 17 043 | 3 380,71 | 6,38 | 0,19 | 11,54 |
| Нижнесылвинский | 22 704 | 7 830 | 14 874 | 2 132,7 | 5,37 | 0,25 | 10,65 |
| Уфимского плато | 4 484 | 3 232 | 1 252 | 2 703,63 | 0,27 | 0,01 | 1,66 |
| Осинцевский | 297 | 150 | 147 | 861,04 | 0,058 | 0,01 | 0,34 |
| Всего | 68 455 | 33 833 | 34 622 | | | | |

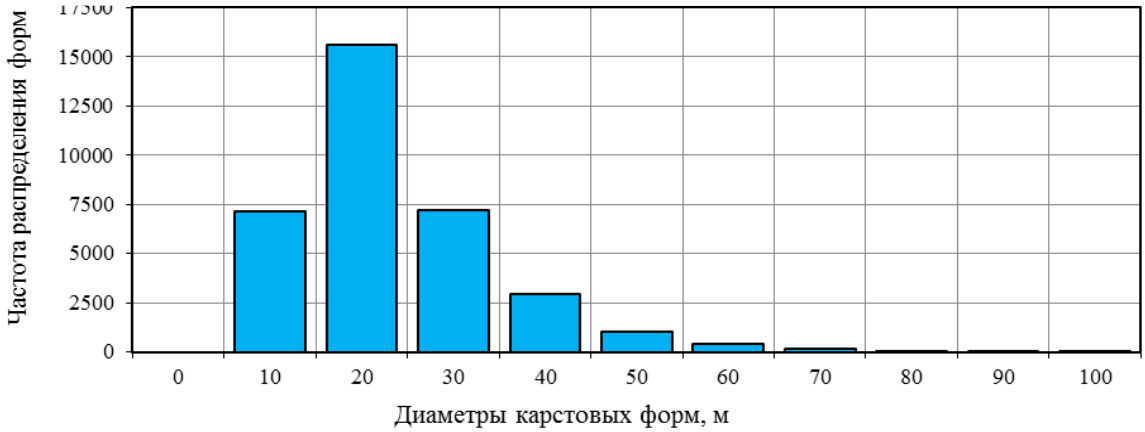



Рис. 3. График распределения диаметров выявленных карстовых форм

**Список литературы**


1. Карст и пещеры Пермской области / К.А. Горбунова, В.Н. Андрейчук, В.П. Костарев, Н.Г. Максимович. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с.
2. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Идентификация поверхностных карстовых форм по материалам спутниковых изображений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. ст. 37-й Всерос. науч.-практ. конф. 23–24 мая 2017 г., Пермь / под ред. Р.Г. Ибламинова. Пермь, 2017. С. 193–197.
3. Erofeev E.A., Kataev V.N. Estimative karst interpretation of satellite images of the south – south-eastern districts of Perm Region // International Symposium KARST 2018 – Expect the Unexpected. Trebinje. 2018. P. 143–150.

УДК 630*161, 004.514, 528.88

**С.В Иванов[1], О.В. Кушнырь[1], А.В. Комаров[1], А.С. Рыбкин[1], В.Б. Серебряков[1], П.А. Тищенко[1] , К.В. Вахрушев[2], В.М. Сидоренков[3]**

[1] АО «Российские космические системы», Москва, Россия
[2] Ассоциация «Союз лесопользователей Удмуртской Республики», Ижевск, Удмуртская Республика
[3] ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, город Пушкино, Россия

# ВЕБ-ГИС И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИНТЕРЕСАХ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрены особенности разработки и использования отраслевой геоинформационной системы для решения задач лесного хозяйства и охраны окружающей среды в виде software as a service (SaaS) решения. Описаны профили целевых групп. Выделены подходящие для тематических задач отечественные и зарубежные космические средства дистанционного зондирования Земли. Описан графический интерфейс (UI) приложения «Лесовод».

*Ключевые слова: лесное хозяйство, дистанционное зондирование Земли, веб-технологии, ГИС, использование лесов, Канопус-В, Ресурс-П, Sentinel-2.*

**Введение.** Регулирование деятельности в области использования лесов на территории современной России берет начало с нового времени [5]. С развитием производственных отношений и ростом научно-технического прогресса регулирование усложнялось, модернизировались и появлялись новые технические средства сбора информации и контроля. В настоящее время участники деятельности в области лесного хозяйства (уполномоченные органы исполнительной власти, лесопользователи, общественные организации и физические лица) могут применять самые эффективные инструменты, позволяющие улучшить и автоматизировать контроль за исполнением лесного и природоохранного законодательства: систему глобального позиционирования (GPS), системы дистанционного зондирования Земли, геоинформационные (ГИС) и web-технологии [4].

**Предпосылки использования ГИС и данных дистанционного зондирования.** Использование данных ДЗЗ для задач лесного хозяйства является важным фактором, обеспечивающим актуальность и оперативность получения необходимой информации. Предпосылками внедрения технологий ДЗЗ в лесную отрасль можно назвать:

- разработка Лесного плана субъекта на 10 лет,
- использование устаревших материалов лесоустройства,
- отсутствие актуальных данных о доступности территории и экономических рынках сбыта древесины,
- отсутствие оперативной и объективной оценки санитарного состояния лесов [7].

Осознание необходимости использования данных ДЗЗ привело к внесению изменений в Лесной кодекс Российской Федерации, что позволило регламентировать на законодательном уровне требования к данным ДЗЗ для мониторинга использования и восстановления лесов [1–3]. Выполнение правовых требований в области планирования и контроля лесохозяйственной деятельности представляет собой текстовый, табличный и картографический материал чрезвычайного объема [8]. Следовательно, разработка информационных систем, позволяющих упростить, верифицировать и автома-

© Иванов С.В, Кушнырь О.В., Комаров А.В., Рыбкин А.С., Серебряков В.Б., Тищенко П.А., Вахрушев К.В., Сидоренков В.М., 2019

тизировать (т.е. повысить эффективность) процесс подготовки и контроля таких материалов, является важной инженерной и научной задачей. При этом должны учитываться профили всех целевых групп, участвующих в лесохозяйственной деятельности. Для решения данных задач коллективом в составе сотрудников НЦ ОМЗ (АО «Российский космические системы»), ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, ассоциации «Союз лесопользователей Удмуртской Республики» было разработано SaaS-приложение «Лесовод».

**Архитектура приложения «Лесовод». Профили целевых групп. Графический интерфейс веб-клиента.** «Лесовод» реализован в виде одностраничного web-приложения с возможностью установки desktop-модуля (разработан на основе открытого кода), позволяющего временно вести работу в режиме офлайн. Для разработки выделены следующие потенциальные профили целевых групп: лесопользователи, ассоциации лесопользователей, органы исполнительной власти РФ, администраторы. Для каждой из групп разработан графический интерфейс (UI). В приложении используется микросервисная архитектура (рис. 1).

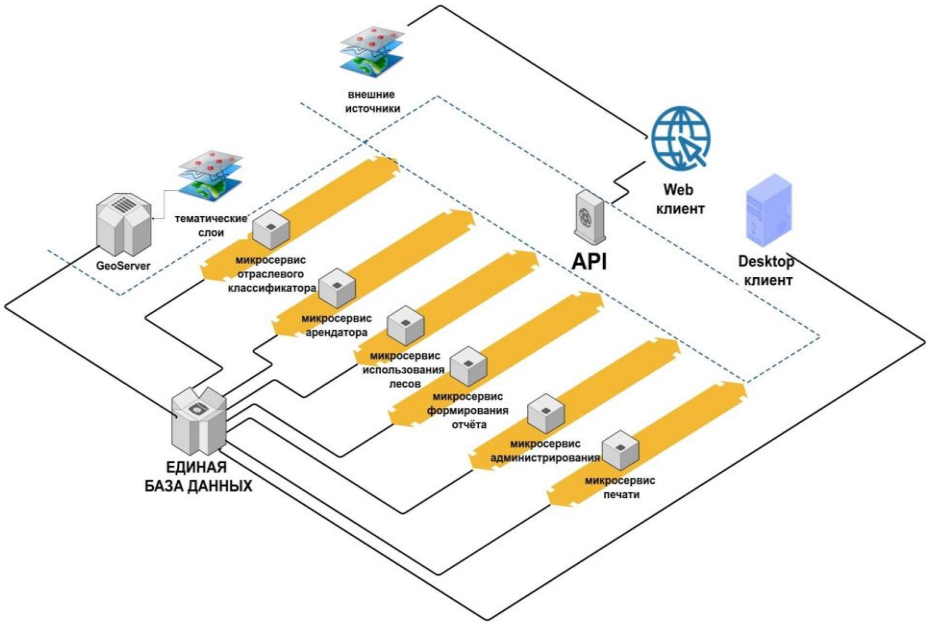



Рис. 1. Архитектура приложения «Лесовод»

UI основных целевых групп (лесопользователи, ассоциации лесопользователей) представлен единым отображением карты с расположенными на данном элементе кнопками вызова меню пользователя, меню управления и кнопками регулирования масштаба. Меню пользователя позволяет производить регистрацию, аутентификацию, выход из учетной записи, просматривать информацию о пользователе, сопровождающую документацию. Меню управления представлено в виде tab-панели и позволяет производить работу со слоями карты, вводить информацию о договорах на использование лесов, о планируемом и фактическом использовании лесосек (рис. 2), добавлять границы лесосеки (с помощью инструмента «freehand», ввода координат или румбов, добавления векторного файла), а также формировать отчёт об использовании лесов (форма ИЛ-1) и графическое приложение к отчёту в форматах .xlsx, .pdf, .csv и .jpeg соответственно.

В настоящее время веб-клиент интегрирован с несколькими источниками открытых данных ДЗЗ: sentinel.hub, usgs.com, earthviewer, planet.com (ежемесячная мозаика), eos.com. Предоставлена возможность интеграции подложек Yandex.maps, Bing, Google, OSM, ESRI и др. Планируется создание блока интеграции с банком базовых продуктов межведомственного использования госкорпорации «Роскосмос».

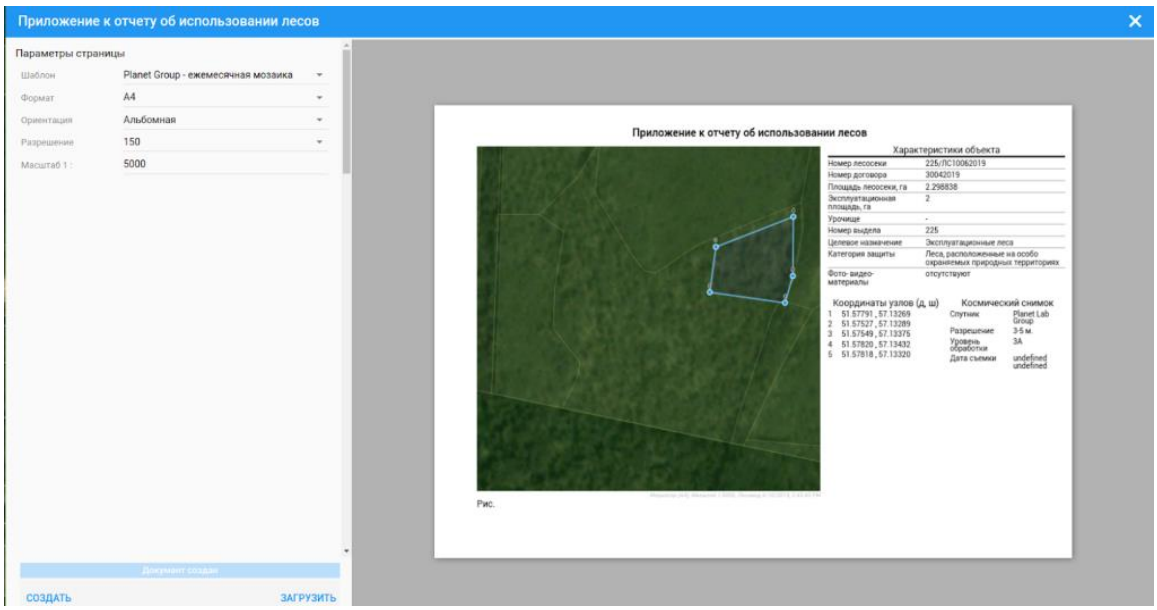



Рис. 2. UI веб-клиента. Панель формирования приложения к отчёту ИЛ-1

**Релевантные данные дистанционного зондирования. Возможности применения данных для планирования и контроля в области использования лесов.** В соответствии с требованиями, установленным Приказом Минприроды России [3], лесопользователи обязаны использовать для подготовки отчетов об использовании лесов ДДЗ с пространственным разрешением не хуже 15 м. В российской группировке спутников ДЗЗ указанные требования могут обеспечить данные, получаемые с аппаратов «Ресурс-П» (0,7 м в панхроматическом режиме, 3 м в мультиспектральном) и «Канопус-В» (2 м в панхроматическом режиме, 12 м в мультиспектральном).

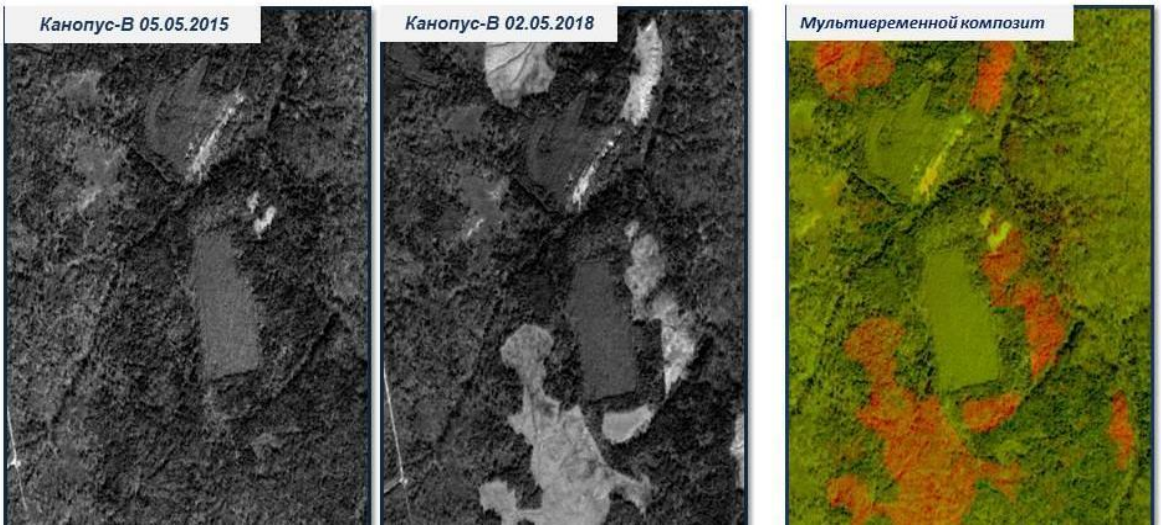



Рис. 3. Выявление изменений лесного фонда

Применение технологий ДЗЗ для мониторинга лесопользования является одной из базовых задач. Комплексное использование отечественных, зарубежных свободно распространяемых данных ДЗЗ, данных полевых обследований и современных технологий обработки и предоставления информации позволяет решать значительный ряд задач отрасли: выявление изменений лесного фонда (рис. 3), оценка и моделирование транспортной доступности, определение основных таксационных характеристик лесных территорий (рис. 4), детектирование тепловых аномалий и др.

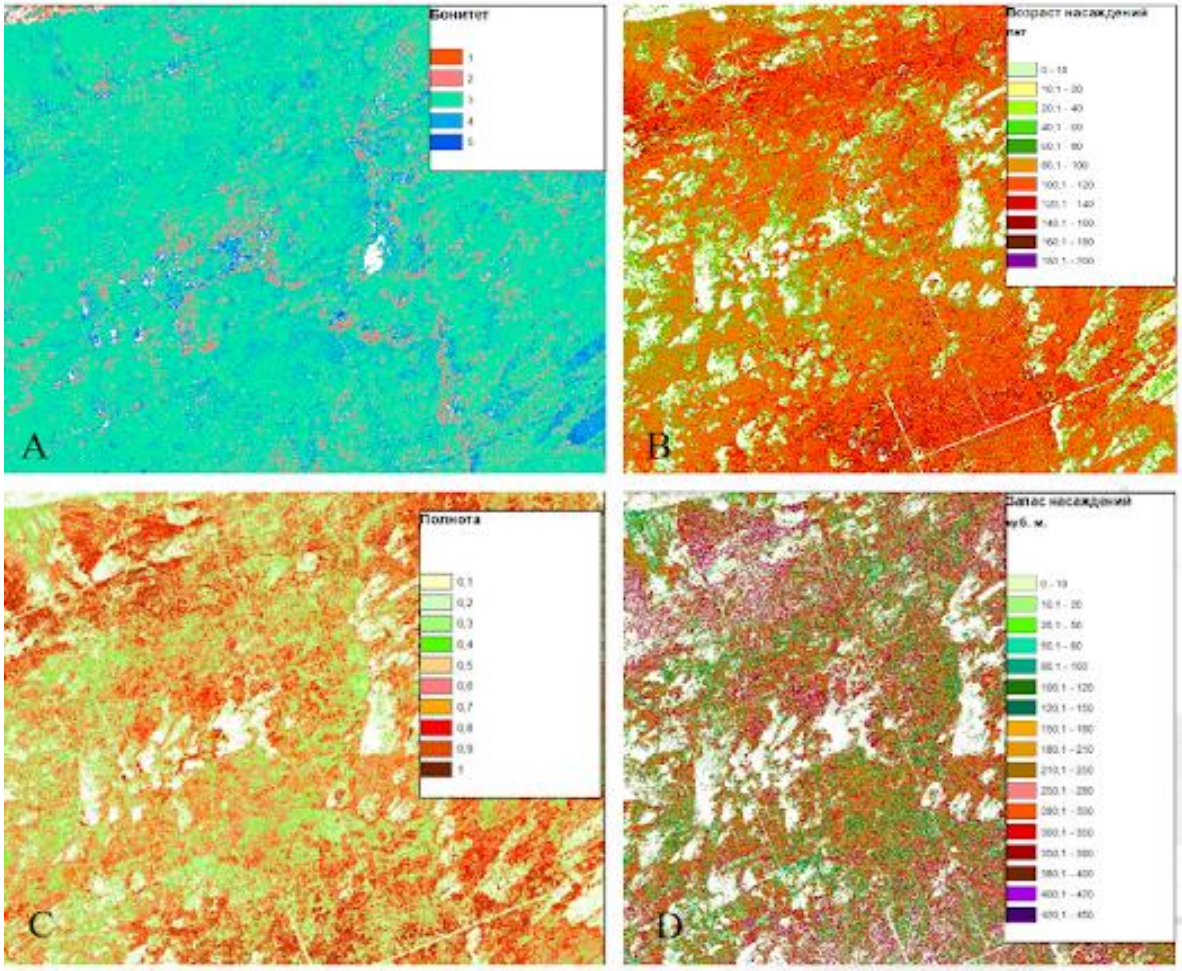



Рис. 4. Картирование таксационных характеристик:
A – бонитет; B – возраст; C – полнота; D – запас

В перспективе расширение функционала приложения «Лесовод» обеспечит различные категории пользователей лесного хозяйства возможностью получения информации не только для планирования и контроля лесопользования, но и иной актуальной информацией о состоянии лесов на основе данных ДЗЗ для широкого спектра отраслевых задач.

**Список литературы**

1. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ.

2. О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 23.06.2016 № 218-ФЗ.

3. Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии от 21.08.2017 № 451.

4. Hamzah K.A. GIS and GPS as a tool to support precision forestry practices in Malaysia // 2nd Asian Conference on Remote Sensing, 2001.

5. Черных В.В. Лесное законодательство в период правления Петра I // Сиб. юрид. вестн. 2012.

6. Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет: Приказ министерства природных ресурсов и экологии от 21.08.2017 № 451.

7. Кушнырь О.В. Возможности использования российских данных ДЗЗ и современных web технологий для повышения эффективности управления лесным хозяйством // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии. 2019.

8. Как автоматизация лесного хозяйства повлияет на незаконную вырубку леса. 2018. URL: http://www.forumeco.ru,

УДК 528.8.04, 528.88

**А.В. Картушинский**

Сибирский федеральный университет, ФИЦ Институт биофизики СО РАН,
Красноярск, Россия
e-mail: kartalvas@rambler.ru, kartushka@mail.ru

# ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Обсуждается проблема оценки динамических процессов в водных экосистемах, формирующих различия пространственно-временных масштабов существования поверхностных неоднородностей гидрофизических и гидробиологических полей. Рассмотрены возможности обработки спутниковых данных для расчета градиентных характеристик отражающих границы зон в водных экосистемах с различными термодинамическими и физико-химическими свойствами. Отмечено соответствие между зонами с высокой или низкой биологической продуктивностью вод и гидрофизическими процессами синоптического масштаба и выше, что подтверждается спутниковыми данными. Показано, что процессы формирования зон с высокой динамической активностью могут оцениваться с помощью параметризации сеточного масштаба на основе теории размерностей и применении численного моделирования с использованием спутниковых данных.

*Ключевые слова: поверхностные неоднородности, градиенты температуры, концентрация хлорофилла, фронтальная зона, численные модели.*

**Введение.** При изучении функционирования водных экосистем необходимо определять действие факторов окружающей среды и механизмы формирования гидробиологической структуры и динамических процессов, связанных с гидрологическими условиями в воде. Важную роль здесь играет вопрос о взаимодействии физических процессов с биологическими и степень проявления такого взаимодействия, которое можно оценивать по спутниковым данным. Расчет градиентных характеристик водных объектов лежит в плоскости необходимости получения данных в видимом и инфракрасном диапазонах, что отражает динамику взвеси и поверхностную температуру вод. Наиболее устойчивы градиентные зоны в тех районах водных объектов, где они связаны с устойчивыми системами течений, подъема вод или с определенными формами рельефа дна. Такие зоны определяются как фронтальные. Фронтальная зона в океане – это широкая, переходная, относительно стационарная во времени и пространстве зона между водными массами, имеющими различные характеристики физических и химических свойств, в которой наблюдаются быстрые изменения гидрологических величин [1, 2]. Во внутренних водоемах и озерах пространственные масштабы фронтальных зон ограничены размерами водных объектов [3]. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах, приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия функционирования системы в целом. В механизме эволюции экологических систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов [3].

**Материалы и методы.** В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные аппаратными средствами с высоким и низким разрешением AVHRR MCSST, CZCS, SeaWIFS, MIRAS AQUARIUS, MODIS, MSS

© Картушинский А.В., 2019

за различные периоды времени со спутников NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT. Для исследования изменчивости градиентного поля солености океана использовались данные климатического спутника Aquarius/SAC-D.

Для расчетов градиентных показателей по спутниковым данным водных систем и проведения статистического анализа применяются разработанные программные средства. Исходными выступают спутниковые данные по температуре поверхности и концентрации хлорофилла, которые сформированы в соответствующую базу данных.

Используются одномерная вертикальная и двумерная плоская численные модели, на которых проводится математическое моделирование для оценки факторов воздействия на формирование температурного профиля, распределение и функционирование фитопланктона. Параметрические соотношения используются для оценки пространственных и временных границ динамических процессов, что позволяет выявлять динамические особенности влияния факторов внешней среды и проводить анализ связи между изменяющейся средой обитания и пространственно-временными изменениями структуры биотических компонент водной экосистемы.

**Результаты и обсуждение.** Размеры и время существования пространственных неоднородностей в океане, связанных с внешней средой, могут определяться соответствующей динамикой отдельных процессов и явлений. Для внутренних водных систем и объектов ограничением масштабов неоднородностей может стать пространственная граница системы, которой является береговая черта или размер водоема.

Для оценки пространственного масштаба изменчивости гидробиологических неоднородностей под действием гидрофизических процессов, на основании численных экспериментов и данных натурных измерений, используя теорию подобия, применяются аналитические зависимости [4]. Здесь масштаб неоднородности фитопланктона ($Lp$) связан с характерным линейным масштабом скорости движения ($V$) и коэффициентом турбулентного обмена количеством движения ($Km$) за время $t$:

$$Lp = \frac{V * t * Pmax}{\mu} \quad \text{и} \quad Lp = \frac{\sqrt{Km} * t * Pmax^{3/2}}{\mu}$$

где $P_{max}$ – максимальная скорость роста для заданной группы фитопланктона; μ – скорость отмирания фитопланктона.

Температурный фактор и плотностная стратификация воды формируют уровень перемешивания по вертикали совместно с динамическим воздействием ветра на водную поверхность. Периодичность воздействия и интенсивность ветрового касательного напряжения в течение суток вызывает определенную реакцию слоев воды и изменчивость турбулентного перемешивания, что приводит к расслоению водных масс и формированию плотностных градиентов, препятствующих однородному распределению клеток фитопланктона по всей толще воды. На поверхности возникает пространственная неоднородность распределения тепла и массы (концентрации). Динамический фактор, связанный с вертикальными движениями вод, регулирует поступление биогенных элементов из нижних слоев и изменяет уровень продуктивности (концентрации) фитопланктона, что также приводит к формированию пространственной неоднородности.

Исходные спутниковые средненедельные данные по поверхностной температуре и хлорофиллу мы использовали для того, чтобы исследовать многолетние циклы взаимодействия гидрофизических и гидробиологических показателей в различных зонах океана. После усреднения показателей на различных интервалах времени мы получили различные статистические оценки для измеренных параметров. Пример среднемесячных изменений градиентов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла для субарктической фронтальной зоны Северной Атлантики (зона А, квадрат 62° N – 20 ° W; 52° N – 10° W) за период с 1997 по 2011 г. представлен на рисунке.

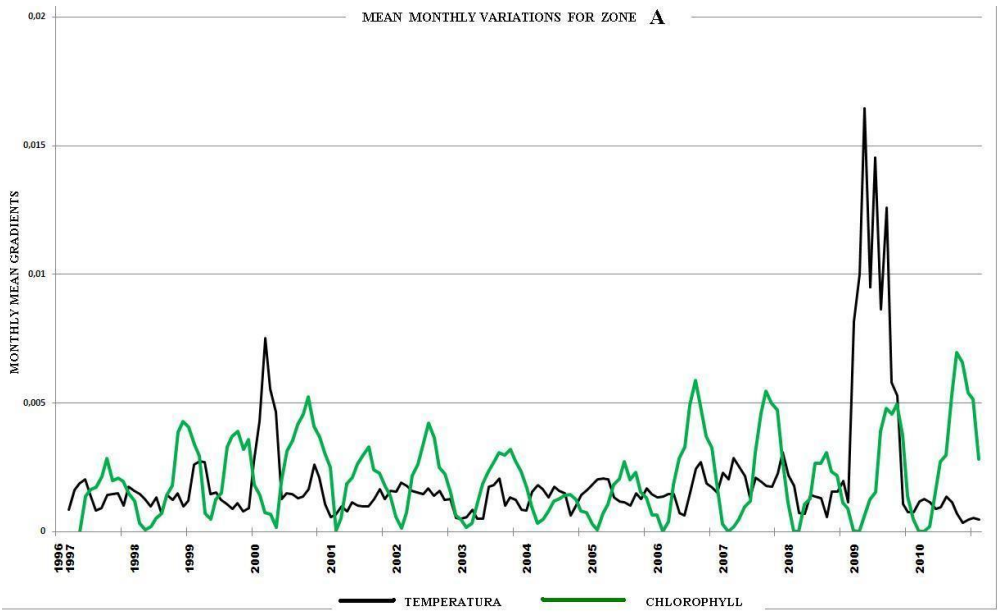



Рисунок. Изменение градиентов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла для фронтальной зоны А (субарктическая фронтальная зона) за период 1997–2011 гг.

**Выводы.** Циклы изменчивости величины градиентов в океанских фронтальных зонах могут быть использованы для определения импульсного воздействия водных масс, воздушного теплового транспорта и потоков над океаном и их взаимодействия с атмосферой. Гидробиологические поверхностные неоднородности концентрации хлорофилла значительным образом связаны с формированием температурных полей, а многолетняя изменчивость между этими параметрами в динамически активных зонах имеет отрицательную корреляционную связь.

Расчеты градиентных характеристик поверхности природных объектов на основе спутниковых данных позволяют выявлять зоны с различной динамической активностью [5].

Анализ распределения величины градиентных полей позволяет выявлять гетерогенные и гомогенные зоны водных систем, а при соответствующем периоде усреднения получать степень динамичности таких зон. Это, в свою очередь, позволяет оценивать динамику поверхностных неоднородностей и изучать процессы формирования структурной организации водных экосистем, что может применяться при разработке численных прогностических моделей функционирования водных экосистем.

**Список литературы**

1. Казьмин А.С. Изменчивость крупномасштабных океанических фронтальных зон: анализ глобальной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 213–218.

2. Kartushinsky A.V., Time-space structure and variability of surface temperature frontal zones in the Ocean (Based on AVHRR satellite data) // Advances in Space Research. 2000. № 25 (5). P. 1107–1110.

3. Картушинский А.В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т7, №1. С. 112-124.

4. Shevyrnogov A.P., Kartushinsky A.V, Vysotskaya G.S. Application of satellite data for investigation of dynamic processes in inland water bodies: Shira Lake (Khakasia, Siberia), a case study // Aquatic Ecology. 2002. Vol. 36. № 2. P. 153–163.

5. Картушинский А.В., Кукоба Н.А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // Вестн. СибГАУ. 2015. № 3 (16). С. 587–596.

УДК 004.9

**А.В. Качаев, Е.А. Дроздовский**

Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск
e-mail: avkachaev@gmail.com, aow2master@yandex.ru

# РАЗРАБОТКА WEB-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ РОССИИ

Дендроклиматические данные востребованы при построении биологических моделей. Манипуляционный аспект работы с дендроклиматическими данными представляется актуальной задачей, требующей решения. Нами предлагается технологическая программная цепочка для решения поставленной задачи с использованием пакетов прикладных программ, находящихся в открытом доступе. В настоящее время нами разработан web-интерфейс свободного доступа к дендроклиматическим данным России с использованием картографического материала. Область применения разработанного сайта – в дендроэкологических исследованиях и учебных целях.

*Ключевые слова: дендрохронология, климатология, базы данных, Json формат, MongoDB, web-интерфейс.*

Годичный прирост деревьев является одним из биологических индикаторов биотических и абиотических процессов, происходящих в экологических системах [1]. В последние годы климат на земле заметно меняется и в различных географических районах вызывает негативные последствия. Таким образом, информация о приросте деревьев в различных географических местах приобретает актуальное значение для мирового научного сообщества. Для удобства научных исследований информация о параметрах экологических систем хранится в банках данных.

Международный банк данных древесных колец (ITRDB) содержит более 4 000 мест сбора хронологий с шести континентов [2]. Хронологии в ITRDB находятся в открытом доступе. Формируя запрос в интерактивном режиме в банке данных, исследователи получают необходимые данные в текстовом виде в так называемым «Тусоновском формате». Запрос содержит такие параметры, как географические координаты, код древесной породы, тип метрического измерения древесного кольца и другие текстовые параметры.

На сайте палеоклиматической карты данных [3] доступ к хронологиям возможен через картографический интерфейс для получения данных в текстовом виде. Заметим, что исходные хронологии в банках [2, 3] имеют один источник. В работе [4] проведен анализ исходных хронологий и предложены рекомендации по дальнейшему формированию ITRDB банка данных [2]. Результаты тестирования ITRDB банка данных [2] показало, что в разных географических районах были обнаружены позиционные ошибки в исходных данных до 57 %, которые авторы [4] исправили (для примера в азиатском регионе отмечено 15 % ошибок). В работе [5] для российских дендрохронологических данных мы исправили позиционные ошибки и конвертировали данные в JSON формат [6].

Отметим известные нам два Российских дендрохронологических банка данных [7, 8]. На основании анализа рассмотренных банков данных нами поставлена следующая задача: разработка web-дендроклиматического интерфейса с выбором хронологий и климатических данных, используя карту России, и обработкой результатов выборки дендрохронологическим пакетом программ dplR [9] в среде R [10].

© Качаев А.В., Дроздовский Е.А., 2019

При разработке структуры дендроклиматического банка данных мы использовали NOSQL подход [11] и наполнили данными документоориентированную систему управления базами данных MongoDB [12]. Для решения поставленной задачи мы используем программные разработки, находящиеся в открытом доступе. Технологическая программная цепочка решения поставленной задачи состоит из следующего программного обеспечения: Bootstrap [13], API Яндекс.Карт [14], Shiny [15], dplR [9], MongoDB [12].

Фреймворк Bootstrap [13] дает следующие преимущества: быстрое создание качественных адаптивных сайтов на основе готовых компонентов, современный дизайн, выполненный в едином стиле, он является кроссбраузерным и кроссплатформенным, открытым и бесплатным.

Для создания географической карты с координатной привязкой расположения на ней мест сбора хронологий и мест сбора климатических измерений нами выбран API Яндекс.Карт [14]. API Яндекс.Карт предъявляет минимальные требования к навыкам программирования, располагая такими средствами как API-констуктор карт, размещая нужные географические объекты на карте и предоставляя набор функции работы с картой. Пакет dplR [8] (Dendrochronology Program Library in R [10]) – библиотека программ обработки дендрохронологических данных. Пакет Shiny предназначен для создания интерактивных веб-приложений на основе R и находится в свободном доступе.

В настоящее время на карте отмечены дендрохронологии (около 300) и климатические станции (более 1 100) с визуализацией информации о географических объектах по URL-адресу http://augur.sfu-kras.ru/.

*Мы выражаем благодарность Департаменту информационных технологий СФУ за выделение виртуальной машины в операционной среде CENTOS 7 на сервере СФУ для реализации проекта.*

**Список литературы**

1. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособие / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов [et al.]. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

2. The international tree-ring data bank. URL: https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/paleo?layers=0000000000000001 (дата обращения 01.07.2019).

3. Paleoclimatalogy data map. URL: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring (дата обращения 01.07.2019).

4. The international tree ‑ ring data bank (ITRDB) revisited: Data availability and global ecological representativity / S. Zhao, N. Pederson, L. D'Orangeville [et al.] // J Biogeogr. 2018;00:1–14. URL: https://doi.org/10.1111/jbi.13488.

5. Качаев А.В. NOSQL подход для разработки дендроклиматического банка данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. 2016. С. 89–91.

6. Введение в JSON. URL: https://www.json.org/json-ru.html (дата обращения: 01.07.2019).

7. Российские хронологии древесных колец. URL: https://lib.ipae.uran.ru/dchrono/vved.html (дата обращения: 01.07.2019).

8. Шишов В.В., Тычков И.И., Попкова М.И. Методы анализа дендроклиматических данных и их применение для территории Сибири: учеб. пособие. Красноярск, 2015 210 с.

9. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. № 26. P. 115–124.

10. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R / пер. с англ. П. Волковой. М.: ДМК Пресс, 2014. 588 с.

11. Качаев А.В. Модель описания структуры дендроклиматических данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV междунар. науч. конф.. 2017. С. 120–122.

12. Кайл Бэнкер. MongoDB в действии / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2012. 394 с.

13. Bootstrap. URL: https://bootstrap-4.ru (дата обращения: 01.07.2019).

14. Яндекс карты. URL: http://maps.yandex.ru. (дата обращения: 01.07.2019).

15. Beeley C. Web application development with R using shiny. Packt Publishing, 2013. 110 p.

УДК 528.8, 556.5

**М.А. Корец[1, 2], О.А. Антамошкина[1, 2], А.С. Прокушкин[1, 2]**

[1] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: mik@ksc.krasn.ru, sloa@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru

# МЕТОД ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ И РЕГУЛЯРНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОСТАХ РОСГИДРОМЕТА НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ЕНИСЕЙ

Разработан метод, позволяющий оценить пространственно-временную динамику водного зеркала крупных рек. Подход основан на совместном использовании кластеризованных данных спутниковой съемки Landsat и датированных измерений относительного уровня воды на постах Росгидромета. На примере руслового участка р. Енисей (56–68° с.ш.) сформирован набор связанных с гидропостами уравнений для расчета площади водного зеркала. Продемонстрирована ежедневная расчётная динамика площади водной поверхности Енисея в 2015–2016 гг., используемая в задачах описания и моделирования гидрохимических процессов крупных рек.

*Ключевые слова: данные дистанционного зондирования (ДДЗ), Landsat, площадь водного зеркала реки, посты Росгидромета, Енисей.*

Площадь водной поверхности рек (водное зеркало) является одним из необходимых параметров в задачах описания и моделирования гидрохимических процессов, в частности газообмена с атмосферой в речных экосистемах [1]. Необходимость оперативно и достаточно точно оценить пространственно-временную динамику водного зеркала крупных протяженных рек, таких как Енисей, обусловливает использование широкодоступных данных дистанционного спутникового зондирования среднего разрешения (Landsat, Sentinel и т.п., 10–30 м) [2, 3].

В нашей работе ставились задачи: 1) сбор данных дистанционного зондирования (спутников серии Landsat) для руслового участка бассейна р. Енисей (56–68° с.ш.) за весь срок их работы (1972 – н/в); 2) отработка алгоритмов определения водной поверхности с привязкой к датам; 3) расчет датированных площадей водной поверхности заданного сегмента реки Енисей, используя данные постов Среднесибирского УГМС об относительном уровне воды.

Растровые изображения сканирующих спектрометров спутников серии Landsat для руслового участка бассейна р. Енисей получены с открытого портала EarthExplorer (http://earthexplorer.usgs.gov) для периода 1972–2018 гг. В общей сложности были отобраны 1 416 сцен. Все снимки прошли стандартную предварительную обработку, включающую процедуры радиометрической и геометрической коррекции систематических искажений сенсора, ортотрансформировацию и привязку (с точностью менее 10 м) в картографической проекции Universal Transverse Mercator (UTM) для зоны 46.

Для анализа выбирались по возможности безоблачные сцены с поверхностью реки свободной ото льда (период открытой воды: с апреля по ноябрь). С целью снизить влияние атмосферных помех при сохранении достаточной контрастности береговой линии и водных объектов нами были использованы данные ближнего и среднего инфракрасных диапазонов съемки: NIR (0,85–0,88 мкм), SWIR 1 (1,57–1,65 мкм), SWIR 2 (2,11–2,29 мкм). Спектральные каналы указанных диапазонов объединялись в компо-

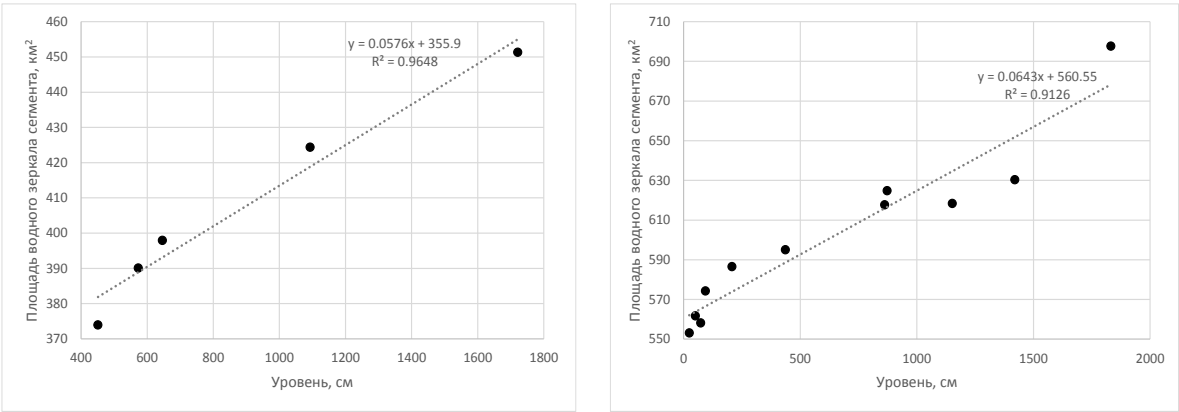
© Корец М.А., Антамошкина О.А., Прокушкин А.С., 2019

зитные трехканальные изображения для последующего автоматизированного выделения водной поверхности, визуального анализа и тематической обработки.

Значительная протяженность русла Енисея (более 1 800 км от Красноярской ГЭС до Усть-Хантайки), погодные условия, особенности орбиты и периодичности спутниковой съемки Landsat практически не позволяют получить полное объединенное покрытие русла съемкой за фиксированную дату. Поэтому было принято решение разбить русло Енисея на условные сегменты, привязанные к постам Среднесибирского УГМС. Гидропосты относительно равномерно распределены по длине р. Енисей на протяжении около 1 800 км (средний шаг – чуть более 100 км): от Красноярской ГЭС до условной границы в районе урочища Усть-Хантайка.

Для реконструкции динамики площади всего водного зеркала р. Енисей в течение года были получены ряды ежесуточных значений уровней воды (2015 и 2016 гг). Отобранные по датам свободной ото льда воды и удовлетворительной прозрачности атмосферы изображения Landsat подвергались автоматизированной неуправляемой классификации (процедурой «Неконтролируемая классификация изокластера», ESRI ArcGIS 10.1 [4]). В результате пиксели каждого входного изображения группировались по заведомо избыточному числу наиболее различимых по спектральным признакам классов. Для повышения точности мы использовали 20 классов для каждого изображения, из которых на водные объекты приходилось, как правило, 1–3 класса, которые мы идентифицировали при визуальном анализе RGB-композитов. Затем отобранные классы воды и соответствующие им пиксели обработанных изображений автоматически переводились в форму векторных полигонов. Далее разрозненные фрагменты водных классов сливались в единый полигон, из которого вырезалась область необходимого нам сегмента р. Енисей. При этом отсекались притоки и прочие, не относящиеся к основному руслу, водные объекты на изображении. Вырезанные по сегментам Енисея полигоны, соответствующие изображениям одинаковой даты, объединялись с целью заполнить всю площадь заданного сегмента (между отсекающими граничными линиями) за определенную дату, обеспеченную измерением уровня воды на соответствующем гидропосте. Таким образом, для каждого сегмента формировался набор полигонов русла за различные даты доступных измерений уровня на гидропостах. Из-за ограниченности количества данных космической съемки по погодным условиям число полученных полигонов площади поверхности Енисея колебалось от 5 до 12. Тем не менее для каждого сегмента удалось относительно равномерно охватить весь диапазон интересующих дат и возможных изменений уровня.

В большинстве случаев площади полигонов поверхности водного зеркала Енисея в пределах сегмента оказались в значимой линейной зависимости от величины относительного уровня воды. Примеры графиков связи площади водного зеркала (км$^2$) и относительного уровня воды (см) приведены на рис. 1.



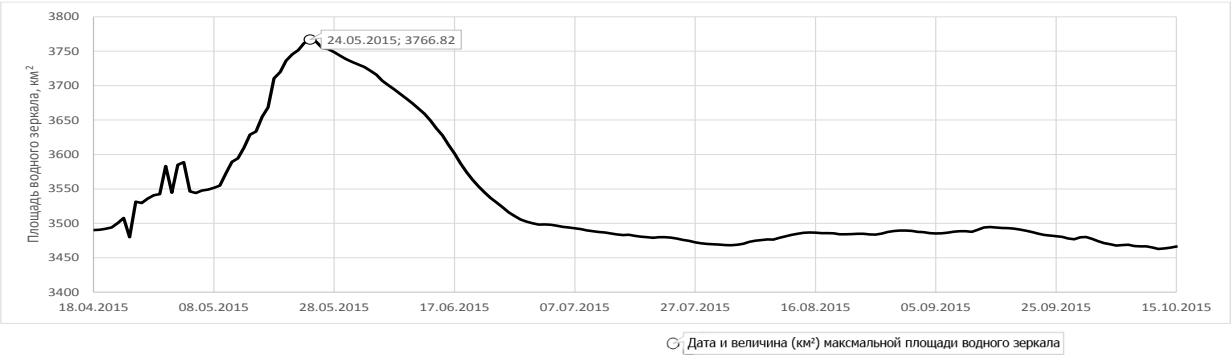

*а* *б*

Рис. 1. Зависимость площади водного зеркала, км$^2$, и относительного уровня воды, см, для сегментов русла: Верещагино (*а*) и Игарка (*б*)

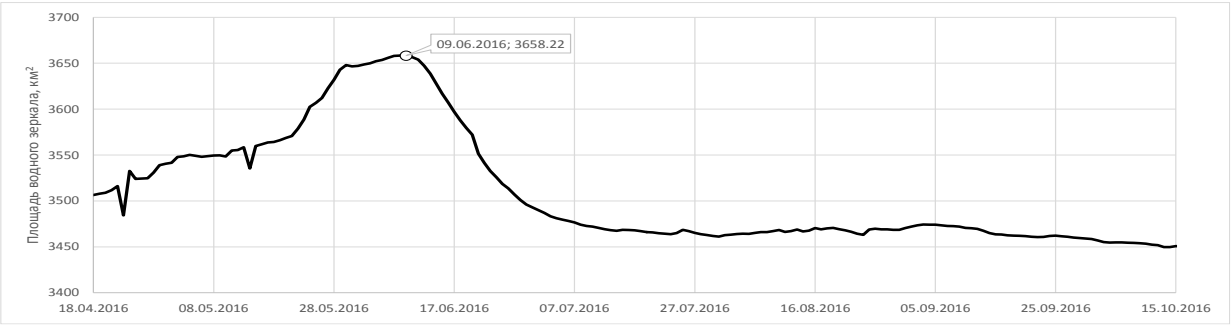
Таким образом, при наличии синхронизированных по времени данных измерения относительного уровня воды для всех необходимых сегментов русла можно посчитать общую (суммарную) величину водного зеркала реки за все даты измерений уровня. При этом следует учитывать, что полученные линейные модели относительно адекватно описывают только сезон свободной ото льда воды (май – октябрь) и не учитывают площади весенних разливов в местах выхода воды за границы русла, фиксация и моделирование которых требует отдельного исследования.

Для демонстрации расчета водного зеркала р. Енисей по разработанному методу были использованы доступные ежедневные данные измерений относительного уровня воды на гидропостах за 2015 и 2016 гг. (рис. 2).

Предложенный метод оценки водного зеркала является блоком проекта «Почвенные и гидробиологические процессы в регулировании стока терригенного углерода в Северный Ледовитый океан» (грант РФФИ 18-05-60203).




*а*




*б*

Рис. 2. Динамика площади водного зеркала р. Енинсей на участке Красноярская ГЭС – Усть-Хантайка, рассчитанная на основе ежедневных измерений относительного уровня воды на гидропостах Среднесибирского УГМС для 2015 г. (*а*) и 2016 г. (*б*)

**Список литературы**

1. Carbon dioxide and methane emissions from the Yukon River system / R.G. Striegl, M.M. Dornblaser, C.P. McDonald [et al.] // Global biogeochemical cycles. Vol. 26. GB0E05. DOI: 10.1029/2012GB004306, 2012.

2. Quantifying CDOM and DOC in major Arctic rivers during ice-free conditions using Landsat TM and ETM+ data / C.G. Griffin, J.W. McClelland, K.E. Frey [et al.] // Remote Sensing of Environment, Volume 209, May 2018, pp. 395-409

3. Allen G.H., Pavelsky T.M. Global extent of rivers and streams // Science 10 Aug 2018. Vol. 361, Is. 6402. P. 585–588, DOI: 10.1126/science.aat0636.

4. Руководство пользователя ESRI ArcGIS 10.1. © ESRI 1995–2012.

УДК 004.822

**А.А. Кузнецова, К.В. Раевич, Ю.А. Маглинец**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: anastaciakuzneczova@yandex.ru, ksenia_248@mail.ru

# ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ЗАДАЧАХ СТРУКТУРИЗАЦИИ ЗНАНИЙ О ЗЕМЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предметом статьи является анализ применимости онтологического подхода в задачах структуризации знаний о землях сельскохозяйственного назначения (далее – ЗСХН). Цель работы – применение онтологического подхода и результатом является создание базы знаний для оценивания ЗСХН в рамках данного подхода, а также предоставление механизма двухстороннего отображения онтологии и базы данных. Областью применения результатов являются интеллектуальные ГИС-системы, построенные на онтологиях (в качестве основы либо примера построения базы знаний в таких системах).

*Ключевые слова: онтология, база знаний, ЗСХН, структуризация знаний, интеграция в базу данных.*

**Структуризация знаний.** Для представления знаний в интеллектуальных системах (ИС) существуют различные способы, что связвно в первую очередь со стремлением с наибольшей эффективностью представить различные типы предметных областей. Обычно способ представления в ИС характеризуется моделью представления знаний [1]. На данный момент существует множество способов представления знаний (рис. 1).

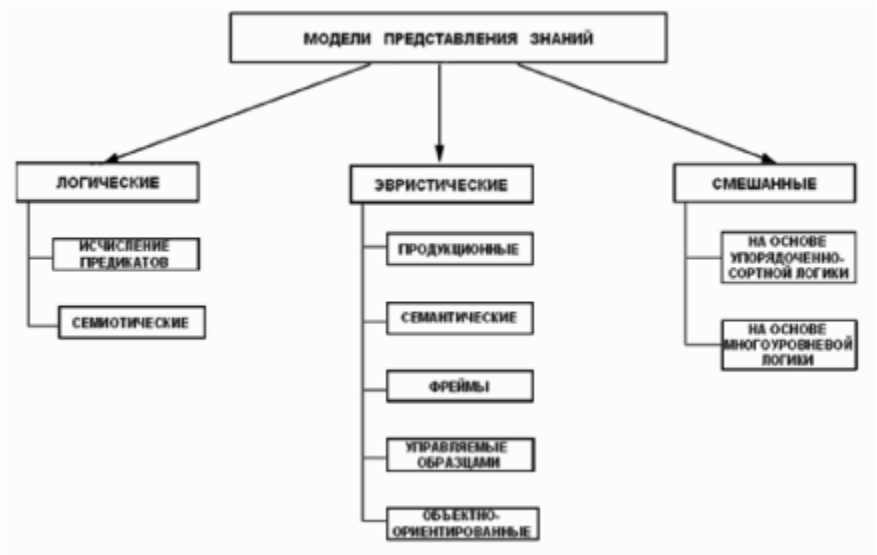



Рис. 1. Представления знаний

И чаще всего в системах, основанных на знаниях, используются либо несколько представлений, либо смешанные представления. Поэтому для структуризации знаний необходимо провести их концептуальный анализ. В данной работе использовалась последовательность действий, предложенная в [2]:

© Кузнецова А.А., Раевич К.В., Маглинец Ю.А., 2019

1. Определение входных и выходных данных.
2. Составление словаря терминов.
3. Выявление объектов, понятий и их атрибутов.
4. Выявление связей между понятиями.
5. Выделение метапонятий и детализация понятий.
6. Построение пирамиды знаний.
7. Определение отношений между понятиями.
8. Определение стратегии принятия решений.

**Моделирование онтологии.** Для построения базы знаний был выбран онтологический подход. Онтология, по одному из определений, – это попытка всеобъемлющей и детальной формализации некоторой области знаний с помощью концептуальной схемы. Обычно такая схема состоит из структуры данных, содержащей все релевантные классы объектов, их связи и правила (теоремы, ограничения), принятые в этой области. Тогда после концептуального анализа получим:

1. Входными данными в таком случае будут знания о ЗСХН (их свойства, характеристики), а выходными – классифицированные знания, доступные для решения задач пользователя, например, поиска ЗСХН по определенным параметрам.

2. Составление словаря терминов происходило по следующим группам (составлялись согласно работам экспертов в данных областях): агрокультура [3–8], агроэкономические показатели [9–11], почвенные показатели [12, 13], пространственные показатели [9], социально-экономические показатели, атмосферные явления.

3. Выявлен в процессе выполнения пункта 2, аналогично пункты 4 и 5.

4. Построение пирамиды знаний осуществлялось в среде Protégé. Для обозначения метапонятий использовались абстрактные классы (онтология верхнего уровня) для обозначения понятий и их детализации – классы и экземпляры классов.

5. Для определения отношений между понятиями использовались ранее представленные источники и свойства, присваивающиеся экземплярам (объектные и данных).

6. Для определения стратегии принятия решений были созданы SPARQL запросы и DL query запросы, позволяющие конечному пользователю отфильтровать ЗСХН по нужным ему параметрам. Для обеспечения переносимости и стабильности хранения данной базы знаний разработан механизм интеграции в базу данных. Для разработки использовалась СУБД MySQL и язык программирования Python, а именно библиотека minidom, предназначенная для парсинга XML (Protégé имеет возможность сохранения файла онтологии в формате XML). Для обратного отображения (БД в онтологию) использовался дополнительный программный компонент для Protégé – Ontop Mapping.

**Заключение**. В результате работы была получена база знаний о ЗСХН, позволяющая пользователю распределить ЗСХН по нужным ему параметрам механизм отображения в БД, что в итоге обеспечит переносимость, доступность, стабильность хранения знаний за счет объединения средств Protege и СУБД. Полученные результаты будут использоваться в дальнейшем для интеграции в ГИС-систему космического агромониторинга ИКИТ СФУ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта: 18-47-242002 р_мк), Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Разработка технологии создания интеллектуальных информационных систем объектно-ориентированного мониторинга территорий по данным дистанционного зондирования».*

**Список литературы**

1. Шихнабиева Т.Ш. Методы структуризации знаний в интеллектуальных обучающих системах // Казан. пед. журн. 2014. № 6. С. 14–21.

2. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М.: Радио и связь, 1992.

3. Прянишников Д.Н. Частное земледелие. М.: Типо-литография В. Рихтер, 1901. 407 с.

4. Культурные растения и их сородичи. Систематика, география, цитогенетика, иммунитет, экология, происхождение, использование // П.М. Жуковский. Л.: Колос, 1971. 752 с.

5. Растениеводство / Г.С. Посыпанов, В.Е. Долгодворов, Б.Х. Жеруков [и др.]; под ред. Г.С. Посыпанова. М.: ИНФРА-М, 2019. 612 с.

6. Classification of crops – APPENDIX 3 // FAO, World Programme for the Census of Agriculture 2010 (Всемирная программа сельскохозяйственной переписи 2010 года). 2010. 142–146 с.

7. ОКПД 2. Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности. Классификатор ОК 034-2014 (КПЕС 2008), ответственный – Росстат, введен по Приказу Росстандарта от 31.01.2014 №14-ст, начал действовать с 01.02.2014 // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163703/.

8. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений (офиц. изд.) // Государственная комиссия РФ по испытанию и охране селекционных достижений. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 504 с.

9. Гуреева О.В. Особенности земель сельскохозяйственного назначения как объекта оценки // Вестн. Сарат. гос. соц.-экон. ун-та. 2008. № 4. С. 78–81.

10. Анохин Е.И. Понятие, принципы и методы оценки земель сельскохозяйственного назначения // Проблемы современной экономики. 2010. № 3. С. 35.

11. Барсукова Г.Н. Экономика землеустройства: учеб. пособие. Краснодар: Кубан. гос. аграрн. ун-т, 2013.

12. Докучаев В.В. Избранные сочинения: в 3 т. / В. В. Докучаев. М.: Сельхозгиз, 1948.

13. Якушев В.В. Система поддержки принятия решений в земледелии. Принципы построения и функциональные возможности / Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена. 2009. С. 110–114.

УДК 528.854.2

**М.А. Марьин**
Аспирант, Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь, Россия
e-mail: muxaul.marin@gmail.com

# СЕГМЕНТАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЛАЧНОСТИ НА ДАННЫХ SENTINEL-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Классификация облаков, перистых облаков, дымки, снега, теней от облачности и областей с чистым небом является решающим моментом в обработке оптических изображений дистанционного зондирования. Группы спутников Landsat-8 и Sentinel-2 предоставляют большие объемы данных, которые необходимо подвергать обработке, сегментации на интересующие области. В данной статье представлено описание разработанной сверточной нейронной сети (CNN) для классификации облачности на снимках высокого пространственного разрешения.

*Ключевые слова: Sentinel-2, Landsat-8, маска облачности, сверточные нейронные сети.*

**Введение.** Обнаружение облаков, перистых облаков и их теней является одним из первых этапов обработки спутниковых оптических данных при решении широкого спектра задач: мониторинг, обнаружение изменений, выявления антропогенного или природного воздействия. Качественное детектирование облачности имеет решающее значение при восстановлении отражательной способности поверхности при атмосферной коррекции или корегистрации снимков. Восстановление отражательной способности становится невозможным для пикселей с облачностью, перистыми облаками и тенями, такие участки должны рассматриваться как отдельные случаи для правильной коррекции. В этом отношении данная классификация является важным этапом предварительной обработки снимков перед алгоритмами более высокого уровня для решения прикладных задач [1].

Цель работы – разработка алгоритма маскирования облачности и теней на основе сверточной нейронной сети (CNN). CNN должна обеспечивать классификацию изображения на чеыре класса: плотная облачность, перистая облачность, тени, отсутствие облачности и теней. В дальнейшем его планируется использовать в системе автоматического детектирования и классификации нарушений лесного покрова по снимкам Sentinel-2. Применение CNN обеспечивает существенное преимущество в сравнении с традиционными алгоритмами пиксельной классификации, так как позволяет анализировать форму, структуру и текстуру объекта.

**Данные.** В качестве обучающей выборки для сверточной нейронной сети использован имеющийся в открытом доступе набор данных Landsat-8 Cloud Cover Assessment Validation Data, содержащий 96 масок облачности и самих сцен для различных типов биомов. Для каждого биома имеется набор из 12 сцен с масками, полученных в различное время года, с различным процентом облачности на снимке. Все маски были созданы одним специалистом для исключения ошибки восприятия, которая составляет приблизительно 7 % пикселей [2].

Для верификации работы CNN использовался результат, полученный в работе [3]. Так как сенсоры серий спутников Landsat-8 и Sentinel-2 различаются [4], для дальнейшей работы использовались только 8 каналов, имеющихся у обеих съемочных систем.

© Марьин М.А., 2019

Данные Sentinel-2 приводились к форматам данных Landsat-8 с помощью непараметрического квартильного преобразования, полученного как нелинейная функция между распределениями в отдельно взятых каналах.

**Разработка алгоритма.** Получение качественной математической модели требует использования данных, обработанных человеком, так как обучение на выходных значениях других алгоритмов классификации повлечет за собой их систематическую ошибку. В разрабатываемом классификаторе предполагается использование данных, которые будут содержать только ошибку восприятия, возникающую при ручной оцифровке снимков.

Для тестирования различных видов архитектур были отобраны следующие модели: ResNet50 [5], VGG16 [6], InceptionV3 [7], U-Net [8], а также Patch-Based FCN [9]. В качестве обучающей функции была выбрана перекрестная кроссэнтропия.

Модель VGG16 не справлялась с поставленной задачей (время обучения одной эпохи занимало 352 с) по причине избыточного количества параметров модели. Модели ResNet50, InceptionV3 обучались прогрессивнее, но медленнее, но в итоге расходились. Сложившаяся ситуация объясняется математическим различием между космическими снимками и обычными фотографиями, на которых были разработаны данные модели. Попытка обучить данные сети с нуля, без использования весов с ImageNet, завершилась неудачей.

Модели Patch-Based FCN и U-Net стабильно обучались. Ошибки сетей располагались в различных участках сложных для классификации, поэтому данные архитектуры были объединены.

Дополнительно было создано 2 слоя: Split Layer, делящий входящую матрицу на участки 12 × 12 пикселей, Weld Layer, собирающий результаты Patch-Based блоков в матрицу исходного размера.

Основной проблемой при классификации растровых данных являются границы классов, решением проблемы является дополнительная генерация входных данных, содержащих границу [10].

Для улучшения предсказания переходов между тонким облаком и чистым небом использовались новые сверточные блоки с разряженными ядрами сверток [11], информация в которых обрабатывалась независимо от уже существовавших ранее слоев [12] в дополнительной ветви сети. Архитектура сети представлена на рисунке.

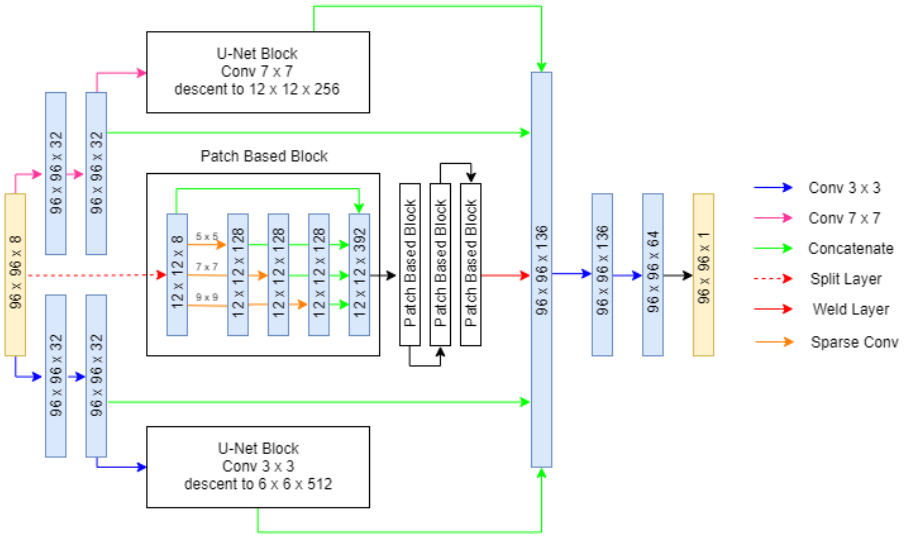



Рисунок. Архитектура разработанной сети

**Заключение.** Для оценки полученной модели использовались метрики полноты и точности, F-мера:

$$precission = \frac{TP}{TN + FP} = 0.9282 \quad recall = \frac{TP}{TP - FN} = 0.9876$$

$$F = \frac{2 \cdot presission \cdot recall}{presission + recall} = 0.9570$$

Низкий показатель точности объясняется более качественной классификацией, чем в данных, на которых происходила верификация. Разработанная CNN является устойчивой моделью сегментирования снимков и будет использоваться при обработке в системе автоматического детектирования и классификации изменений в лесных массивах по снимкам Sentinel-2.

**Список литературы**


1. Ready-to-Use methods for the detection of clouds, cirrus, snow, shadow, water and clear sky pixels in Sentinel-2 MSI Images / A. Hollstein, K. Segl, L. Guanter [et al.] // Remote Sens. 2016. № 8. 666 с.
2. Scaramuzza P.L., Bouchard M.A., Dwyer J.L. Development of the Landsat data continuity mission cloud-cover assessment algorithms // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions. 2012. № 50 (4). P. 1140–1154.
3. Baetens L., Desjardins C., Hagolle O. Validation of copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure // Remote Sens. 2019. № 11. P. 433.
4. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences / H. Zhang, D.P. Roy, L. Yan [et al.] // Remote Sensing of Enviroment. 2018. Vol. 215. P. 482–494.
5. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun. 2015
6. Karen Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2015
7. Rethinking the inception architecture for computer / C. Vision Szegedy, V. Vincent Vanhoucke, S. Sergey Ioffe [et al.]. 2015
8. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation.
9. Feng Z., Yang J., Yao L. Patch-based fully convolutional neural network with skip connections for retinal blood vessel segmentation // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017.
10. Fast cloud segmentation using convolutional neural networks / J. Drönner, N. Korfhage, S. Egli [et al.] // Remote Sens. 2018. № 10. P. 1782.
11. Clouds classification from Sentinel-2 imagery with deep residual learning and semantic image segmentation / C.-C. Liu, Y.-C Zhang, P.-Y. Chen [et al.] // Remote Sens. 2019. № 11. P. 119.
12. Multimodal Ground-Based Cloud Classification Using Joint Fusion Convolutional Neural Network / S. Liu, M. Li, Z. Zhang [et al.] // Remote Sens. 2018. № 10. P. 822.


.

УДК 550.814:553:411(575.16)

**Ж.Ж. Мовланов[1], Л.А. Абдуллаев[2]**

[1] Заведующий центром, доктор философии (PhD) по геолого-минералогическим наукам
[2] Заведующий сектором
ГП «Институт минеральных ресурсов», Ташкент, Узбекистан
e-mail: jahongir79@mail.ru

# РАЦИОНАЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ БЛАГОПРИЯТНЫХ ПОЗИЦИЙ НА РАЗМЕЩЕНИЕ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В СЕВЕРНОМ НУРАТАУ

Накопившаяся за последние годы геологическая, геохимическая, геофизическая и другая информация по многим конкретным перспективным площадям, рудопроявлениям, минерализованным зонам требует комплексного подхода в их доизучении с применением современных методов исследований и ГИС-технологий.

*Ключевые слова: комплексный пород, многофакторных модели, методы ГИС-технологий, дешифрирование КС, эндогенное оруденение, рудоконтролирующие факторы, перспективные площади, меридиональные разломи.*

Создание современной золотодобывающей и перерабатывающей инфраструктуры гор Северного Нуратау начато с Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан, определившего актуальность подготовки в Самаркандском геолого-экономическом регионе достаточных ресурсов рудных полезных ископаемых, позволяющих обеспечить непрерывность воспроизводства добываемых полезных ископаемых и расширение их производства.

Для обеспечения действующего в регионе горно-металлургического завода потенциальной минерально-сырьевой базой наиболее верным решением является выделение новых перспективных площадей для постановки поисково-оценочных работ. Накопившаяся за последние годы геологическая, геохимическая, геофизическая и другая информация по многим конкретным перспективным площадям, рудопроявлениям, минерализованным зонам требует комплексного подхода в их доизучении с применением современных методов исследований и ГИС-технологий.

На современном этапе развития геологии подобная постановка вопроса не может быть решена в рамке одной дисциплины и требует совместных усилий различных направлений геологической науки.

В этой связи изучение материалов дистанционных аэрокосмосъемок способствует усовершенствованию существующих геолого-прогнозных исследований, доизучению геологического строения рассматриваемой территории, выявлению закономерностей формирования и размещения эндогенного оруденения и факторов, повлиявших на их локализацию. Для геолого-структурных факторов выявление рудоконтролирующих структур и благоприятных позиций в формировании рудных месторождений, для оценки перспективности их флангов и глубоких горизонтов использован метод А.В. Королева и П.А. Шехтмана – геолого-структурный анализ условий размещения эндогенного гидротермального оруденения. Изучение причинно-следственных связей подтверждения или расхождения элементов имеющихся комплексов рудоконтролирующих при-

© Мовланов Ж.Ж., Абдуллаев Л.А., 2019

знаков, прогнозно-поисковых критериев и их многофакторных моделей позволило провести их обоснованную корректировку, уточнить геологические особенности в строении территории, механизмы формирования структурных позиции и выделить новые напраления, перспективные на золото.

Исследуемый объект работ представляет площадь со сложным геологическим строением, в развитии которой активно участвовали дизъюнктивные структуры Северного Нуратау, где важную роль играл глубинный Северо-Нуратинский разлом. Особенностью геологического строения изученной площади является развитие пород фундамента в виде субширотно ориентированных полос, разделенных тектоническими нарушениями. Фундамент сложен карбонатными, терригенно-карбонатными и терригенно-сланцевыми толщами тасказганской, частично бесапанской свит O-S возраста. Эти толщи, по мнению Р.С. Хана, прорваны телами интрузивных комплексов гранит-гранодиоритового состава C3-P1 возраста.

По материалам дешифрирования космоснимков площадь района характеризуется различной степенью расчлененности рельефа, отражающего влияние глубинных структур и взаимодействий эндогенных и экзогенных процессов. В пределах центральной части хребта Северного Нуратау, на его южных и околоводораздельных склонах, расчленение рельефа глубокое и интенсивное. У подножья хребта, на севере и юге, развиты пологие формы рельефа слабого расчленения. Обнажающиеся мезо-кайназойские отложения распространены на южном склоне хребта. У подножья северных склонов развит предгорный делювиально-пролювиальный шлейф, образованный слившимися воедино конусами выноса временных водотоков, которые вместе с эоловыми песками оказывают маскирующее влияние на степень дешифрирования структурно-дешифрируемого комплекса.

Дешифрирование позволило выявить зоны региональной трещиноватости различной ширины (до 8,5 км), скрытые структуры сквозного характера и меридионального простирания, не отраженные на существующих геологических и специализированных космогеологических картах (Ш.Э. Эргашев, 1998).

По данным дешифрирования выявлены разломы меридионального простирания, которые не отражены на специализированной космогеологической карте Ю.И. Лошкина. По данным предыдущих исследований изучение закономерностей формирования и размещения золотого оруденения выявлена приуроченность проявлений золота к линейным тектоническим структурам, выраженным на поверхности и на аэрокосмоснимках в виде протяженных линеаментов, зон дробления.

Дешифровочные признаки разломов хорошо проявлены на обнаженных площадях. В пределах закрытых площадей наиболее информативными признаками разломов являются геоморфологические.

Системы разломов на геологической карте значительно отличаются от космоструктурной схемы, которая характеризуется большой, превышающей масштаб исследований, тектонической нагрузкой. Одной из положительных особенностей использования цифровых дистанционных материалов при изучении территории является получение более широкой информации о структурных элементах изучаемой площади. Степень дешифрирования разломов на космоснимках Северного Нуратау высокая, но в пределах его структурно-вещественных комплексов различна. В пределах карбонатного и тасказганского кремнисто-сланцевого структурно-вещественных комплексов отмечается высокая степень дешифрирования, позволившая четко выделить слоистость геологических образований. Хорошо дешифрируются разломы в пределах Темиркабукского, Устукского интрузивных массивов. Выявленные структуры, возможно, влияли на процесс размещения золотого оруденения.

Разломы северо-западного простирания на северо-западе площади переходят в широтные, образуя структуры дуговой формы. По теории рудообразования А.В. Ко-

ролева, П.А. Шехтман, Ф.И. Вольфсона, Д.В. Руднквиста, Н. Некрасова, Х.А. Акбарова и др., приоткрытые участки дуговых разломов наиболее перспективны для процессов локализации золотого оруденения. Наблюдаемое смещение по разломам обусловило движение тектонических блоков с образованием клиновидных структур, которые, по данным А.В. Королева (1983), благоприятны для локализации оруденения.

У северного подножья хребта четко дешифрируется зона регионального Северо-Нуратинского разлома. В поле развития делювиально-пролювиального структурно-дешифрируемого комплекса по линии Шадбайбай – Ташназар дешифрируется его южная ветвь – Южно-Айдарский разлом, ограничивающий на западе вулканиты нижнего карбона (C1) и карбонатные отложений (D2-C1). Западнее, до разлома северо-западного простирания, проходящего через совхоз Нурата, фундамент (глубина залегания 50–150 м) представлен молассоидной фаришской свитой. Еще западнее, фундамент (глубина до 200 м) представлен рассланцеванными терригенно-сланцевыми породами бесапанской свиты, встречаются карбонатные породы девона и карбона. В пределах этой полосы известен ряд проявлений золота (Ямбаш, Пистали, Сарыкериз, Яры и др.).

В геодинамике развития земной коры важная роль принадлежит зонам региональной трещиноватости большой протяженности, пересекающим тектонически разнородные блоки. Особенностью их происхождения являются разнонаправленные перемещения блоков. Характерной особенностью зон региональной трещиноватости является то, что они по простиранию меняют механизм своего развития в зависимости от состава и строения структурно-вещественных комплексов и тектонических блоков, меняя интенсивность и площадь проявления.

Зоны региональной трещиноватости осложняют широтно-ориентированные разломы, разбивая их на отдельные отрезки.

Комплексной анализ дешифрированных материалов и металлогении золота региона показывает, что рудоконцентрирующее значение имеют узлы пересечения рифтоподобных структур с зонами региональной трещиноватости меридионального простирания, свидетельствуя об узловом характере размещения оруденения в пределах Северного Нуратау.

По результатам проведенных аэрокосмических исследований Северного Нуратау составлена космоструктурная схема масштаба 1:25 000, где выделены все дешифрированные космоструктуры и перспективные площади, в пределах которых рекомендуется проведение поисковых работ.

УДК 004.932.2

**А.В. Моисеев[1], Д.А. Швец[2]**

[1] Магистрант, [2] Кандидат технических наук
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: alexeymoiseev@outlook.com, granit.nauki@mail.ru

# ПОСТРОЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ СНИМАЮЩЕЙ КАМЕРЫ ПО АЭРОФОТОСНИМКАМ

Рассмотрена задача определения направления и величины смещения снимающей камеры на основе анализа получаемых изображений. Представлена блок-схема и математическая модель алгоритма. Данный алгоритм может быть применён в любых задачах компьютерного зрения, связанных с определением смещений и построение траекторий. Для практической демонстрации работы алгоритма выбрана задача построения смещения снимающей камеры по аэрофотоснимкам. Представлены наглядные результаты работы алгоритма, демонстрирующие логику работы алгоритма и результаты вычислений на тестовом наборе данных.

*Ключевые слова: обработка изображений, компьютерное зрение, отслеживание смещения.*

**Введение.** В настоящее время одним из важнейших направлений искусственного интеллекта является автоматическая обработка визуальной информации. Цель работы заключается в описании этапов работы представляемого алгоритма, математической модели и проведения эксперимента. Алгоритм предназначен для определения направления (угла) и величины смещения снимающей камеры на основе анализа получаемых изображений и может быть применен в задачах, требующих расчет и построение траектории, таких как отслеживание перемещений, построение маршрутов движений и помощи при управлении автономными средствами, SLAM, AR/VR.

**Этапы работы алгоритма.** На рис. 1 представлены этапы работы алгоритма.

Рис. 1. Этапы работы алгоритма

© Моисеев А.В., Швец Д.А., 2019

1. Калибровка камеры.

Выявление дисторсии на получаемых изображениях и получение скомпенсированного изображения из искаженного.

2. Проверка деградации камеры.

Анализ получаемых изображений на предмет деградации камеры, таких как попадание грязи на матрицу, ее физическое повреждение и сбои в работе.

3. Оценка степени хаотичности на каждом кадре.

Определение таких параметров, как дрожание и уровня детализации.

4. Оценка и корректировка кадра.

Получение оценки качества получаемого изображения и проведение корректировки на ее основе.

5. Выделение области.

На основе результатов выполнения п. 3 и 4 производится выбор наиболее выгодной для поиска области на первом полученном кадре.

6. Сравнение с данными предыдущего кадра.

Выполнения сравнения результатов вычислений п. 3 и 4 обоих кадров.

7. Формирование потенциальных решений.

Осуществление поиска заданной в п. 5 области первого кадра и проведение оценки на сходимость найденной области на втором полученном кадре.

8. Выбор решения.

Выбор наиболее оптимального решения на основе статистических данных. Определение направления и величины смещения камеры на основе вычисления двух поисковых областей.

9. Формирование данных для последующей обработки.

Принятие второго полученного кадра за первый и переход на п. 5.

**Математическая модель.** Из области $I(m,n)$ для определённости фиксируем точку $M$ с координатами $C_x$ и $C_y$ на первом изображении.

На втором изображении задаётся поисковая область $D_b$, привязанная к точке $B$ с координатой $C_x^{'}$ и $C_y^{'}$.

Изображения являются функциями евклидова пространства $R_2$, расстояние между точками $B$ и $M$ в котором определяется следующим образом:

$$d_{R_2}(BM) = \sqrt{\left(C_x^{'} - C_x\right)^2 + \left(C_y^{'} - C_y\right)^2} \quad . \tag{1}$$

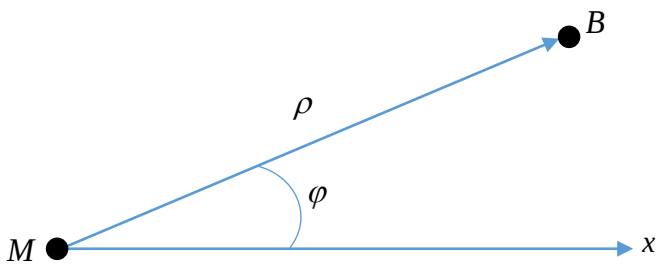



Рис. 2. Определение направления (угла) смещения снимающей камеры

Обозначим $C_x^{'} - C_x$ как равное $dx$ и $C_y^{'} - C_y$ – как $dy$.

Тогда величина смещения $BM$ поисковой области между кадрами равна

$$d_{R_2}(BM) = \rho = \sqrt{dx^2 + dy^2}. \tag{2}$$

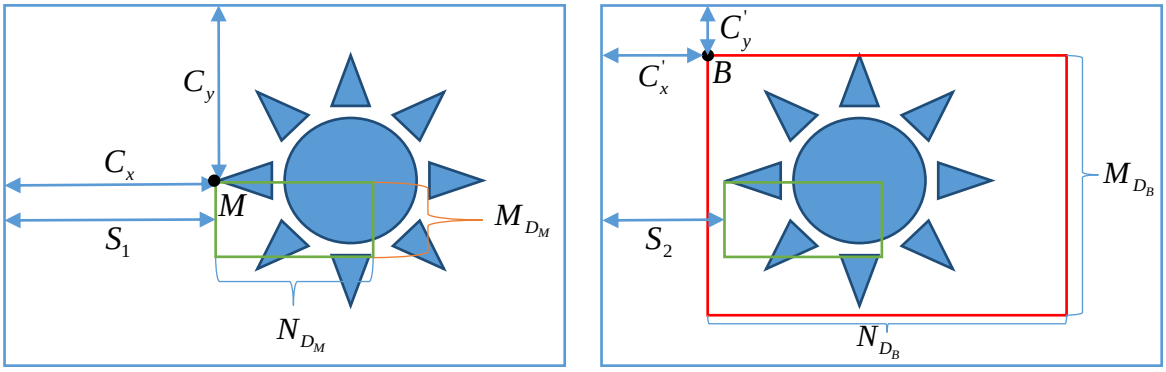
Угол смещения φ снимающей камеры:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left|\frac{dy}{dx}\right|, \tag{3}$$

$$\cos\varphi = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dy^2}}, \tag{4}$$

$$\sin\varphi = \frac{dy}{\sqrt{dx^2 + dy^2}}. \tag{5}$$

Первая область задаётся размерами $N_{D_B}$ и $N_{D_M}$, вторая область – $M_{D_B}$ и $M_{D_M}$. Эти значения являются константами.




*а* *б*

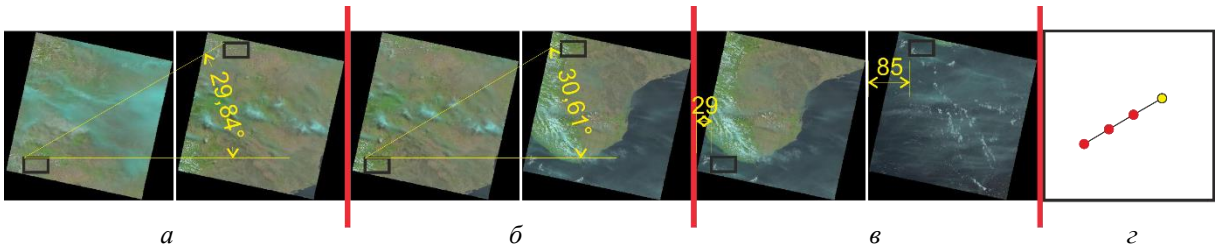
Рис. 3. Графическое представление математической модели алгоритма

$$d = S_1 - S_2 \tag{6}$$

$$d < \left|D_B - D_M\right|; \Rightarrow D_B \gg D_M \tag{7}$$

$$d = \begin{cases} \left|dx\right| < \left|N_{D_B} - N_{D_M}\right|; \\ \left|dy\right| < \left|M_{D_B} - M_{D_M}\right|; \end{cases} \tag{8}$$

**Эксперимент.** Для демонстрации работы представленного алгоритма на изображениях тестового набора данных взяты аэрофотоснимки со спутника Landsat-8 [1], в количестве четырех снимков, которые были уменьшены до разрешения 350 на 350 пикселей. К ним был применен описанный алгоритм. Поисковая область задавалась с учетом 20 % области перекрытия. Результаты работа алгоритма представлены на рис. 4 и в таблице. На рис. 4 продемонстрировано, что на втором кадре относительно первого поисковая область смещается под углом 29,84 (рис. 4, *а*), а при переходе с третьего к четвёртому величина смещения составила –55 пикселя (рис. 4, *в*). На основе полученных результатов была построена линия смещения снимающей камеры (рис. 4, *г*).




*а* *б* *в* *г*

Рис. 4. Графическое представление результатов вычисления угла смещения камеры по изображения

Таблица

Результаты вычисления угла смещения камеры по изображения

| Номер попытки | Угол смещения | Величина смещения (в пикселях) |
|---|---|---|
| 1 | 29,84 | –59 |
| 2 | 30,61 | –50 |
| 3 | 30,38 | –56 |
| Среднее значение | 30,27 | –55 |

**Заключение.** В данной статье была рассмотрена задача определения направления и величины смещения снимающей камеры на основе анализа получаемых изображений. Продемонстрирован наглядный пример работы алгоритма на изображениях тестового набора данных. Для ускорения процесса вычисления возможно применение адаптивного подхода, т.е. поиск необходимого фрагмента изображения в следующий момент времени в некотором диапазоне без необходимости анализа всего изображения.

**Список литературы**

1. Earth Resources observation and science center. Collection-1 Landsat-8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Data Products / Earth Resources Observation and Science Center. U.S. Geological Survey, 2018.

УДК 556.512.001.572:551.508.826

**Е.Л. Музылев[1], З.П. Старцева[1], Е.В. Волкова[2], Е.В. Василенко[2]**

[1] Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

[2] Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Росгидромета, Москва, Россия.

e-mail: muzylev@iwp.ru; starzoya@yandex.ru

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ В МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМОВ ОБШИРНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РЕГИОНА

Описан метод расчета влагозапасов почвы, суммарного испарения и других элементов водного и теплового режимов территорий больших сельскохозяйственных регионов с помощью физико-математической модели влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой при использовании полученных по спутниковым данным оценок метеорологических характеристик, характеристик растительности и влажности поверхности почвы.

*Ключевые слова: моделирование, спутниковые данные, тематическая обработка, влагозапасы почвы, суммарное испарение, AVHRR, SEVIRI, МСУ-МР, ASCAT.*

**Введение.** При существующем в настоящее время дефиците водных ресурсов получение адекватных оценок запасов почвенной влаги, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов (ВиТР) различных по размерам территорий с разной степенью увлажнения за сезон вегетации вызывает повышенный интерес. Поэтому моделированию процессов влаго- и теплообмена участков поверхности суши с атмосферой как наиболее детальному и эффективному способу их описания уделяется большое внимание. Использование в разрабатываемых моделях этих процессов LSM (Land Surface Model) спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности (ПП) значительно повышает достоверность оценки названных характеристик ВиТР [1–3], а для районов, в которых наземные наблюдения малочисленны или вообще не проводятся, может представлять практически единственную возможность получения такой оценки. Сказанное определило актуальность проводившихся исследований, включавших разработку методов математического моделирования процессов формирования ВиТР и расчета их характеристик, и создание методов и технологий спутникового мониторинга ПП и метеоэлементов, т.е. построения оценок характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик для их использования в модели. Среди последних – оценки осадков, температуры подстилающей поверхности (ТПП) трех типов (температуры поверхности почвы Tsg и растительного покрова Ta, а также эффективной ТПП Ts.eff), вегетационного индекса NDVI, излучательной способности ПП E, проективного покрытия растительностью B и листового индекса LAI, полученные в результате тематической обработки данных измерений радиометров-сканеров AVHRR (ИСЗ NOAA), SEVIRI (геостационарные ИСЗ Meteosat-10, 11, 8) и МСУ-МР (ИСЗ Метеор-М № 2). При моделировании также использовались оценки влажности поверхности почвы, полученные по данным измерений скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-B) в СВЧ диапазоне.

Задачами исследований, проводившихся для сезонов вегетации 2016–2018 гг., являлись: 1) подтверждение корректности оценок осадков, ТПП, LAI и B, построенных с помощью разработанных методов тематической обработки спутниковых данных;

© Музылев Е.Л., Старцева З.П., Волкова Е.В., Василенко Е.В., 2019

2) разработка и модификация процедур ассимиляции в модели упомянутых спутниковых оценок; 3) выявление возможности использования при расчете влагозапасов почвы оценок влажности ее поверхности, полученных по данным измерений с ИСЗ в СВЧ диапазоне; 4) получение в качестве результатов моделирования оценок влагозапасов, суммарного испарения, влажности поверхности почвы и других характеристик влаго- и теплообмена рассматриваемой территории за названные сезоны вегетации.

Исследования выполнялись на примере двух территорий, в основном занятых посевами сельскохозяйственных культур – находящейся в лесостепной зоне части Центрально-Черноземного региона (ЦЧР), включающей Орловскую, Курскую, Брянскую, Липецкую, Белгородскую, Воронежскую и Тамбовскую области общей площадью 227 300 км$^2$, и находящейся в зоне сухой степи территории Саратовского и Волгоградского Заволжья (левобережной части Саратовской и Волгоградской областей) площадью около 66 600 км$^2$.

**Краткое описание LSM и методов построения оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик.** С помощью разработанной в ИВП РАН LSM (модели вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва – растительность – атмосфера») для вегетационного периода в работе рассчитывались запасы почвенной влаги $W$, суммарное испарение $E_v$ (испарение с почвы и транспирация растительности), вертикальные потоки скрытого и явного тепла с ПП и другие характеристики ВиТР, ТПП трех типов (температура поверхностей почвы $T_g$ и растительного покрова $T_f$ и эффективная ТПП $T_s$), а также распределения температуры и влажности почвы по глубине в их динамике [1–3]. Основу модели составляют уравнения влагопереноса и теплопроводности для деятельного слоя почвы с граничными условиями в виде потоков влаги и тепла на верхней и нижней границах этого слоя. Испарение с поверхности почвы и транспирация определяются с помощью полуэмпирических зависимостей от влажности воздуха и температур. Температуры $T_g$ и $T_f$ находятся из уравнений теплового баланса для почвы и растительного покрова соответственно. Характеристики почв и растительности используются в модели в качестве параметров, а метеорологические характеристики, определяемые по данным срочных трехчасовых метеонаблюдений – в качестве входных переменных. Модель пригодна для использования описанных выше оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик по спутниковой информации. Значения всех входных переменных и параметров модели, в том числе определявшихся по спутниковым данным, и всех выходных продуктов моделирования (характеристик ВиТР, а также ТПП) рассчитывались в узлах вычислительной сетки с ячейкой размером 3 × 3 пиксела радиометра AVHRR (~ 5 × 7 км). Более подробное описание модели представлено в работе [1].

Оценки осадков, ТПП, LAI и B по данным всех названных радиометров были построены при использовании разработанных в НИЦ «Планета» Роскомгидромета методов и технологий тематической обработки этих данных [4, 5]. Все технологии были адаптированы к территориям ЦЧР и Заволжья. Так, оценки суточных, декадных и месячных сумм осадков для каждого пиксела производились с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации ее типов, а также выделения зон осадков и определения их максимальной интенсивности [4]. В основу методики положена реализация перехода от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных величин. Валидация методики для каждого из сенсоров производилась с использованием данных наблюдений за количеством выпавших в течение суток осадков на 48 агрометеорологических станциях ЦЧР и 9 станциях Заволжья. Вероятность детектирования по спутниковым данным зон осадков, соответствовавших фактическим, при сопоставлении с данными наблюдений на метеостанциях составила ~ 80 % (и выше) для всех радиометров [4].

На основе КПМ был разработан вычислительный алгоритм оценки ТПП, определявшейся при безоблачных условиях с помощью уравнений регрессии по измеренной с ИСЗ радиационной температуре в каналах 11 и 12 мкм [5]. Этот алгоритм был отлажен на данных AVHRR и SEVIRI/Meteosat-9 и 10 для ЦЧР и проверен для обеих исследуемых территорий на данных МСУ-МР и SEVIRI/Meteosat-11 и 8. Сравнение значений температур, определенных по наземным данным и данным всех радиометров, показало, что оценки ТПП всех трех типов для подавляющего числа сроков наблюдений оказались сопоставимыми по точности, кроме случаев значительного локального перегрева поверхности почвы во второй половине дня в жаркие летние месяцы, что по большей части отмечалось в Заволжье, и, как следствие, превышения наземных оценок над спутниковыми. В целом же погрешности оценок ТПП по данным всех сенсоров не превышали величин погрешностей определения температур по данным AVHRR, рассчитанных при наших предыдущих исследованиях и принимавшихся в настоящей работе за эталонные.

Значения NDVI рассчитывались по стандартным формулам как функции альбедо, определявшегося в видимых каналах каждого из радиометров, а оценки LAI и B строились с использованием эмпирических зависимостей от NDVI. Разумность оценок LAI и B. полученных по данным всех сенсоров, проверялась при сравнении временных ходов LAI за сезон вегетации, построенных по этим данным. Также в отдельных точках проводилось сравнение спутниковых оценок LAI с результатами расчетов по эпизодическим данным наземных измерений. Ошибки определения B и LAI составляли в этих случаях порядка 15 и 20 % соответственно.

**Результаты моделирования составляющих влаго- и теплообмена для исследуемых территорий при использовании спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик.** Процедуры использования в LSM, построенных по данным AVHRR, МСУ-МР и SEVIRI оценок LAI, B, осадков и ТПП, включали замену значений LAI и B, определенных по данным наземных наблюдений, на их оценки по спутниковым данным и ввод в модель в качестве входных переменных значений ТПП и величин осадков за сутки и по срокам, также рассчитанных по данным ИСЗ, вместо результатов их измерений на агрометеорологических станциях. При отсутствии в отдельные дни спутниковых оценок ТПП и осадков для каких-нибудь узлов вычислительной сетки модели значения этих величин, а также влажности воздуха определялись с помощью интерполяции данных стандартных метеорологических наблюдений. Учет в модели пространственной неоднородности полей спутниковых оценок LAI, B, ТПП и осадков, результатов интерполяции значений осадков, температуры и влажности воздуха осуществлялся путем создания алгоритмов и программ ввода в модель значений всех указанных величин в каждом узле сетки. Работоспособность процедур замены была подтверждена описанными выше результатами сопоставления временных ходов LAI и ТПП за сезон вегетации, построенных по спутниковым и наземным данным, и, главное, результатами сравнения являющихся искомыми значений влагозапасов почвы $W$ и суммарного испарения $E_v$, рассчитанных по модели при всех возможных вариантах оценки LAI, B, ТПП и осадков по данным использовавшихся сенсоров и полученных при наземных измерениях. Погрешности оценки $W$ и $E_v$ для подавляющего числа сроков измерений названных сезонов вегетации не превышали 15 и 25 %, что соответствует общепринятой величине ошибки определения значений $W$ и $E_v$. Построенные для обеих исследуемых территорий поля рассчитанных значений $W$ и $E_v$, потоков скрытого и явного тепла, ТПП трех типов, а также распределения температуры и влажности почвы по глубине являются конечными результатами моделирования (с упомянутой точностью). Так, например, анализ полей разностей значений $W$, рассчитанных при использовании спутниковых и наземных оценок осадков,

показывает, что погрешности представленных оценок *W* находятся в указанных выше пределах,

Исследование возможности использования при моделировании оценок влажности поверхности почвы, полученных по измерениям с ИСЗ в СВЧ диапазоне

В работе исследовалась также возможность использования оценок влажности поверхности почвы (ВПП), полученных по данным всепогодных измерений скаттерометра ASCAT/MetOp-B в СВЧ диапазоне, при расчете влагозапасов. Проверка корректности таких оценок для рассматриваемых территорий за сезоны вегетации 2016–2017 гг. производилась путем их сравнения с аналогичными оценками, полученными с помощью модели при использовании данных наземных наблюдений. Как для метеостанций, так и для большей части узлов вычислительной сетки различия спутниковых и модельных оценок ВПП находились в допустимых пределах (± 0,05–0,15 см$^3$/см$^3$) [3]. Подобные результаты позволяют использовать данные ASCAT в модели при задании начальных условий для уравнения вертикального влагопереноса в почве, а также для расчета испарения с поверхности почвы и последующего формирования верхнего граничного условия для этого уравнения. Задание начального профиля влажности при использовании данных измерений ASCAT позволяет рассчитывать влагозапасы почвы с меньшей погрешностью, чем при использовании данных только наземных измерений. Еще большего увеличения точности оценки влагозапасов можно достичь путем ввода в модель на каждом временном шаге значений испарения с почвы, также рассчитанного при использовании данных ASCAT.

**Заключение.** Основным результатом работы является описанный метод оценки запасов почвенной влаги, суммарного испарения и других характеристик ВиТР территорий с разным увлажнением в их динамике в течение сезона вегетации. Метод, основанный на использовании физико-математической модели влаго- и теплообмена поверхности суши с атмосферой, включает разработанные методы и технологии построения оценок характеристик растительности, метеорологических характеристик и ВПП по данным измерений с метеорологических ИСЗ в видимом, ИК и СВЧ диапазонах. Эффективность использования данного метода подтверждена результатами сравнения полученных спутниковых оценок и результатов моделирования с данными наземных наблюдений.

**Список литературы**

1. Remote Sensing Based Modeling of Water and Heat Regimes in a Vast Agricultural Region / A. Gelfan, E. Muzylev, A. Uspensky [et al.] // Remote Sensing – Applications. Chapter 6. Edited by B. Escalante-Ramirez. Rijeka: In Tech – Open Access Publisher. 2012. P. 141–176.

2. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data / Z. Startseva, E. Muzylev, E. Volkova [et al.] // Int. J. Rem. Sens. 2014. Vol. 35. № 15. P. 5775–5799.

3. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий / Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.Б. Успенский [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136.

4. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11. № 4. С. 163–177.

5. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 291–303.

УДК 004.932, 517.443

**М.В. Носков[1], В.С. Тутатчиков[2]**

[1] Доктор физико-математических наук, [2] Старший преподаватель
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: mvnoskov@yandex.ru, vtutatchikov@mail.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГА АЛГОРИТМА КУЛИ – ТЬЮКИ ДВУМЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СНИМКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ФИКСИРОВАННОМ ФОРМАТЕ 4K

В настоящее время широко распространены цифровые изображения в формате Full HD (1 920 × 1 080 пикселей) и 4K (4 096 × 3 072). В статье рассмотрен вариант обработки подобного изображения в частотной области. В качестве примера взят снимок земной поверхности. Дискретное преобразование Фурье вычислено с помощью двумерного аналога алгоритма Кули – Тьюки и стандартным способом по строкам и столбцам. Установлено необходимое число операций. Рассмотрены примеры фильтрации изображений.

*Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов.*

В настоящее время широко распространены цифровые изображения в формате Full HD (1920 × 1 080 пикселей) и 4K (4 096 × 3 072). Для их обработки, в основном, применяют методы пространственной фильтрации, так как они не требуют существенных ограничений размера изображения [1]. В данной работе рассмотрим возможность применения альтернативного метода – частотной фильтрации подобных изображений с помощью вычисления двумерного дискретного преобразования Фурье от функции яркости пикселей картинки, применения фильтра и вычисления обратного преобразования Фурье [2].

Рассмотрим метод на примере снимка дистанционного зондирования Земли в формате 4K, состоящем из 4 096 × 3 072 пикселей. При этом $N = 4096 = 2^{12}$, $M = 3\,072 = 3 \cdot 2^{10}$. В этом случае для непосредственного вычисления двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) потребуется $M^4N^4 = 9 \cdot 2^{44}$ операций комплексного сложения и умножения. Один из вариантов упрощения вычислений – это использование классического алгоритма вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ): сначала вычисляется одномерное БПФ по алгоритму Кули – Тьюки для каждой строки, состоящей из 4 096 элемента, а затем дискретное преобразование Фурье для каждого столбца из 3 072 элементов. В этом случае потребуется $18 \cdot 2^{22} + 9 \times \times 2^{32} = 9\,234 \cdot 2^{22} \approx 9 \cdot 2^{32}$ операций комплексного умножения и $72 \cdot 2^{22} + 9 \cdot 2^{32} = 9\,288 \times \times 2^{22} \approx 9 \cdot 2^{32}$ операций сложения. При этом в силу вступает основное ограничение применения алгоритма Кули – Тьюки, а именно, размер одномерного массива $f(x)$ должен составлять степень 2 ($N = 2^s$). Для упрощения вычислений можно преобразовать исходное изображение таким образом, чтобы по ширине и высоте картинка состояла из $N = 4\,096 = 2^{12}$ отсчетов. При заданном формате 4K придется добавить почти одну четвертую часть всех пикселей (что внесет заметные искажения в картинку, либо значительно расширит границы исходного изображения), а уже затем применить двумерный аналог алгоритма Кули – Тьюки [3]. В этом случае потребуется $\frac{3}{4} \cdot N^2 \log_2 N = 9 \cdot 2^{24}$ операций комплексного умножения и $2N^2 \log_2 N = 24 \cdot 2^{24}$ комплексного сложения.

© Носков М.В., Тутатчиков В.С., 2019

**Применение двумерного аналога алгоритма Кули – Тьюки.** Применим другой способ представления исходного изображений в формате 4K. В работе [4] рассмотрена модификация двумерного аналога алгоритма Кули – Тьюки для прямоугольного сигнала с $N \cdot M_1$ отсчетами. Для его вычисления потребуется $\frac{3}{8} \cdot NM_1 \log_2 N$ операций комплексного умножения и $2 \cdot NM_1 \log_2 N$ операций сложения.

Разобьем исходный сигнал на 3 блока с 4 096 × 1 024 отсчетами по кратности индекса: кратный 3 – вверх, остаток от деления на 3 равен 1 – в центр и остаток от деления на 3 равен 2 – вниз. В результате получим сумму трёх подсигналов, в которых стороны являются степенью двойки и можно применить [4]. При этом верхний блок оставляем без изменений, все элементы центрального блока домножаются на коэффициент $e^{\frac{2\pi i}{3}}$, а все элементы нижнего блока – на $e^{\frac{2\pi i}{3}}$. В этом случае общее число комплексных операций составит: умножения – $\left(\frac{9}{8}\log_2 N + 2\right) \cdot NM_1 = 15{,}5 \cdot 2^{22}$ и сложения – $\left(6\log_2 N + 2\right) \cdot NM_1 = 74 \cdot 2^{22}$.

Итоговое число операций, необходимых для вычисления двумерного БПФ разными способами, можно представить в таблице.

Таблица

Сравнение числа операций комплексных чисел

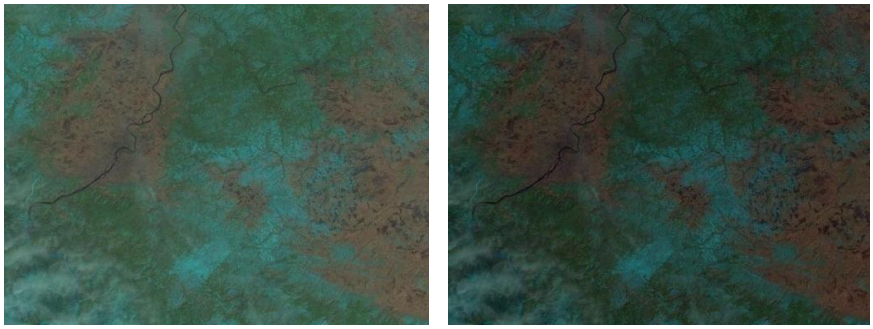
| Метод | Умножение | Сложение |
|---|---|---|
| Вычисление двумерного ДПФ | $9 \cdot 2^{44} \approx 1{,}5 \cdot 10^{14}$ | $9 \cdot 244 \approx 1{,}5 \cdot 10^{14}$ |
| Вычисление БПФ Кули – Тьюки по строкам и ДПФ по столбцам | $9 \cdot 2^{32} \approx 3{,}9 \cdot 10^{10}$ | $9 \cdot 2^{32} \approx 3{,}9 \cdot 10^{10}$ |
| Аналог алгоритма Кули – Тьюки для квадратного сигнала | $36 \cdot 2^{22} \approx 1{,}5 \cdot 10^{8}$ | $96 \cdot 2^{22} \approx 4 \cdot 10^{9}$ |
| Аналог Кули – Тьюки для изображения формата 4K | $15{,}5 \cdot 2^{22} \approx 6{,}5 \cdot 10^{7}$ | $74 \cdot 2^{22} \approx 3{,}1 \cdot 10^{8}$ |

Как видно из таблицы наиболее медленный способ вычисления двумерного преобразования Фурье для изображения в формате 4K (4 096 × 3 072 пикселя) – это непосредственное вычисление двумерного ДПФ (используется наиболее редко в силу большого числа требуемых операций). Значительное ускорение вычислений позволяет получить классический способ вычисления двумерного преобразования Фурье: сначала по строкам (для сигнала с 4 096 отсчетами) с помощью одномерного БПФ Кули – Тьюки, а затем по столбцам с помощью ДПФ (3 072 отсчета). Преобразование исходного изображения до сигнала с 4 096 × 4 096 отсчетами позволяет уменьшить на один – два порядка число требуемых операций комплексного умножения и сложения с помощью двумерного аналога алгоритма Кули – Тьюки. Разбиение исходного изображения на три подсигнала с 4 096 × 1 024 отсчетами позволяет применить к каждому полученному подсигналу двумерное БПФ по аналогу алгоритма Кули – Тьюки для прямоугольного сигнала, что еще на порядок уменьшает количество требуемых операций комплексных чисел.

В результате получаем, что алгоритм вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули – Тьюки для изображения фиксированного формата 4K (4 096 × 3 072 пикселя) требует меньшее количество операций комплексного умножения и сложения, чем другие приведенные методы. При этом данный алгоритм не требует предварительной обработки изображений в формате 4K.

**Фильтрация изображений.** Рассмотрим результат применения описанного алгоритма для частотной фильтрации изображений (более подробно механизм фильтрации описан в [5]). В качестве тестового сигнала использовался снимок Красноярска и его окрестностей со спутника Landsat-8 от 07.04.2016 [6] на рис. 1, *а*. Исходное разрешение

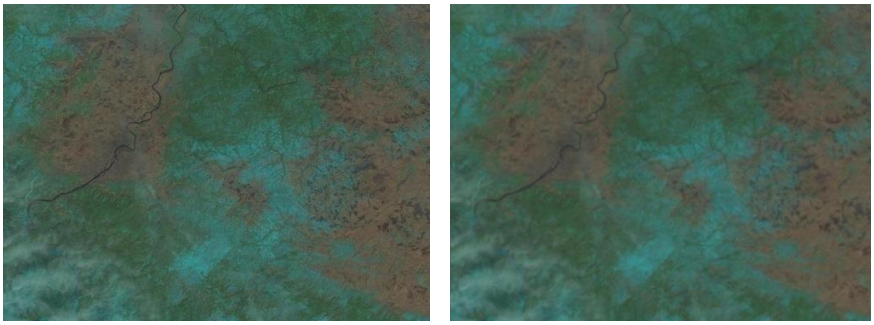
снимка составляет 8 081 × 8 171 пикселей. Сигнал был преобразован до формата 4K, а именно 4 096 × 3 072, как один из примеров широко распространенных изображений. На правой части рисунка 1 представлен результат высокочастотной фильтрации изображения (подробнее о применении фильтрации в частотной области указано в [6]). В данном случае стали заметны контуры: река, границы скалистых участков, а само изображение стало более контрастным.



*а* *б*

Рис. 1. Исходное изображение (*а*) и результат высокочастотной фильтрации (*б*)

На рис. 2, *а* показано исходное изображение, на рис. 2, ш – результат низкочастотной фильтрации. В данном случае мелкие изменения гористой местности не так заметны на общем фоне. Изображение стало менее контрастным и более однородным. Пропали резкие переходы яркости изображения, добавилась насыщенность цвета.



*а* *б*

Рис. 2. Исходное изображение (*а*) и результат низкочастотной фильтрации (*б*)

**Заключение.** В статье показано применение двумерного аналога алгоритма Кули – Тьюки для частотной фильтрации изображений в формате 4K, требующего меньшее количество операций комплексного умножения и сложения, чем другие способы обработки подобных изображений. Проведено сравнение нескольких методов и показаны примеры фильтрации изображения на основе снимка земной поверхности.

**Список литературы**


1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.
3. Tutatchikov V.S. Two-dimensional fast Fourier transform // Proceeding of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016). P. 495–498.
4. Noskov M.V., Tutatchikov V.S. Modification of a two-dimensional fast fourier transform algorithm by the analog of the Cooley-Tukey algorithm for a rectangular signal // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, № 1. P. 81–83.
5. Application of parallel version two-dimensional fast Fourier transform algorithm, analog of the Cooley-Tukey algorithm, for digital image processing of satellite data / M. Noskov, V. Tutatchikov, M. Lapchik [et al.] // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 75, № 01012, URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/01/e3sconf_rpers2018_01012/e3sconf_rpers2018_01012.html.
6. Снимок Красноярска и его окрестностей от 07.04.2016. URL: http://earthexplorer.usgs.gov/.

УДК 004.932.2

**Д.А. Перфильев**
Кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет
Красноярск, Россия
e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

# СТРАТЕГИЯ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Предложена стратегия сегментации объекта на изображении, основанная на восходящих и нисходящих процессах формирования правила сегментации.

*Ключевые слова: сегментация свойств, правило сегментации, стратегия сегментации.*

**Введение.** Сегментация объекта является ключевой частью решения задачи анализа и интерпретации изображения [1–10]. Для детерминированной модели, решением задачи сегментации объекта является разбиение модели $f(a)$, изображения $P$ на $S = \{s_1, s_2, ..., s_к\}$, непустых связных областей, для которых правило $LP$ принимает истинные значения тогда и только тогда, когда любая пара элементов из любого подмножества $s_i \in S$ удовлетворяет цели интерпретатора.

В общем случае сегментация объекта представляет собой процесс:

$$\text{Seg: } f(a) \xrightarrow{Lp} S^{(\text{Sem})},$$

где $S^{(\text{Sem})}$ – семантические отношения (имя области); $LP(s_i^{\text{Sem}})$ – указание модели «соседства» характерное признакам объекта.

Для модели соседства $s_i(b_4^2)$, правило сегментации имеет следующий вид:

$$\left| s_i(b_4^2)\text{: } P(\xi_r) - LP\,(s_i^{\text{Sem}}) \right| < r_i^{\text{Sem}}, \qquad (1)$$

где $r_i^{\text{Sem}}$ – радиус, позволяющий интерпретировать свойства объекта; $\xi_r$ – оценка дополнения области.

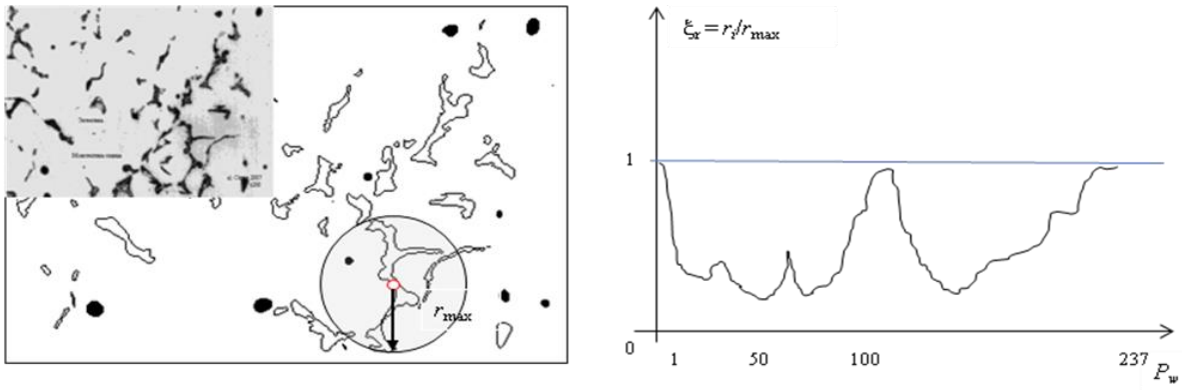



Рис. 1. Функционально-параметрическая оценка эвтектики расположенной вблизи микротрещины

Правило (1) позволяет сегментировать объект с целевыми свойствами.

© Перфильев Д.А., 2019

**Стратегия сегментации.** Математическая постановка задачи сегментации, учитывающая модель соседства, выраженную функцией $P(\xi_r)$ [11, 12], имеет следующий вид:

Пусть задано $s_i(b_i^2)$ – множество отношений соседства компонент изображения (модели), признаки которых отображены функцией $P(\xi_r)$, а также предикат $LP(s_i^{Sem})$, определяющий радиус однородности $r_i^{Sem}$.

Для детерминированной модели, решением задачи сегментации является разбиение множества $S$, на $N$ классов, для которых $LP(s_i^{Sem})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

Значение $r_i^{Sem}$ меняется в процессе сегментации, за счет анализа оценки функции $P(\xi_r)$ и относительно оценки однородности смежных классов множества $S$.

В этом случае сегментация объекта рассматривается как стратегия:

$$\text{Seg: } P(\xi_r) \xrightarrow{Lp(S_i^{sem})} n_i^{(Sem)}, \qquad (2)$$

где $n_i^{(Sem)} \in N$ – семантическое отношение (имя объекта), определенное при анализе однородности границы области.

На рис. 2 представлен результат работы стратегии, позволяющей анализировать однородность результатов сегментации трех классов объектов.

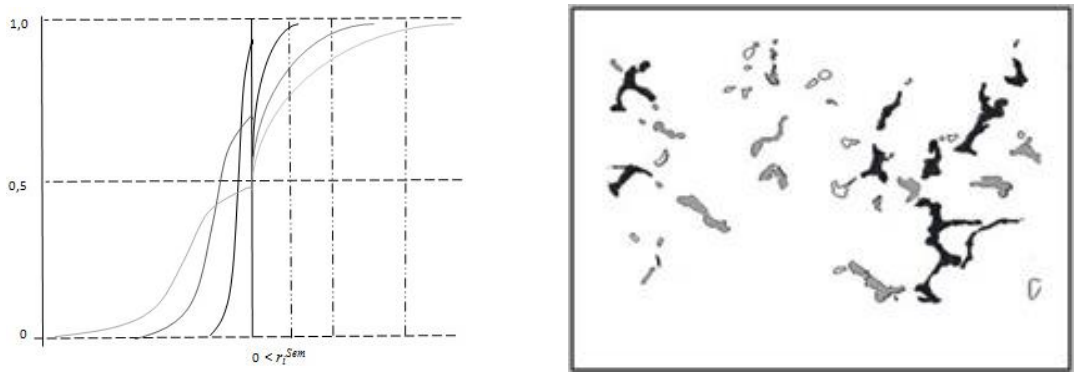



Рис. 2. Оценка однородности классов сегментированных объектов, представляющих дефект микроструктуры

В качестве унарного признака граничных пикселей используется значение $P(\xi_r)$, как правила выполнения низкоуровневой сегментации области на изображении. Соответственно в качестве правила высокоуровневой сегментации такой признак, как выпуклость формы области.

**Эксперимент.** Целью эксперимента является сегментация части изображения, представляющей феноменологию объекта. В качестве данных эксперимента использовались эталонные микроструктурные металлографические изображения деформируемого алюминиевого сплава АМг6, удовлетворяющие условиям детерминированной модели.

На восходящем этапе сегментации использовался метод пространственного дифференцирования. В автоматическом режиме выполнялась выделение областей относительно оценки функции $\xi_r$ и связности пикселей соответствующей модели «область» ($b_4^2$). В результате низкоуровневой сегментации были сформированы цепочки (подмножества) граничных пикселей $P_w \in s_i$ с характерным значением интегральной характеристики $P(\xi_r)$.

В задачу нисходящей сегментации входила выработка принципа определения оптимального радиуса правила $LP(s_i^{Sem})$ с целью сегментации части изображения с характерной однородностью свойства объекта. В результате оценка плотности $P(\xi_r)$, позволило сформировать классы областей изображения с характерными свойствами.

**Заключение.** Предлагается математическая постановка задачи сегментации, учитывающая относительно более сложную модель соседства, выраженную функцией $P(\xi_r)$:

Пусть задано $s_i(b_i^2)$ – множество отношений соседства компонент плоскости изображения (модели), признаки которых отображены функцией $P(\xi_r)$, а также предикат $LP(s_i^{\mathrm{Sem}})$, определяющий радиус однородности $r_i^{\mathrm{Sem}}$.

Для детерминированной модели, решением задачи сегментации является разбиение множества $S$, на $N$ классов, для которых $LP(s_i^{\mathrm{Sem}})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментация объекта является комбинированной стратегией:

$$\mathrm{Seg}\colon P(\xi_r) \xrightarrow{Lp(S_i^{sem})} n_i^{(\mathrm{Sem})},$$

где $n_i^{(\mathrm{Sem})} \in N$ – семантическое отношение (имя объекта), определенное при анализе однородности границы области.

Предполагается, что синтаксис правила (2) будет дополнен оценкой видеоряда изображения. Это позволит существенно повысить качество стратегии сегментации.

**Список литературы**


1. Денисов Д.А. Компьютерные методы анализа видеоинформации: монография. Красноярск, 1993. 192 с.
2. Борисенко В.И., Златопольский А.А., Мучник И.Б. Сегментация изображений (состояние проблемы) // Автоматика и телемеханика. 1987. № 7. С. 3–56.
3. Перфильев Д.А. Классификация сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов. // Вестн. СибГАУ. 2007. № 1 (14). С. 118–122.
4. Чочиа П.А. Пирамидальный алгоритм сегментации изображений // Информационные процессы. 2010. Т. 10, № 1. С. 23–35.
5. Коулмен Г.Б., Эндрюс Х.С. Сегментация изображений при помощи автоматической классификации // ТИИЭР. 1979. № 5. С. 82–97.
6. Brian L. DeCost, Elizabeth A. Holm A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // Computational Materials Science 110. 2015. P. 126–133.
7. Khodaskar A.S. Ladhake Semantic image analysis for intelligent image retrieval international conference on intelligent // Computing, Communication & Convergence (ICCC-2014) / Institute of Management and Technology. India 2014. P. 193–197.
8. Saha Segmentation of dual phase steel micrograph: An automated approach / S.K. Banerjee, S. Ghosh, S.K. Datta // Measurement. 2013. P. 2435–2440.
9. Combined in situ X-ray radiographic observations and post-solidification metallographic characterisation of eutectic transformations in Al–Cu alloy systems / A.G. Murphy, D.J. Browne, W.U. Mirihanage, R.H. Mathiesen // Acta materialia 61. 2013. P. 4559–4571.
10. Degischer Effect of solution heat treatment on the internal architecture and compressive strength of an AlMg4.7Si8 alloy / D. Tolnai, G. Requena, P. Cloetens, J. Lendvai // Materials Science & Engineering A 585. 2013. P. 480–487.
11. Perfil`ev D.A. Segmentation object strategy on digital image // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. № 11(2). P. 213–220.
12. Перфильев Д.А. Сегментация объекта на цифровом изображении // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы Междунар. научн. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 366 с.

УДК 519.24

**О.А. Попова**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрен новый подход к обработке данных – функциональный анализ данных. Представлено использование новых подходов для функциональной регрессии.

*Ключевые слова: вычислительный вероятностный анализ, функциональный анализ данных, функциональная регрессия.*

**Введение.** Дистанционное зондирование (ДЗ) можно представить как процесс, посредством которого собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. Следует заметить, что ДДЗ – это пространственная многомерная информация в виде файлов весьма большого объема, для эффективной работы с которыми, необходимы специальные средства, в том числе особые форматы многомерных данных.

Важно отметить, что широко распространенными типами данных дистанционного зондирования Земли являются данные, которые в процессе наблюдения за объектом или объектами фиксируются непрерывно в течение определенного промежутка времени или периодически в дискретные моменты времени. Высокая внутренняя размерность этих данных создает проблемы как для теории, так и для вычислений, а их исследование требует применения специальных методов и подходов. Эти проблемы зависят также от того, как были собраны данные, какова структура и размерность данных, каковы их источники. Ответы на эти вопросы откроют новые возможности для исследований и анализа данных.

Одним из новых направлений для изучения таких данных является функциональный анализ данных (ФАД), или Function Data Analysis (FDA), который занимается анализом и теорией данных, представленных в виде некоторых функций, изображений или более общих объектов.

Одно из основных понятий ФАД – понятие функциональных данных, которые представлены так, что для каждого субъекта в случайной выборке записывается одна или несколько функций. Термин FDA был введен Ramsay, Dalzell [1, 2], история этой области намного старше. Функциональные данные первого поколения обычно состоят из случайной выборки независимых вещественных функций, $X_1(t),\ldots,X_n(t)$ на компактном интервале $I=[0,T]$ вещественной прямой. Эти вещественные функции можно рассматривать как реализации одномерного стохастического процесса, который часто предполагается в гильбертовом пространстве, например $L_2(I)$.

Функциональные данные следующего поколения – это функциональные данные которые являются частью сложных объектов данных, и они могут быть многомерными, коррелированными либо включать изображения или формы.

В самом общем понимании можно рассматривать функциональные данные как реализации основного стохастического процесса. Основной процесс в реальных задачах часто не может наблюдаться напрямую, так как данные могут быть собраны дискретно с течением времени либо на фиксированной или случайной сетке времени. В таких си-

© Попова О.А., 2019

туациях основной процесс считается скрытым. Временная сетка, где проводятся наблюдения, может быть плотной, разреженной или пустой, и она может отличаться от предмета к предмету.

Хотя формального определения функциональных данных не существует, соглашение заключалось объявить функциональные данные как плотные (в отличие от разреженных) выборок. Разреженные функциональные данные возникают в исследованиях, для которых измеряются объекты в разные моменты времени и количество измерений $n_i$ для объекта $i$ может быть ограничено, т.е. $\sup_{1\le i\le n} n_i < C < \infty$ некоторой константой.

Разреженные и нерегулярно выбранные функциональные данные (которые соответствуют общему типу продольных данных), обычно требуют больше усилий в теории и методологии, чем плотно выбранные функциональные данные, которые записываются непрерывно.

Функциональные данные, наблюдаемые непрерывно без ошибки, являются самым простым типом для обработки в качестве теории для случайных процессов, таких как функциональные законы большие числа и функциональные центральные предельные теоремы легко применимы.

**Цели функционального анализа данных.** Цели функционального анализа данных в основном такие же, как и у любой другой ветвь статистики. Они включают в себя:

- представлять данные способами, которые помогают дальнейшему анализу;
- отображать данные, чтобы выделить различные характеристики;
- изучать важные источники закономерностей и вариаций среди данных;
- объяснять изменения в результатах с помощью входной информации;
- сравнить два или более набора данных в отношении определенных типов вариации, где два набора данных могут содержать разные наборы дубликатов одних и тех же функций.

**Функциональная регрессия.** Функциональная регрессия – это версия регрессионного анализа, когда ответы или ковариаты включают функциональные данные. Модели функциональной регрессии могут быть классифицированы на четыре типа в зависимости от того, являются ли ответы или ковариаты функциональными либо скалярными:

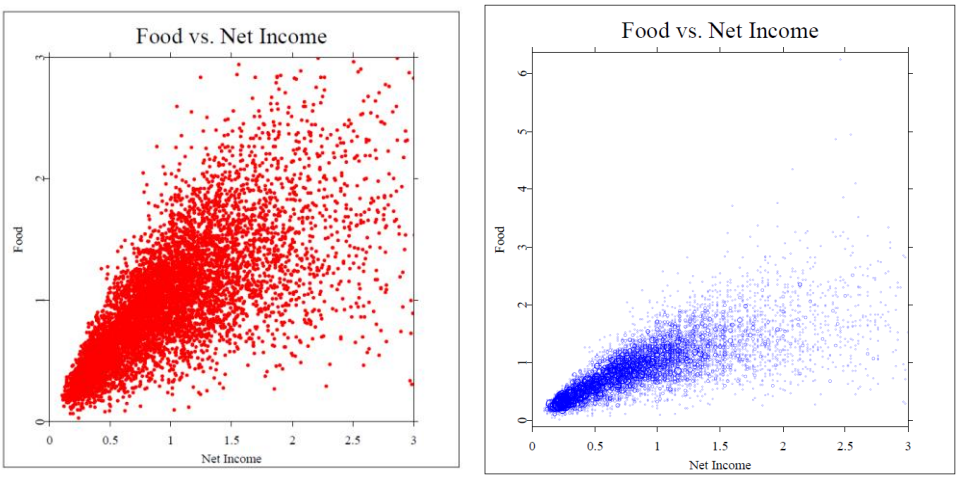
- скалярные ответы с функциональными ковариатами;
- функциональные ответы со скалярными ковариатами;
- функциональные ответы с функциональными ковариатами;
- скалярные или функциональные ответы с функциональными и скалярными ковариатами.

Кроме того, модели функциональной регрессии могут быть линейными, частично линейными или нелинейными. В частности, функциональные полиномиальные модели, функциональные модели с одним и несколькими индексами и функциональные аддитивные модели являются тремя частными случаями функциональных нелинейных моделей.

В статье для описания случайной неопределенности во входных и выходных переменных на этапе преобразования данных предлагается использовать ФПВ – значные переменные, которые представляют собой математические модели функций плотности вероятности соответствующих переменных, построенные по эмпирическим данным в классе кусочно-полиномиальных моделей. Для вычисления неизвестных параметров модели предлагается использовать численный вероятностный анализ, в котором имеются соответствующие арифметики и процедуры.

В рамках применения данного подхода рассматриваются новые методы моделирования функциональных зависимостей на основе сплайн аппроксимаций [4]. Для исследования точности вычислений используется метод построения апостериорных оценок [5].

На рис. 1 изображен набор данных расходов на питание (*Y*) и дохода (*X*). Это графическое представление полного набора данных не выглядит достаточно ясным, особенно в левом нижнем углу [6].




*а* *б*

Рис. 1. Зависимость расходов на питание от чистого дохода: а – множество точек зависимости расходов на питание *Y* от чистого дохода *X*; б – «цветочный график»

Желательно иметь какой-либо метод, позволяющий увидеть места скопления данных. Иллюстрацией такого метода является так называемый *«цветочный график»* [6]. Цветочный график строится посредством определения сети квадратов, покрывающих плоскость (*X*, *Y*), и подсчета числа наблюдений, попадающих в отдельные квадратики. Число «лепестков цветка» соответствует числу наблюдений в квадрате этого «цветка». В рамках функционального анализа данных и функциональной регрессии рассмотрим задачу представления данных в виде функциональной регрессии.

Постановка задачи. Пусть известны значения $(y_i, x_i)$ $i = 1, 2, \ldots, N$. Относительно $y_i$ известно, что функции плотности вероятности $y(x)$ зависят непрерывно от $x$. Необходимо: по данным $(y_i, x_i)$ оценить плотность вероятности $y(x), x \in X$ и построить функциональную регрессию.

Для построения оценки плотности вероятности $y(x)$ в некоторой точке $x_0$ зададимся параметром $h > 0$ и построим на отрезке $[x_0 - h, x_0 + h]$ по данным $D_h = \{(y_i, x_i) \mid x_i \in [x_0 - h, x_0 + h]\}$ регрессию $r(x)$. Далее построим выборку $Z_h = \{z_i = y_i - r(x_i) \mid x_i \in [x_0 - h, x_0 + h]\}$. По $Z_h$ и используя ядерные оценки построим приближение $y^h(\cdot, x_0) \approx y(\cdot, x_0)$. Заметим, что в данном случае мы строим оценку $y^h(\xi, x_0)$:

$$y^h(\xi, x_0) = \frac{1}{2h} \int_{x_0 - h}^{x_0 + h} y(\xi, x) dx.$$

Несложно видеть, что

$$y(\xi, x_0) = y^h(\xi, x_0) + Ch^2 + O(h^4),$$

где $C$ – константа, независящая от $h$. В этом случае для повышения точности можно использовать экстраполяцию Ричардсона. Для этого построим оценки при $h$ и $2h$: $y^h(\xi, x_0)$ и $y^{2h}(\xi, x_0)$. Далее

$$y(\xi, x_0) = \frac{4}{3} y^h(\xi, x_0) - \frac{1}{3} y^{2h}(\xi, x_0) + O(h^4).$$

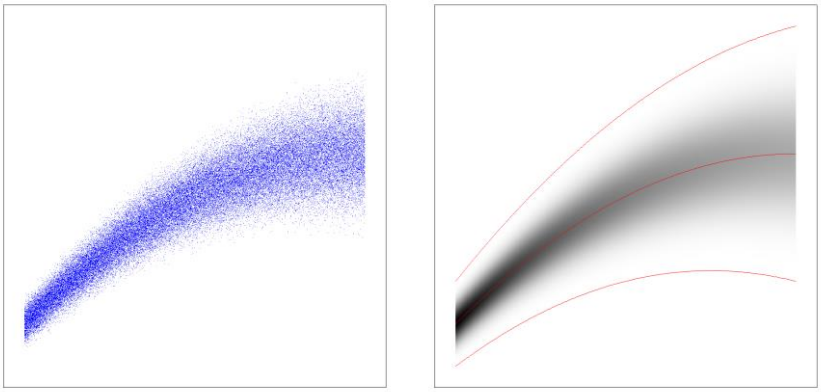
Будем стремиться построить оценки так, чтобы

$$y^h(\xi, x_0) - y^h(\xi, x_0) \approx O(h^4).$$

В этом случае будет справедлива оценка

$$y(\xi, x_0) = \frac{4}{3} y^h(\xi, x_0) - \frac{1}{3} y^{2h}(\xi, x_0) + O(h^4).$$

**Модельная задача**. На рис. 2 изображена модельная задача. На рис. 2, *а* изображены модельные данные, на рис. 2, *б* оттенками серого представлена восстановленная плотность вероятности.



*а* *б*

Рис. 2. Модельная задача. Левый рисунок – исходные данные, правый – функциональная регрессия

**Заключение.** Предлагаемый подход позволяет представлять в рамках функционального анализа представлять данные в виде функциональной регрессии.

**Список литературы**


1. Ramsay J.O. When the data are functions // Psychometrika. 1982. № 47. P. 379–396.
2. Ramsay J.O., Dalzell C. Some tools for functional data analysis // J. R. Stat. Soc. Ser. B. 1991. № 53. P. 539–72.
3. Ramsay J.O., Silverman B.W. Functional data analysis // Springer. 2nd ed. NY, 2005.
4. Попова О.А. Применение численного вероятностного анализа в задачах интерполяции // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. 2. С. 99–114.
5. Popova O.A. Using Richardson extrapolation to improve the accuracy of processing and analyzing empirical data // Measurement Techniques. 2019. Vol. 62, № 2. DOI 10.1007/s11018-019-01594-1.
6. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия: пер. с англ. М.: Мир, 1993. 349 с.

УДК 528.8.04

**М.Г. Разакова, А.Г. Кузьмин, Ж.Ж. Айнакулов,**
**И.О. Федоров, Р.К. Ергалиев**

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,
Алма-Ата, Казахстан
e-mail: mairarazakova@gmail.com

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБЪЕМА СЕЛЕВОГО ВЫНОСА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы расчета объема селевого выноса по данным дистанционного зондирования. Основными методами получения информации при проведении исследований являются полевые наблюдения. Наиболее важными результатами полевых исследований являются количественные оценки, такие как объем насыпи, образовавшейся в результате произошедшего оползня, морфометрические показатели и др. Изучение труднодоступного и удаленного объекта производилось дистанционными методами с использованием аэрофотоснимков в предгорье Иле Алатау на высоте 1 600 м над уровнем моря. Полученные материалы обследования селевого бассейна будут полезными при разработке решений по ликвидации последствий катастроф и при проектировании мероприятий по инженерной защите от селей.

*Ключевые слова: оползень, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель местности, объем насыпи.*

**Введение.** Последствия сели могут быть катастрофичными – разрушение дорог, промышленных объектов и населенных пунктов. Полученные материалы определения объема селевого выноса будут полезными при разработке решений по ликвидации последствий катастроф и при проектировании мероприятий по инженерной защите от селей.

Целью данной работы была оценка воздействий на окружающую среду селевого потока по данным аэрофотосъемки.

Объектом исследования явились события 14 мая 2018 г., когда в Аксайском ущелье в связи с выпадением обильных продолжительных осадков в виде дождя по речке Кызылжар (приток реки Аксай) произошел селевой выброс объемом 800 м$^3$ (подробнее: https://tengrinews.kz/events/sel-soshel-bliz-almatyi-344188/).

На практике, расчет характеристик селевых потоков производится согласно требованиям [1, 2]. Одним из основных параметров селевого потока, влияющих на выбор мероприятий, является объем сошедшего селя $V_c$, м$^3$, определяемый по формуле

$$V_c = V_k + V_t + V_p + V_{pw}, \tag{1}$$

где $V_k$ – объем крупнообломочного материала, отложившегося в конусе выноса, м$^3$; $V_t$ – объем крупнообломочного материала, отложившегося в зоне транзита, м$^3$; $V_p$ – объем тонкодисперсного материала, вынесенного селевым паводком за границы селевого конуса выноса, м$^3$; $V_{pw}$ – объем водного послеселевого паводка, м$^3$.

Объем селя любого типа при наличии данных наблюдений за селями приближенно может быть определен по формуле

$$V_c = 0,5 \cdot Q_{\max} \cdot T, \tag{2}$$

где $Q_{\max}$ – максимальный расход селя, м$^3$/с; $T$ – продолжительность селя, с.

© Разакова М.Г., Кузьмин А.Г., Айнакулов Ж.Ж., Федоров И.О., Ергалиев Р.К., 2019

Для выявления общих закономерностей возникновения и развития катастрофических селей и обвалов необходимо комплексное детальное изучение всей территории, охваченной процессом. Основными методами получения информации при проведении исследований являются полевые наблюдения. Наиболее важные результаты полевых исследований – количественные оценки, такие как объемы селевых выносов, морфометрические показатели и др. Изучение труднодоступного и удаленного объекта производилось дистанционными методами с использованием аэрофотоснимков в предгорье Иле Алатау на высоте 1 600 м над уровнем моря. Преобладающие объемы селевых выносов обычно образуются за счет моренных и аллювиально-пролювиальных накоплений [3].

В данной работе авторами предложен альтернативный метод расчета $V_c$, $V_k$, $V_t$, $V_p$ на основе построения цифровой модели местности (ЦММ) по данным аэрофотосъемки.

Аэросъемка исследуемой местности производилась беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), гексакоптером. Предварительно выполнялись полевые топографо-геодезические работы для расстановки на местности опознавательных знаков, на которых производились планово высотные измерения. Выделены зоны аккумуляции селевых отложений, классифицированы неоднородности структуры селя, в нашем случае преобладала грязекаменная селевая масса, разбросанная на несколько километров, построен микрорельеф поверхности селевого русла. Селевые отложения были незначительными в виде грязекаменной массы по руслу реки. По территории прохождения сели основная масса селевого выноса пришлась на оползень. Посчитанный объем насыпи, образовавшейся в результате произошедшего оползня, по цифровой модели местности совпал с наземными измерениями.

Для выявления структурных и топографических особенностей территории оползневых процессов были использованы методы фотограмметрии, геоинформационные технологии построения изолиний высот, уклоны, вычисления объемов и т.д.

Проведена большая работа по информационному и аналитическому обеспечению такого природного явления как оползень.

**Методы исследования.** Одним из этапов распознавания и фиксации оползня был космический мониторинг. Чтобы изучить причинно-следственные параметры процесса возникновения оползней, характерные для данной местности, были привлечены в первую очередь данные дистанционного зондирования (ДДЗ). На начальном этапе ДДЗ анализировались для обнаружения изменений земной поверхности или характерных признаков оползневых процессов, таких как сползания грунта, обнажения почв [4].

Был произведен общий обзор местности и выполнена съемка с БПЛА камерой Sony NEX-5N участка, где прошел сель. Съемка производилась с высоты 200 м над уровнем поверхности (грунта). Классификация высотных данных основана на ранжировании цветовой гаммы от синего до красного. Высокое пространственное разрешение ЦММ позволяет нам говорить о микрорельефе, выделяются локальные формы рельефа, такие как насыпи, наносы и т.д. Традиционными методами для расчета характеристик грязекаменных селевых потоков гляциального происхождения селевое русло (от наиболее крупного ледника до расчетного створа) разбивается на 10–20 характерных участков таким образом, чтобы примерно половина из них находилась на углах свыше 6°. Длина расчетного участка может изменяться от 300 до 2 000 м. Расчет производится последовательно по участкам [2].

**Результаты.** По материалам съемки был построен ортофотоплан в видимом спектре длин волн и получена цифровая модель местности (ЦММ). Пространственное разрешение ортофотоплана 5 см и ЦММ 12 см (рис. 1). В месте, где произошел оползень, образовалась насыпь, контур выделен красным цветом на рис. 2. Для вычисления объема насыпи была построена поверхность по наземным точкам контура насыпи и выделена высотная поверхность насыпи (рис. 3). В результате мы получили объемное представление тела насыпи (рис. 4).

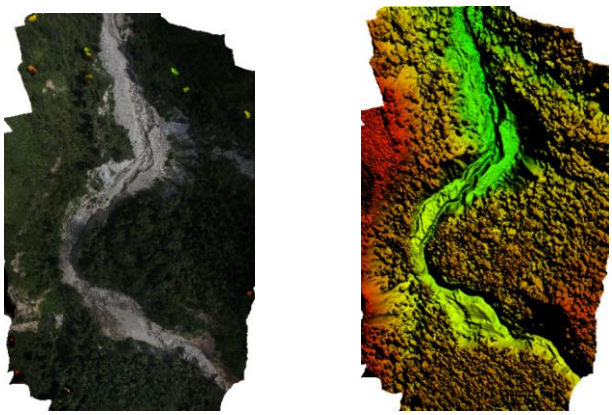


Рис. 1. Ортофотоплан и ЦММ в цветной палитре по данным съемки с БПЛА территории, где произошел оползень 14 мая 2018 г.

Рис. 2. 3D-изображение фрагмента ЦММ, полученного по аэросъемке

Рис. 3. 3D-изображение фрагмента ЦММ с поверхностью по наземным точкам контура насыпи и файл высот с выделенной поверхностью насыпи

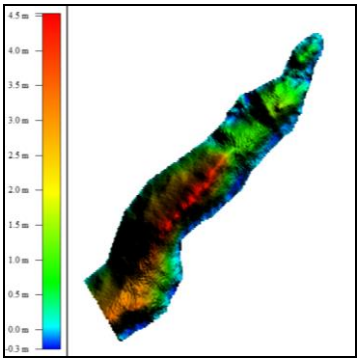



Рис. 4. Файл высот по выделенной поверхности насыпи

Объем насыпи был рассчитан геоинформационными методами, суммированием попиксельно составляющих трехмерной фигуры и составил 713, 5 м$^3$ [5]. Рассчитанный объем по данным аэросъемки и наземными измерениями [6] совпал.

**Заключение.** Так как селевые оползни угрожают близлежащим населённым пунктам, необходимо проводить их постоянный мониторинг в сезонно влажные периоды. С помощью аэрофотосъемки с БПЛА можно наблюдать динамику движения и распространения селевых оползней. Детальная съемка позволяет в дальнейшем выдавать рекомендации для мероприятий по укреплению мест прохождения селевых потоков, для предотвращения их пагубного воздействия на места проживания населения. Оценивать ущерб и разрушительные последствия для населённых пунктов. На середину 2018 г. были нами оцифрованы и занесены в ГИС все строения близлежащего дачного поселка Коклайсай.

**Список литературы**

1. СП 33-101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 73 с.

2. П-814–84. Рекомендации по проектированию противоселевых защитных сооружений. Гидропроект. М.: Гидропроект, 1985. – 112 с.

3. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана / А.Р. Медеу, В.П. Благовещенский, Т.А. Баймолдаев [и др.]. Алматы: Институт географии, 2018. Т. 2. Ч. 2. Основы мониторинга в Иле Алатау. 288 с.

4. Methodical aspects of using aerospace data for monitoring hazardous natural phenomena / M.G. Razakova, A.G. Kuzmin, Zh.Zh. Ainakulov [et al.] // Abstracts of International Symposium on Water and Land Resources in Central Asia. 9–11 October 2018. Almaty, Kazakhstan, 2018. 1 p. (Организаторы: GFZ – German Research Centre for Geosciences, German-Kazakh University, University of Würzburg).

5. Кутырев В.Ф. Вычисление объема средствами MapINFO Professional // Геопрофи. 2008. № 3. С. 53–54.

6. Васьков И.М. К вопросу о методологии и методах изучения гляциальных селей и их генезиса. // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: материалы IV Междунар. конф. Россия, Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия). 6–10 сентября 2016 г. С. 28–36.

УДК 004.021

**Н.К. Резник, А.П. Раевич**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: natashenka.reznik@list.ru, raevich.ap@yandex.ru

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧАХ ДЕШИФРАЦИИ ДАННЫХ

Исследование онтологического подхода в задачах дешифрации данных рассмотрено на основе профиля абонента мобильных сетей. Для извлечения знаний из данных описаны методы, применяемые в онтологии. Помощником в представлении профиля абонента служит методика, в которую входит описание подробного алгоритма в выявлении таксономии онтологического толкового словаря для построения онтологии.

*Ключевые слова: онтология, ручной метод сбора элементов для онтологии напрямую, экономичный подход, таксономия онтологического словаря, методика.*

Онтологии используются для описания знаний о некоторой предметной области. Онтология описывает понятия предметной области, а также отношения, которые имеются между этими понятиями [1].

Существует две разновидности методов построения онтологии: автоматические и ручные.

Метод, применяемый для построения данной онтологии – ручной метод. Он заключается в том, что элементы для онтологии можно собирать напрямую. При таком подходе сначала собираются и классифицируются понятия, а затем происходит добавление соответствий между понятиями и лексиконом.

Метод ручного построения онтологии включает в себя четыре вида подходов для выделения концептов: экономичный подход, неэкономичный подход, сбор элементов для онтологии напрямую и использование микротеорий.

Для описания данной онтологии использовался подход сбора элементов напрямую. Этот подход позволяет собрать понятия, описывающие профиль абонента мобильной сети в содействии с экспертами в данной области. Поскольку метод построения онтологии выбран ручной, для более легкого обнаружения связности понятий, простоты определения и осуществления умозаключения также использовался экономичный подход. Его суть заключается в том, чтобы создавать малое количество элементарных концептов, семантически простых, с помощью которых можно объяснить значение более сложных понятий. Количество таких концептов не превышает 100, и их значения универсальны для всех языков [2].

Описание портрета абонента начинается с выявления понятий и их классификации, рассматриваемой с точки зрения смысла. Выявленный список терминов составляет онтологический толковый словарь. Построение онтологии осложняется уровнем сложности формализации предметной области. В соответствии с данной сложностью профиль абонента может состоять из объектов разного уровня. Объекты разной сложности могут составлять группы объектов или другие объекты. Иначе говоря, сложный объект может состоять из менее сложных. Таким образом образуется иерархия.

Иерархия определяется следующим образом: на самом верхнем уровне располагаются крупные объекты, они состоят из более мелких и т.д. Такая иерархия называется таксономией.

© Резник Н.К., Раевич А.П., 2019

Таксономия – теория классификации и систематизации сложноорганизованных областей действительности, имеющих обычно иерархическое строение [3].

Онтология состоит из отдельных индивидов, свойств и классов.

Индивиды представляют собой конкретные объекты интересующей предметной области. В онтологии не используется предположение об уникальности имен. Это означает, что два разных имени могут фактически ссылаться на один и тот же индивид, если явно неуказано обратное. К примеру «Telegram Messenger», «Telegram» и «Мессенджеры» могут обозначать одно и то же приложение.

С точки зрения таксономии индивиды являются менее сложными объектами и расположены на самом нижнем уровне иерархии. Сбор данных для построения профиля абонента мобильных сетей произведен с помощью подхода «сбор элементов для онтологии напрямую» в содействии с экспертами в области мобильных сетей. Выявленные индивиды представлены в хаотичном порядке на рис. 1.

Рис. 1. Индивиды предметной области «Мобильный оператор»

Для построения таксономии необходимо выявить верхние уровни иерархии, которыми являются классы. Для этого определяются свойства, по которым идет поиск индивидов, относящихся в одной структуре. Например, свойство «is_голосовой трафик» связывает индивиды «Направление звонка» и «Номер, с которого звонили» и может отнести его к одному классу.

Классы интерпретируются как множества, элементами которых являются индивиды. В таксономии классы являются более сложными объектами и расположены на самом верхнем уровне иерархии.

Во время исследования предметной области «Мобильный оператор» определены следующие классы концептов:

- внешние источники;
- голосовой трафик;
- количественные и качественные показатели;

- устройства;
- интернет-трафик;
- общая информация, которая собирается при регистрации клиента.

На рис. 2 изображена простая таксономия, представляющая собой иерархическую систему понятий, связанных между собой отношением «is_a», что означает «быть элементом класса», или «быть подклассом класса».

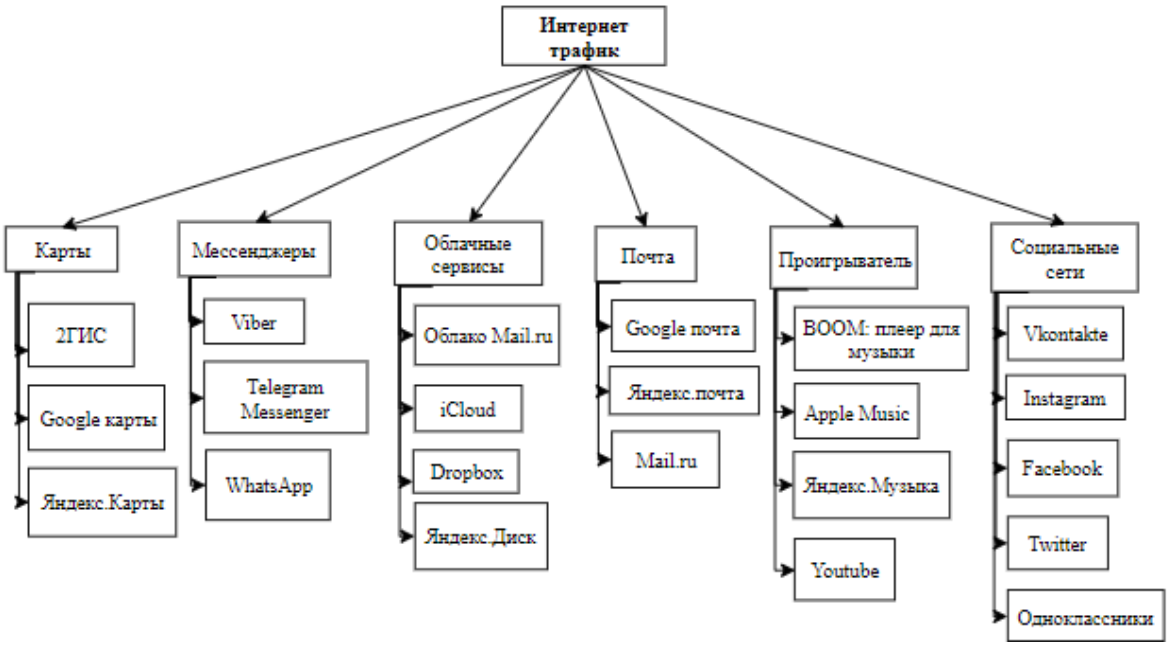



Рис. 2. Таксономия класса «Интернет-трафик»

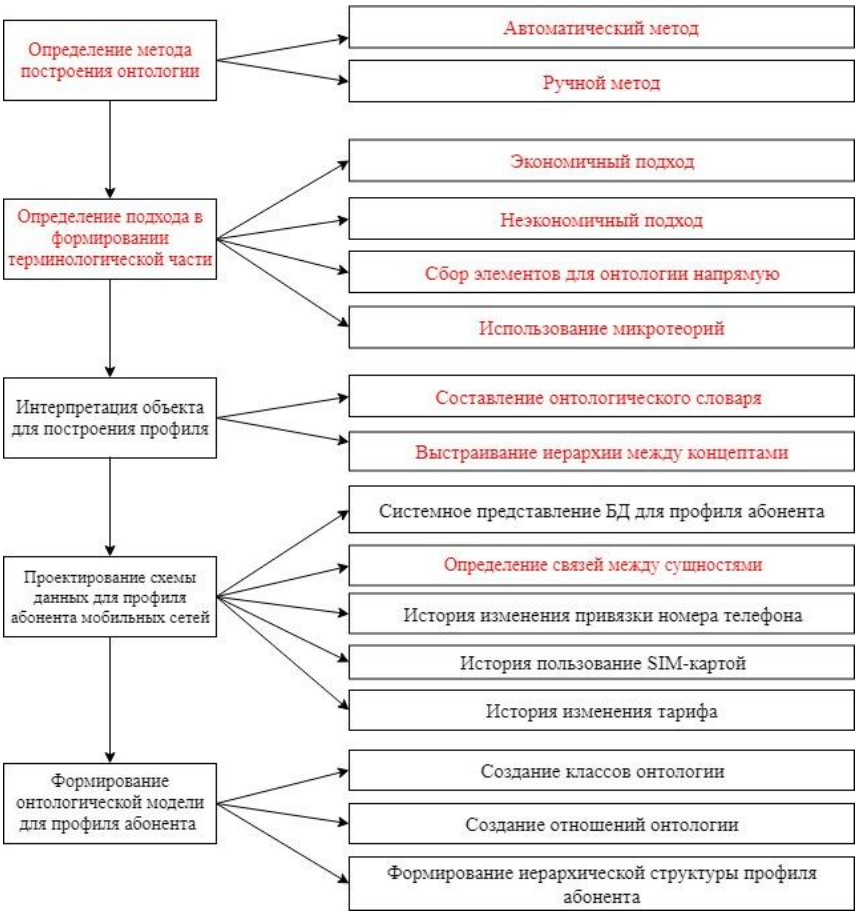



Рис. 3. Блок-схема методики построения онтологии для профиля абонента мобильных сетей

После определения онтологического словаря предметной области концепты представляют в виде схемы данных с выделением сущностей, входящих в них атрибутов, и связей между ними. Разработанная схема данных напрямую переносятся в онтологию посредством создания классов и отношений, что позволяет видеть профиль абонента на уровне онтологии и БД из онтологии.

**Заключение**. Совместное применение подхода сбора элементов для онтологии напрямую и экономичного подхода при исследовании ручного метода построения онтологии позволяет решить задачу дешифрации данных, продемонстрированной на примере построения портрета абонента мобильных сетей. Извлечение данных является начальным этапом в разработанной методике построения онтологии для профиля мобильных сетей (рис. 3).

**Список литературы**

1. Цуканова Н.И. Онтологическая модель представления и организации знаний: учеб. пособие для вузов // Горячая линия – Телеком, 2015. 272 с.

2. Митрофанова О.А., Константинова Н.С. Онтологии как системы хранения знаний // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. 54 с.

3. Большая советская энциклопедия. URL: https://classes.ru/all-russian/russian-dictionary-encycl.htm/.

УДК 004.627

**А.Ж. Саринова, А.М. Амангелді**

Магистр, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова.
Павлодар, Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

# ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОТЕРЯМИ

Работа посвящена описанию подготовительной обработкb для сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений (АИ) на основе дискретных ортогональных преобразований с целью последующего сжатия в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассмотрены двумерное вейвлет-преобразование Хаара гиперспектральных АИ, вейвлет-преобразование Добеши. Проведенные исследования продемонстрировали, что предложенные алгоритмы с потерями имеют эффективность, достаточную для использования, и могут быть применены при сжатии гиперспектральных данных ДЗЗ в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

*Ключевые слова:* гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, дискретные преобразования, степень сжатия, дискретно-косинусное преобразование, вейвлет Хаара, преобраование Добеши.

**Возможные этапы подготовительных обработок гиперспектральных АИ:**

1. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения вейвлет-коэффициентов, на примере одномерного и двумерного вейвлета Хаара [1–3].
2. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения вейвлет-коэффициентов, на примере одномерного вейвлета Добеши [4–7].
3. Преобразование полученных структур данных на основе этапов 1–3 путем квантования вейвлет-коэффициентов.
4. Использование стандартных критериев качества восстановленных изображений.
5. Сжатие полученных структур этапа 4 одним из стандартных энтропийных алгоритмов.

**Двумерное вейвлет-преобразование Хаара гиперспектральных АИ.** Один из способов получения двумерного вейвлет-преобразования изображения размером $2^m \times 2^n$ заключается в том, чтобы сначала применить одномерное вейвлет-преобразование к каждой из $2^m$ строк каналов гиперспектральных АИ, а затем применить одномерное вейвлет-преобразование к каждому из $2^n$ столбцов.

Первый способ заключается в том, чтобы сначала преобразовывались строки изображения, а затем столбцы изображения с преобразованными строками.

Итак, один из способов получения двумерного вейвлет-преобразования изображения размером $m \times n$ заключается в том, чтобы сначала применить одномерное вейвлет-преобразование к каждой из $m$ строк, а затем применить одномерное вейвлет-преобразование к каждому из $n$ столбцов .

Рассмотрим на примере фрагмент гипеспектрального АИ:

© Саринова А.Ж., Амангелді А.М., 2019

$$I[m,n,k]=\begin{pmatrix} 128 & 123 & 0 & 105 \\ 0 & 105 & 0 & 105 \\ 128 & 121 & 128 & 121 \\ 0 & 103 & 128 & 121 \end{pmatrix}.$$

Применения одномерное вейвлет-преобразование Хаара к первой строке, значения коэффициентов аппроксимации и различия вычисляются по формулам:

$$a_1=\frac{128+0}{\sqrt{2}},\quad a_1=\frac{123+105}{\sqrt{2}},\quad d_1=\frac{128-0}{\sqrt{2}},\quad d_1=\frac{123-105}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично к остальным строкам матрицы $I[m,n,k]$ применяется одномерное вейвлет-преобразование Хаара. В результате получается новая матрица, первые два столбца которой содержат значения коэффициентов аппроксимации каждой строки, а последующие два столбца – значения коэффициентов различия.

**Вейвлет-преобразование Добеши.** Приведем описание преобразования Добеши в применении к гиперспектральным аэрокосмическим изображениям. Методы вейвлет-кодирования изображений Добеши сочетают в себе использование вейвлетов Хаара и такие понятия как, взвешенное среднее и взвешенную разность.

Введем некоторые обозначения для формирования коэффициентов вейвлета Добеши:

- коэффициенты вейвлетов Добеши $c_0, c_1, c_2, \ldots, c_{N-1}$;
- оператор $L_n$ – низкочастотный фильтр;
- оператор $H_n$ – высокочастотный фильтр;
- массив низкочастотных и высокочастотных вейвлет-коэффициентов $(L_n x)_i$, $(H_n x)_i$;
- коэффициентами вейвлета Добеши являются

$$C1=\frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\quad C2=\frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\quad C3=\frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\quad C4=\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

Рассмотрим детализацию этапов преобразования значений канала гиперспектрального АИ **I**[*m, n, k*] на основе вейвлета Добеши.

**Квантование вейвлет-коэффициентов.** В рассмотренных вышеописанных вейвлет-преобразованиях каналы гиперспектральных АИ были разделены на два фильтра: низкочастотный (НЧ) и высокочастотный (ВЧ). В качестве фильтров применялись вейвлеты Хаара (одномерное и двумерное преобразование) и вейвлет Добеши.

После вейвлет преобразований высокочастотные составляющие гиперспектральных АИ подвергаются квантованию (округлению) или близких к 0 значений – обнулению, которая впоследствии кодируется. Эффективность применения вейвлет преобразования в том, что вейвлеты Хаара и Добеши являются подготовительной обработкой данных для представления более компактного представления данных и последующего сжатия. Уровень потерь регулируется шагом квантования.

Шаг 1. На основе исходного изображения, найденных НЧ и ВЧ фильтров расчитываются матрицы линейного квантования для одномерного вейвлета Хаара, двумерного Хаара и Добеши: $I^{\Psi}_{Haar\,I}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$, $I^{\Psi}_{HaarII}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$, и

$I_{Db}^{\Psi}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$, где $h$ – это шаг квантования. Результат сохраняем в матрицы $I_{Haar\,I}^{\Psi}{}'[m,n,k]=\dfrac{I'[m,n,k]}{h}$

Шаг 2. На основе квантованных матриц $I_{Haar\,I}^{\Psi}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$, $I_{HaarII}^{\Psi}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$, и $I_{Db}^{\Psi}[m,n,k]=\dfrac{I[m,n,k]}{h}$ формируем преобразованные изображения. Результат сохраняем в матрицы $I_{Haar\,I}^{\Psi}[m,n,k]$

**Проведение сравнительных характеристик с использованием метрик качества.** Проведены сравнительные характеристики производительности сжатия с точки зрения пикового отношения сигнала к шуму, *peak signal-to-noise ratio* (*PSNR*).

Рассмотрим детализацию расчет *PSNR*:

Введем некоторые дополнительные обозначения:

- среднеквадратическое отклонение (СКО);
- массивы восстановленных изображений $\hat{I}_{m,n}$;
- одномерные массивы $\mathbf{I}'_{CKO}[m,n,k]$;
- одномерные массивы $\mathbf{I}'_{PSNR}[m,n,k]$.

Шаг 1. Рассчитаем на основе исходного и восстановленного изображений матрицы для вычисления СКО:

$$\text{СКО}=\frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left(I_{m,n}-\hat{I}_{m,n}\right)^2}{M\cdot N},$$

где $I_{m,n}$ – значение *m, n*-го пикселя оригинального изображения; $\hat{I}_{m,n}$ соответствует значению *m, n*-го пикселя восстановленного изображения; *M, N* – размеры изображения. Результаты сохраним в одномерный массив $\mathbf{I}'_{CKO}[m,n,k]$

Шаг 2. Вычислим на основе СКО, *PSNR*: *PSNR* = 10 $lg_{10}$ (max[$I_{m,n}$]$^2$ / СКО). Результаты поместим в одномерный массив $\mathbf{I}'_{PSNR}[m,n,k]$.

На основе рассчитанных метрик качества исходного и восстановленного изображения проанализировано качество восстановленных гиперспектральных АИ.

**Заключение.** Основным достоинством данной метрики является охват всего изображения при подсчете значения, а не конкретной локальной области (частотной или временной). Данный критерий является сложной задачей, возникающей во многих областях, связанных с обработкой сжатия изображения.

**Список литературы**

1. Ouahioune mohand, Akrour leila, Lahdir mourad, Ameur soltane. Aviris Hyperspectral Images Compression Using 3d Spiht Algorithm. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, www.iosrjen.org. October 2012. Vol. 2, is. 10. P. 31–36.

2. Lossless compression of hyperspectral images using adaptive prediction and backward search schemes // Journal of Information Science and Engineering. 2011. № 27. P. 419–435.

3. Jordi Muñoz-Marí, Maciel Zortea, Ian Blanes, Vicente González-Ruiz, Gustavo Camps-Valls, Antonio Plaza. On the Impact of Lossy Compression on Hyperspectral Image Classification and Unmixing. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 8, NO. 2, MARCH 2011. Fernando García-Vílchez.

4. Emmanuel Christophe. Hyperspectral Data Compression Tradeoff. Augmented Vision and Reality, 3, DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

5. Lossless multispectral & hyperspectral image compression. CCSDS Recommended standard for lossless multispectral & hyperspectral image compression. Recommended Standard, Issue 1. CCSDS Secretariat. Space Communications and Navigation Office, 7L70. NASA Headquarters. Washington, DC 20546-0001, USA. May 2012. 52 p.

6. Mary Sindhuja N.M., Arumugam A.S. Spiht based compression of hyper spectral images // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. October 2013. Vol. 2, is. 10.

7. Compression of hyperspectral image using discrete wavelet transform and walsh hadamard transform / D.S. Sujithra, T. Manickam, D.S. Sudheer // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE). March 2013. Vol. 2, is. 3. ISSN:2278 – 909X.

УДК 004.627

**А.Ж. Саринова, Г.Е. Егамкулова**

Магистр, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
Павлодар, Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Работа посвящена описанию разработки алгоритмов сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений (АИ) на основе дискретных ортогональных преобразований с целью последующего сжатия в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве алгоритмов сжатия, необходимого для сокращения объема передаваемой информации, предлагается использование разработанных методов сжатия на основе преобразований Уолша – Адамара и дискретно-косинусного преобразования. В работе рассмотрена методика разработки алгоритмов сжатия с потерями и высоким качеством при восстановлении, с учетом которой разработан адаптивный алгоритм для сжатия гиперспектральных АИ и сгенерированной таблицей квантования. Проведенные исследования показали, что предложенные алгоритмы с потерями имеют эффективность, достаточную для использования и могут быть применены при сжатии гиперспектральных данных ДЗЗ в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

*Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, дискретные преобразования, степень сжатия, дискретно-косинусное преобразование Уолша – Адамара.*

**Введение.** Гиперспектральные АИ ДЗЗ необходимы для мониторинга природных ресурсов и последствий чрезвычайных ситуаций и т.д. В настоящее время разработка программных систем для сжатия с потерями данных является актуальной задачей. В решении данной задачи существуют различные направления исследования, в которых активно ведутся исследования в области разработки алгоритмов сжатия [1–8]. Алгоритмы и способы сжатия с потерями данных охватывают широкий спектр сжатия. Среди них наиболее распространенными являются ортогональные и вейвлет-преобразования, алгоритм сжатия JPEG.

Проведенный анализ существующих и отдельно разработанных алгоритмов и методов сжатия гиперспектральных АИ с потерями позволяет определить основные направления исследования в области построения эффективных алгоритмов сжатия для решения задачи сжатия и применения в обработке гиперспектральных АИ:

- дискретные преобразования;
- вейвлет- и ортогональные преобразования;
- оценка критериев качества восстановленных изображений с использованием метрик качества PSNR, MSE, PMSE и др.;
- на этапе сжатия полученных преобразований: адаптивное арифметическое кодирование и алгоритм Хаффмана.

**Этапы алгоритма сжатия.** Разработаны алгоритмы обработки гиперспектральных АИ с потерями на основе дискретных преобразований. Последовательность этапов следующая.

1. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, значения коэффициентов на основе Уолша – Адамара трех уровней.

© Саринова А.Ж., Егамкулова Г.Е., 2019

2. Оригинальное преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения коэффициентов, на основе дискретно-косинусного преобразования с генерированной таблицей квантования.

3. Преобразование полученных структур данных на основе этапов 1–2 путем сгенерированной таблицы квантования коэффициентов.

4. Использование стандартных критериев качества восстановленных изображений.

5. Сжатие полученных структур этапа 4 одним из стандартных энтропийных алгоритмов.

6. Экспериментальное исследование алгоритмов преобразования по степени сжатия и качеству восстановленных данных.

**Результаты экспериментов.** Показатели степеней сжатия в разрезе количества каналов ортогональных преобразований Уолша – Адамара, ДКП и JPEG 2000 Lossy представлены на рис. 1. Показано, что ДКП преобладает над преобразованием Уолша-Адамара и JPEG Lossy в степени сжатия при высоком качестве восстановленных изображений. Как видно из рис. 1, показатели степеней сжатия ДКП с потерями превосходят в степени сжатия преобразования Уолша – Адамара и компрессора JPEGLossy.

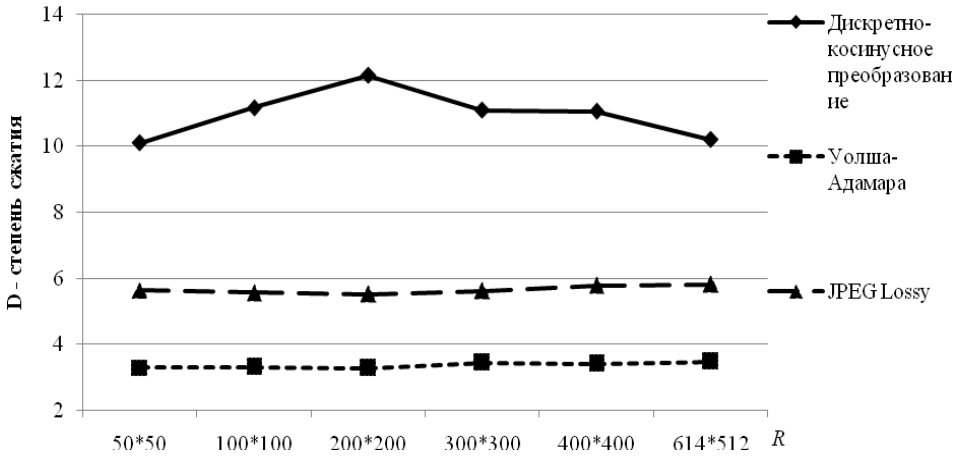



Рис. 1. Алгоритмы сжатия R от D

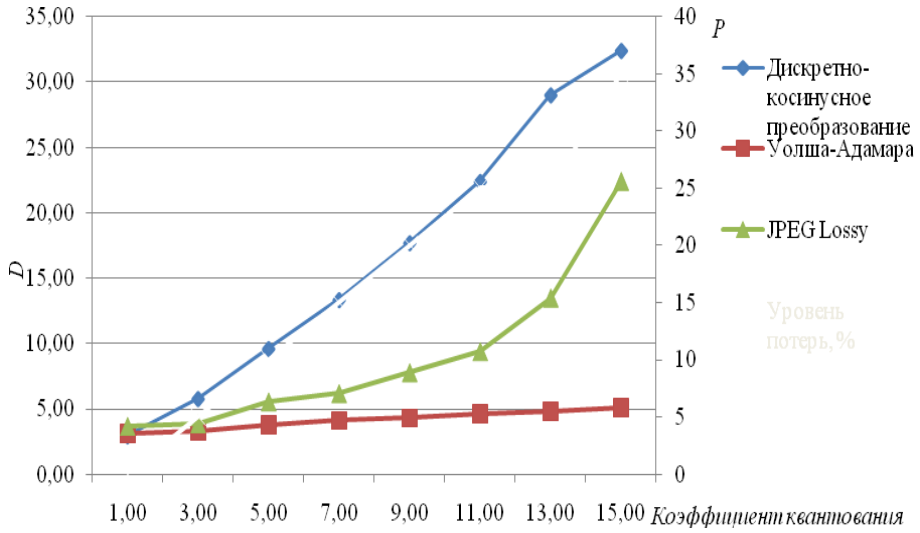



Рис. 2. Зависимости Quant от D, P

На рис. 2 показаны преобразования при различном уровне потерь в %, из которого видно, что при увеличении коэффициента квантования степень сжатия возрастает. Алгоритмы преобразований по степени сжатия *D* и уровнем потерь *P* при *K* = 100.

Показатели метрик качества восстановленных изображений были определены с помощью *PSNR* и *SKO*. Степень искажения сравнивает соотношение между сжатием и искажением в алгоритмах с потерями. Оценка определяется как среднее значение числа бит, необходимого для представления каждого пиксела. Измеряется в битах на пиксел (bpp – bits per pixel). Искажение обычно измеряется с помощью PSNR. На рис. 3 приведена зависимость *PSNR* от степени сжатия *D*. На рис. 3 приведена зависимость *PSNR* от *D* для ДКП и преобразования Уолша – Адамара.

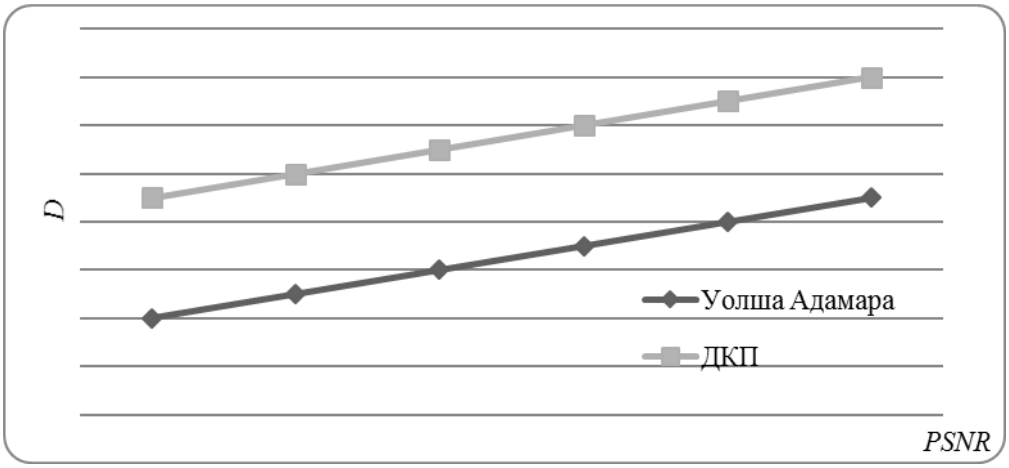



Рис. 3. Зависимость *PSNR* от *D*

**Выводы:**

- разработка алгоритмов на основе дискретных преобразований позволяет повысить степень сжатия до (*R* = 12);
- предлагаемый подход с потерями определяется в адаптивных преобразованиях, основанных на преобразовании Уолша – Адамара, дискретно-косинусного преобразования и сгенерированной таблицы квантования и последующего адаптивного кодирования;
- полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ с помощью полученных коэффициентов позволяют предположить эффективность применения данных исследований с адаптивным кодированием Хаффмана;
- сравнение критериев качества с помощью стандартных метрик качества позволяют отметить, что гипеспектральные АИ восстановлены с высоким качеством и минимальными потерями.

**Список литературы**

1. Sujithra D.S., T. Manickam, D.S. Sudheer. Compression of hyperspectral image using discrete wavelet transform and walsh hadamard transform // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering. 2013. Vol. 2 (3). P. 314–319.

2. Emmanuel C. Hyperspectral data compression tradeoff. Optical remote sensing // Augmented Vision and Reality. 2011. № 3. P. 9–29. DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3.

3. Keerthana P., Sivasankar A. The impact of lossy compression on hyperspectral data adaptive spectral unmixing and PCA classification // International Journal of Science and Modern Engineering. 2013. Vol. 1 (7). P. 35–37.

4. Analysis of lossy hyperspectral image compression techniques / S.M. Ramesh, P. Bharat, J. Anand, J. AnbuSelvan // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2014. Vol. 3 (2). P. 302–307.

5. Poonam and R.S. Chauhan. Compression and Classification of Hyperspectral Images using an Algorithm based on DWT and NTD // Advance in Electronic and Electric Engineering. 2013. Vol. 3 (4). P. 447–456.

6. Kai-Jen Cheng, Jeffrey C. Dill. An Improved EZW Hyperspectral Image Compression. School of Electrical Engineering and Computer Science, Ohio University, Athens, USA // Journal of Computer and Communications. 2014. № 2. P. 31–36.

7. Aviris Hyperspectral Images Compression Using 3d Spiht Algorithm / M. Ouahioune, L. Akrour, M. Lahdir, S. Ameur // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, www.iosrjen.org Volume 2, Issue 10 (October 2012). P. 31–36.

8. Dubey V., Dubey R. A new set partitioning in hierarchical (SPIHT) algorithm and analysis with wavelet filters // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075. 2013. Vol. 3, is. 3.

УДК 004.627

**А.Ж. Саринова, Н.Ш. Есенбай**

Магистр, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
Павлодар, Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

# АЛГОРИТМ СЖАТИЯ БЕЗ ПОТЕРЬ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЁТОМ КОРРЕЛЯЦИИ И ГРУППИРОВКИ КАНАЛОВ

Проанализированы существующие решения задачи сжатия без потерь для гиперспектральных аэрокосмических изображений. На их основе предложен алгоритм сжатия с учетом межканальной корреляции, отличающийся преобразованием данных с уменьшением диапазона значений исходных значений путём формирования набора групп каналов с высокой внутри групповой корреляцией соответствующих пар с подбором оптимальных параметров. Приведены результаты сравнительных экспериментов предлагаемого алгоритма сжатия на данных системы ДЗЗ AVIRIS в сравнении с наиболее распространенными архиваторами Winrar, 7Z, JPEG Lossless с варьированием степени сжатия, геометрического размера изображения, количества каналов, количества групп каналов. При этом найдены их параметры, позволяющие получать лучшие результаты в степени сжатия.

*Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, междиапазонная корреляция, степень сжатия, группы каналов.*

**Введение.** Современные спутниковые центры космического мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оперативно принимают, регистрируют, обрабатывают, архивируют и распространяют большие объемы данных, составляющие порой сотни гигабайт [1]. На современном этапе развития науки активно исследуются гиперспектральные АИ. В работах [2–5] установлено отличие между видами АИ, определены задачи их применения в ДЗЗ. Аэрокосмические изображения (АИ) ДЗЗ обладают различными характеристиками – спектральным, радиометрическим, пространственным разрешениями, геометрическими размерами сцены. АИ ДЗЗ подразделяются на панхроматические, мультиспектральные и гиперспектральные изображения. Панхроматические АИ называют однозональными изображениями, полученными в оттенках серого цвета.

Мультиспектральные АИ представляют собой множество нескольких изображений электромагнитного спектра одной и той же сцены, количество которых может варьироваться от трех и более. Отличительной особенностью гиперспектральных АИ является узкая ширина спектральных полос, большое количество регистрируемых каналов и наличие высокой спектральной корреляции между каналами. Таким образом, гиперспектральные АИ характеризуются тремя признаками: спектральное разрешение, количество каналов и межканальная корреляция. Данные признаки были изучены отдельно, что позволяет предположить их взаимодействие. Поэтому, одной из ключевых задач в области ДЗЗ является архивирование гиперспектральных АИ с целью повышения эффективности передачи данных по каналам связи ограниченной пропускной способности и их сжатия.

В области сжатия гиперспектральных АИ уже имеются интересные результаты исследований, в которых представлены различные подходы с учетом межканальной корреляции. Приведем некоторые из них.

© Саринова А.Ж., Есенбай Н.Ш., 2019

Гашниковым М.В. [6] предложен эффективный алгоритм аппроксимации спектральных компонент АИ, хорошо приспособленный для использования HGI-компрессии при решении задачи хранения гиперспектральных изображений. Степень сжатия без потерь с погрешностью 0 = 3,6.

Предложен алгоритм с использованием гибридно-контекстного предсказания [7]. Предлагаемая схема сжатия состоит из этапа декорреляции и энтропийного кодирования. Этап прогнозирования декорреляции поддерживает внутриканальное и межканальное предсказание. Внутриканальное (пространственное) предсказание использует модель, где среднее значение предсказателя контекста является эффективным. Межканальное прогнозирование использует гибридное контекстное предсказание для групп каналов. Остаточное изображение гибридного предсказания контекста кодируется арифметическим кодированием. Алгоритм имеет степень сжатия [2,55:3,19].

Предложен алгоритм, основанный на третьем порядке межканального предсказателя и обратной схемы поиска пикселей [8]. В частности, предлагается адаптивный алгоритм порогового поиска и модифицированного пространственно-спектрального предсказателя, который способен захватить большую часть корреляции, выполняя два раза поиск в текущем диапазоне. Каналы разделяются на группы в зависимости от коэффициента корреляции смежных каналов, а потом, алгоритм переупорядочения применяется к каждой группе. Метод предсказания использует сходство структур и отношение пикселей между двумя соседними спектральными каналами и далее кодируется адаптивным арифметическим кодированием. Предлагаемая схема сжатия производит среднюю степень сжатия – 3,92.

Предлагается новая технология нахождения высокой корреляции групп каналов на основе группы квадрата корреляции [9]. Метод зависит от расчета спектральной корреляционной матрицы для обнаружения коррелированной глобальной группы каналов. Перегруппировка каналов и их поиск позволяет определить группы каналов, которые высоко коррелируют друг с другом. Предлагаемая технология имеет средний коэффициент сжатия, достигающий 4,3.

Рассмотрен алгоритм спектрально-ориентированных наименьших квадратов (SLSQ) [10-11]. Реализованы два подхода к совершенствованию сжатия SLSQ – это упорядочение и кластеризация каналов. Первый подход упорядочивает каналы с учетом межканальной корреляции до процесса сжатия. Второй подход основан на кластеризации, что индивидуализирует набор каналов, который эффективно сжимается двумерным межканальным предсказателем. SLSQ использует межканальную интеллектуальную структуру для всех групп, но за исключением подмножества каналов, называемыми внутриканальным набором. SLSQ алгоритм не является эффективным с точки зрения степени сжатия, достигающий лишь 3,2.

Несмотря на большое внимание исследователей к задаче сжатия гиперспектральных АИ, до сих пор недостаточно исследований о способах сжатия, эффективно повышающих степень сжатия. Исходя из этого, следует, что предлагаемые способы учета межканальной корреляции в алгоритмах сжатия не учитывают основной факт того, что один или более последовательных подмножеств групп каналов гиперспектральных АИ имеющие высокую спектральную корреляцию, могут не иметь высокую корреляцию из-за шума и других факторов. Поэтому предоставляется возможность использовать этот факт для того, чтобы улучшить сжатие.

**Описание алгоритма сжатия.** Предложен алгоритм сжатия с учетом межканальной корреляции, отличающийся преобразованием данных, позволяющий уменьшить размеры каналов изображения и преобразовать их перед сжатием. В результате степень сжатия обработанных каналов гиперспектральных АИ предложенным алгоритмом стала значительно выше. Также были приведены некоторые результаты исследования степеней сжатия по количеству сформированных групп каналов.

Последовательность этапов алгоритма:

- расчет корреляционной матрицы между каналами АИ, нахождение во всех возможных парах сочетания каналов и их упорядочивания, подлежащих вычитанию;
- индексированное кодирование – это новый способ кодирования, уменьшающий диапазон гиперспектральных АИ. За счет применения индексации повышается степень сжатия, так как индексы лежат в небольшом диапазоне, которые эффективно сжимаются энтропийным кодированием.
- сжатие статистическим алгоритмом.

**Результаты экспериментов.** На рис. 1 представлены алгоритмы сжатия при варьируемом количестве каналов и геометрическим размере (50×50) в сравнении с универсальными архиваторами Winrar, 7Z и JPEG Lossless. Показатели степени сжатия D на 25 % и выше, чем универсальные алгоритмы, за счет поиска главного канала, определяющего очередность сжатия каналов и учетом межканальной корреляции, индексированного кодирования.

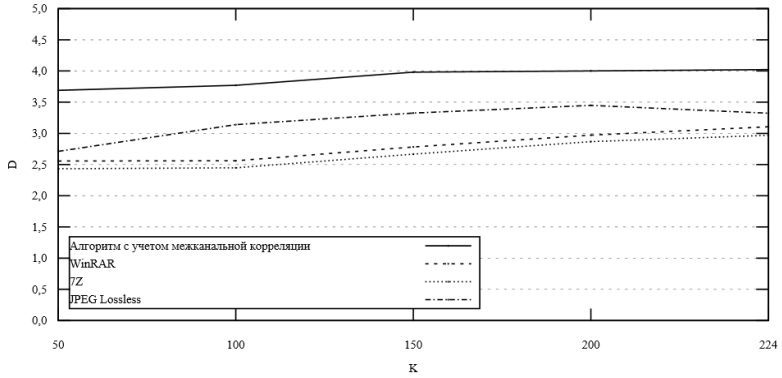



Рис. 1. Алгоритмы сжатия без потерь по K

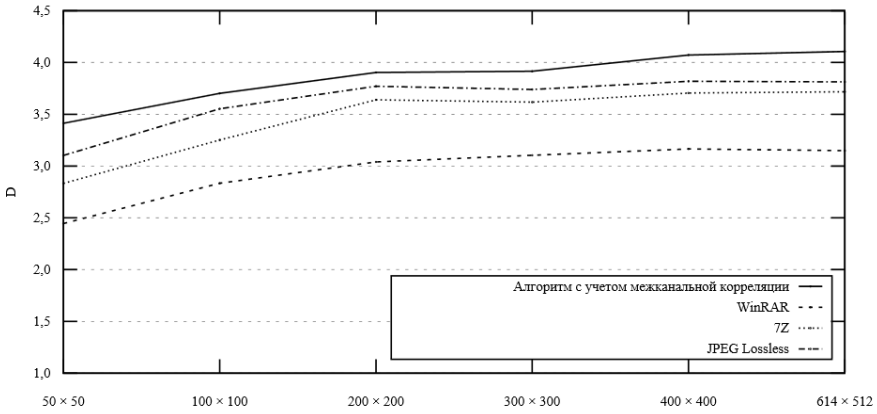



Рис. 2. Алгоритмы сжатия без потерь по R

Для повышения эффективности применяемого алгоритма проведены эксперименты по следующим параметрам: *Cor* – заданное значение корреляции; *N* – номер группы каналов АИ; *R* – размер каналов АИ; *K* – количество каналов в группе *N*. Как видно из рис.2, показатели степени алгоритма сжатия по *R* превосходят в степени сжатия архиваторы *WinRar, 7Z и JPEG Lossless* более чем на 80 %.

**Выводы.** Полученные в ходе исследований результаты позволяют определить оптимальные параметры для сжатия:

1. Результаты показателей степеней сжатия улучшаются при увеличении размера каналов параметра *R*. Это за счет того, что чем больше значений, подлежащих преобразованию, тем меньше требуется разрядов для их хранения.

2. Наилучшие значения степени сжатия достигнуты за счет выбора количества каналов в упорядоченной группе при $15 > K > 10$.

3. Учет межканальной корреляции параметра $Cor$ показывает, что наибольшие значения в степени сжатия номера каналов при $170 > N > 0$.

4. Алгоритм с учетом корреляции и группировки при $N = [2...10]$ показывает наиболее эффективный рост в степени сжатия за счет сформированных групп каналов и их упорядочивания.

**Список литературы**


1. Замятин А.В., Саринова А.Ж. Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учетом байтовой обработки и междиапазонной корреляции // Прикладная информатика. 2013. Т. 47, № 5. С. 37–42.

2. Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37, № 4. С. 471–476.

3. Гашников М.В., Глумов Н.И. Иерархическая сеточная интерполяция при сжатии гиперспектральных изображений // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 1. С. 87–93.

4. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В. Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 243–251.

5. Кашкин В.Б. Цифровая обработка аэрокосмических изображений. Красноярск, 2008. 278 с.

6. Гашников М.В., Глумов Н.И. Иерархическая компрессия в задаче хранения гипеспектральных изображений // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 482–488.

7. Yuan L., Jianping L., Ke G. Lossless compression of hyperspectral images using hybrid context prediction // Optics Express. 2012. Vol. 20 (7). P. 8199–8206

8. Changguo Li., Ke G. Lossless compression of hyperspectral images using three-stage prediction with adaptive search threshold // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2014. Vol. 7 (3). P. 305–316.

9. Ayman A., Salwa E., Mohamed El.Sh. Hyperspectral data compression using weighted spatial-spectral lossless coding technique // International Journal of Image Processing. 2012. Vol. 6 (6). P. 468–477.

10. Raffaele P., Bruno C. On the compression of hyperspectral data // IT CoNvergence PRActice. 2013. Vol. 1 (4). P. 24–38.

11. Raffaele P., Bruno C. Band clustering for the lossless compression of AVIRIS hyperspectral images // ACEEE Int. J. on Signal and Image Processing. 2014. Vol. 5 (1). P. 1–14.

УДК 004.627

**А.Ж. Саринова, К.К. Жакупов**

Магистр, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
Павлодар, Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

# ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИИ

Рассмотрены преобразование и последовательность предварительной обработки гиперспектральных АИ. Преобразование без потерь с учетом междиапазонной корреляции и регрессионным анализом позволит повысить степень сжатия более чем в два раза по сравнению с использованием универсальных архиваторов. Предлагаемое преобразование нахождения наилучших групп каналов при заданном значении корреляции повысит эффективность применения этапа вычитания каналов (разностного преобразования).

*Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, преобразование, линейная регрессия регрессионная модель.*

Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, с использованием математических моделей нахождения корреляции между всеми парами каналов, а также уравнения линейной регрессии.

Зная, что гиперспектральные АИ получены в спектре одной волны, можно предположить, что они обладают корреляционной зависимостью и между собой похожи. Поэтому рассчитываем корреляцию между всеми парами выбранных каналов к сжатию по уравнению Пирсона.

$$cor = \frac{\sum_{m,n}(\mathrm{I}[m,n,k] - \bar{\mathbf{I}}[m,n,k]) \times (\mathbf{I}[m+1,n+1,k+1] - \bar{\mathbf{I}}[m+1,n,+1k+1])}{\sqrt{\sum_{m,n}(\mathbf{I}[m,n,k] - \bar{\mathbf{I}}[m,n,k])^2 \times \sum_{m,n}(\mathbf{I}[m+1,n+1,k+1] - \bar{\mathbf{I}}[m+1,n,+1k+1])^2}}$$

Рассмотрим сам процесс преобразования методом регрессионных уравнений, последующего разностного и кодирования. Для того, чтобы максимально приблизить исходные значения каналов, так как не во всех парах найдена высокая корреляция, было решено использовать математическое уравнение линейной регрессии (ЛР).

Процесс преобразования методом регрессионных уравнений – это алгоритм нахождения значений разностей между коррелированными каналами, построим модель уравнения $d_i = y_i - (a + b \cdot x)$.

Выбрав уравнение ЛР $Y_i = a + b \cdot x$, где значения преобразуемого (регрессируемого канала) будут очень приближены к числу $y_i$.

Введем обозначения:

$x$ – значения порождающего канала $\mathrm{I}[m,n,k]$;

$\bar{x}$ – среднее значение матрицы первого канала (порождающего);

$\bar{y}$ – среднее значение матрицы регрессируемого канала;

© Саринова А.Ж., Жакупов К.К., 2019

$k$ – среднее арифметическое значение суммы произведений пары каналов;

$s$ – квадратичные значения порождающего канала $\sum I[m,n,k]$;

$l$ – среднее арифметическое квадратичной суммы порождающего канала;

$n$ – количество значений в $I[m,n,k]$;

$d_i$ – разности между регрессируемым каналом $I[m,n,k]$ и уравнением ЛР.

Шаг 1. Найдем коэффициент $a = \frac{k - \bar{x} \times \bar{y}}{l - s}$ .Для это вычислим $\bar{x}$ . $\bar{x} = \frac{\sum I[m,n,k]}{n}$, $\bar{y} = \frac{\sum I[m+1,n+1,k+1]}{n}$, $k = \frac{\sum I[m,n,k] \times I[m+1,n+1,k+1]}{n}$, $\bar{l} = \frac{s}{n}$.

Шаг 2. Найдем коэффициент $b = \bar{y} - a \times \bar{x}$

В итоге были определены коэффициенты построенной регрессионной модели $Y_i = a + b \cdot x$ для порождающего канала.

Шаг 3. Вычисляем значения разностей уравнения $d_i = y_i - (a + b \cdot x_i)$ между порождающим каналом $I'[m, n, k]$ и полученным уравнением ЛР $y_i$.

**Заключение.** Предлагаемое преобразование нахождения наилучших групп каналов при заданном значении корреляции повышает эффективность применения этапа вычитания каналов (разностного преобразования) и регрессионного преобразования. Полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ повышают эффективность применения этапов регрессионного преоразования, показывающая хорошие результаты при вычислении алгоритмов сжатия.

**Список литературы**

1. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Цифровая обработка аэрокосмических изображений. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. 278 с.

2. Salomon D. Data compression. The complete reference // Springer-Verlag. 2007. 1118 p.

3. Sayood K. Introduction to data compression. USA. Universitet Nebraska. Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 2006. San Francisco, CA 94111. 703 p.

4. William K. Pratt. Digital image processing: PIKS Inside, Third Edition. 2001. John Wiley & Sons, Inc, 738 p.

УДК 004.932.2

**В.Б. Стецюк[1], А.В. Пятаева[2]**

[1] Студент, [2] Кандидат технических наук

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: demi-lada@mail.ru

# УДАЛЕНИЕ ДЫМКИ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИИ МЕТОДОМ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕМНОГО КАНАЛА

Качество работы алгоритмов компьютерного зрения напрямую зависит от входного изображения. Одним из негативных факторов, ухудшающих качество исследуемых видеопоследовательностей, полученных на открытых местностях, является присутствие тумана, или дымки. В частности, дымка является одним из компонентов различных атмосферных осадков. В данном исследовании устранение дымки выполняется в качестве заключительного этапа работы алгоритма устранения шумов, вносимых атмосферными осадками на видеоизображение. Удаление дымки на видеоизображении выполняется методом получения темного канала изображения.

*Ключевые слова: дымка, туман, видеоизображение, темный канал.*

Одним из видов искажений, появляющихся при видеосъемке открытых пространств, является дымка, или туман. Туман – это атмосферное явление, которое значительно ухудшает видимость сцен на открытом воздухе. Густые условия тумана, образованные частицами и каплями воды в атмосфере, отрицательно влияют на точность работы алгоритмов компьютерного зрения.

Современные методы удаления дымки строятся на предположении о глубине текстуры или цвета кадра. Их недостатком является низкая скорость – с их помощью нельзя обрабатывать большие потоки данных в режиме реального времени. Авторы [1] предложили метод F-LDCP для эффективного восстановления снимков неба. Значения светопередачи, оцененные на основе модели яркости и модели получения темного канала изображения, объединяются на основе метода, названного мягкой сегментацией. Основное отличие такой сегментации от традиционной пирамидальной сегментации заключается в том, что в процессе ее выполнения в каждом пикселе исходного изображения вычисляются вероятности его принадлежности той или иной выделенной области. Авторы [2] обнаруживают дымку на изображении в два этапа. Дымка рассматривается как загрязнение вследствие примесей частиц в воздухе и может быть представлена картой толщины дымки. Для точной оценки распределения дымки предлагается процесс подавления сияния земли (HTM, GRS-HTM). Компонент дымки для каждой полосы рассчитывается через GRS-HTM и может быть удален для восстановления четкого изображения. Авторы [3] разработали метод, в котором изображение с дымкой преобразуется в пространство оттенков, насыщенности и значений, а линейно преобразованные пороговые значения по насыщенности и значению используются для обнаружения любых белых и черных пикселей. Используя суперпиксели в качестве локальных областей, локальные значения пропускания и атмосферного освещения оцениваются более надежно и эффективно путем объединения априорных значений темного и светлого каналов (априорных двухканальных). Авторы [4] идентифицируют туман в изображении по линейной зависимости между яркостью и насыщенностью в цветовом пространстве HSV. Простые априорные значения как в фоновом, так и в туманном слоях основаны на

© Стецюк В.Б., Пятаева А.В., 2019

модели дихроматического отражения (DRM) для учета различных концентраций тумана. Авторы установили, что в соответствии с консистенцией цвета и физическими свойствами туман и световые блики имеют одинаковые хроматические свойства. Основываясь на этом наблюдении, DRM может приблизить карту тумана. Максимальная апостериорная формулировка также может быть использована для надежного уточнения карты тумана и удаления черного шума. Авторы используют карту тумана для вычисления атмосферного света и прогнозирования скорости передачи для получения изображений без дымки.

В работе [5] для компенсации дымки используется метод, основанный на темном канале изображения. Известно, что формирование исходного изображения, получаемого из видеопоследовательности на открытых пространствах, выполняется с учетом закона затухания световых волн и влияния атмосферного света. Под атмосферным светом понимается окружающий свет, отраженный в прямой видимости с помощью атмосферных частиц (рис. 1). Этот процесс может представить с помощью модели атмосферного рассеяния [18], определяемой выражением

$$I(x,y) = J(x,y)e^{-\delta d} + A\left(1 - e^{-\delta d}\right), \tag{1}$$

где $I(x,y)$ – изображение, в котором необходимо обнаружить и скомпенсировать искажение вследствие присутствия дымки; $J(x,y)$ – яркость данного изображения; $A$ – глобальный атмосферный свет; $d$ – расстояние от камеры до сцены; $\delta$ – коэффициент рассеяния в пикселе $(x,y)$.

В уравнении (1) первый член представляет собой модель затухания света. Из-за эффекта рассеяния и поглощения атмосферных частиц часть света, отраженная от поверхности объектов, рассеивается или поглощается, а оставшаяся часть попадает непосредственно в объектив видеокамеры. Интенсивность света экспоненциально убывает с увеличением расстояния до объекта съемки. Второй член представляет собой модель атмосферного света, влияющего на формирование изображения. Под влиянием атмосферных частиц рассеяния, свойства атмосферного света изменяются. С увеличением расстояния распространения интенсивность атмосферного света постепенно увеличивается. Часть выражения (1) представляет собой карту светопередачи, которая показывает относительную часть света, необходимую для прохождения пути между наблюдателем и точкой поверхности без рассеяния:

$$t(x) = e^{-\delta d}. \tag{2}$$

Карта светопередачи описывает распространение той части света, которая не рассеивается и достигает видеокамеры. Она является непрерывной функцией расстояния, следовательно, $t(x)$ отражает информацию о глубине сцены:

$$map(x,y) = e^{-\delta d}. \tag{3}$$

Вследствие того, что в уравнении (1) присутствует несколько неизвестных, количество решений данного выражения будет бесконечно большим. Решение данной проблемы основано на затемнении изображениях и получении результатов. Наблюдаемое изображение разбивается на блоки фиксированного размера, для каждого пиксела из блока вычисляется значение

$$I^{dark}(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \left( I_c(x,y) \right) \right), \tag{4}$$

где $I_c$ – значение цветового канала изображения $I(x,y)$ ; $\Omega(x,y)$ – локальный блок с центром в точке $(x,y)$; $c$ – цветовой канал изображения.

Если рассматривать визуальную составляющую, то интенсивность темного канала является приближенным значением толщины дымки. Для того чтобы получить значения атмосферного света каждой из трех цветовых компонент выбираются первые 0,1% самых ярких пикселов в темном канале. В качестве значения интенсивности атмосферного света $A$ выбирается максимальное значение интенсивности из отобранных пикселов. Интенсивность атмосферного света в цветовой модели RGB рассчитывается для каждого цветового канала изображения по формуле (5):

$$A^C = \left\{ A^R, A^G, A^B \right\}. \tag{5}$$

Вследствие присутствия влияния атмосферного света изображение, содержащее дальние планы (изображение с дымкой), светлее изображения ближнего плана (без дымки), так как значение светопередачи в этом случае ниже. Природное явление воздушной перспективы учитывается за счет использования постоянного параметра $0 < \phi < 1$ при вычислении светопередачи $map(x, y)$. Значение светопередачи $map(x, y)$ рассчитывается следующим образом:

$$map(x, y) = 1 - \phi \min_{c \in \{R,G,B\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I_c(x, y)}{A_c} \right) \right), \tag{6}$$

где $I_c$ – значение цветового канала изображения $I(x, y)$; $\Omega(x, y)$ – локальный блок с центром в точке $(x, y)$; $c$ – цветовой канал изображения; $A_c$ – интенсивность атмосферного света в цветовом канале $c$.

Исходя из полученных преобразований, изображение без дымки может быть получено согласно выражению

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) \cdot map(x, y)}{A_c \left(1 - map(x, y)\right)}. \tag{7}$$

**Экспериментальные исследования.** Для проведения экспериментальных исследований использована база данных числовых изображений FRIDA [7], содержащая 330 синтетических изображений из 66 разнообразных дорожных сцен. Точка обзора закрыта для водителя транспортного средства. Каждому изображению без тумана соответствует 4 туманных изображения и карта глубины. Примеры удаления дымки на изображениях методом получения темного канала показаны на рис. 1 и 2.

*а* *б* *в*

Рис. 1. Результат удаления дымки на кадре № 10 тестового набора данных:
*а* – исследуемый кадр без тумана; *б* – исследуемый кадр с туманом; *в* – исследуемый после удаления тумана методом получения темного канала изображения

*а* *б* *в*

Рис. 2. Результат удаления дымки на кадре № 7 тестового набора данных:
*а* – исследуемый кадр без тумана; *б* – исследуемый кадр с туманом; *в* – исследуемый после удаления тумана методом получения темного канала изображения

**Заключение.** В работе для удаления использован метод получения темного канала изображения, основанный на модели атмосферного рассеяния света. Практическая реализация данного метода проведена на двух кадрах базы данных числовых изображений FRIDA.

**Список литературы**


1. Haze removal method for natural restoration of images with sky / Y. Zhu, G. Tang, X. Xhang [et al.] // Neurocomputing. 2018. Vol. 275. P. 499–510 // Signal Processing. 2017. Vol. 137. P. 33–43.

2. Haze removal for a single visible remote sensing image / Q. Liu, X. Gao, L. He, W. Lu // Signal Processing. 2017. Vol. 137. P. 33-43.

4. Image dehazinh using adaptive bi-channel priors on superpixels / Y. Jiang, C. Sun, Y. Zhao, L. Yang // Computer Vision and Imade Understanding. 2017. Vol. 165. P. 17–32.

5. Haze removal algorithm based on single-images with chromatic properties / Y. Wang, F. Fu, F. Lai [et al.] // Signal Processing: Image Communication. 2019. Vol. 72. P. 80–91.

6. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2011. Vol. 33, № 12. P. 2341–2353.

7. FRIDA (Foggy Road Image DAtabase). URL: http://perso.lcpc.fr/tarel.jean-philippe/bdd/frida.html.

УДК 528

**Anastasiia Safonova[1, 2], Emilio Guirado[2], Siham Tabik[2], Domingo Alcaraz-Segura[3], Yuriy Maglinets[1]**

[1] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[2] Soft Computing and Intelligent Information Systems research group, University of Granada, Granada, Spain
[3] Department Botany, University of Granada, Granada, Spain
e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

# MASK R-CNN FOR SEGMENTATION OF OLIVE TREES

In this work, we present the results of the instance segmentation of olive trees using high resolution images, NDVI and GNDVI vegetation indices, and modern architecture Mask R-CNN.

Keywords: instance segmentation, machine learning, deep neural networks, olive trees, high resolution images.

**Introduction.** Spain has a leading position in the world in the production of olive oil (44% of the global production) [1]. Therefore, the task of monitoring of olive fields in this country is an essential. Recently, machine learning methods have been widely used to solve various agricultural problems. In particular, these methods demonstrate high results in the tasks of object recognition, image classification, and segmentation of individual objects in remote sensing data [2, 3]. This paper presents the results of applying a modern machine learning method – convolutional neural networks (CNN) – to determine the pixel mask of olive trees using ultra-high-resolution data.

Previous works in the literature focus mostly on the task of detection on UAV images for plant species detection and damaged plants stages detection [4, 5]. As far as we know, very few works have explored the instance segmentation task for plant species detection.

**Mask R-CNN.** In the present work, instance segmentation is performed. This is the task of determining the contours of objects at the pixel level of the analyzed image. This task is one of the most difficult problems of computer vision. To solve this problem, we used the modern Mask R-CNN network (regions with convolutional neural networks) [6]. This CNN implements a two-step approach. At the first stage, the input image is scanned and proposals are generated (areas that may contain an object). At the second stage, each proposal is classified and the bounding boxes and masks are formed. In particular, Mask R-CNN consists of the following structural components:

1. The base, that is the standard ResNet101 CNN, at the early layers of which objects of a low level (edges and corners) are detected, and at later layers of the network elements of a higher level (tree, person, building) are found. Going through the neural network, the image is converted from a 1 024 × 1 024px × 3 (RGB) matrix to a 32 × 32 × 2 048 object map. This feature map becomes the entry for the next network levels. To improve the quality of extraction of objects by the network, we used the Feature Pyramid Network method (FPN), which takes the high-level elements detected by the CNN and transmits them down to the lower layers. This allows functions at each level to have access to functions at both the lower and higher levels.

2. Region Proposal Network. This is a CNN, which scans an image in a sliding window mode and finds areas containing objects. As a result, the network generates: an anchor class (foreground and background, where the first implies the presence of the object being classified), and a bounding box with the delta estimate (percentage of the relative measurement ac-

© Anastasiia Safonova, Emilio Guirado, Siham Tabik, Domingo Alcaraz-Segura, Yuriy Maglinets, 2019

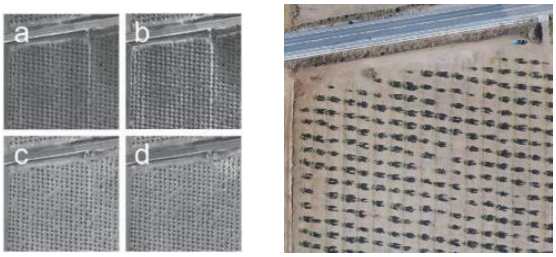
curacy of the coordinates, width, and height) for specifying the anchor field to better match the object.

3. Classifier and bounding regressor window. This component generates two outputs for each object: object class and bounding box. This frame is necessary to further clarify the location and size of the object.

Since classifiers do not always cope with the sizing of objects, they usually require objects of a fixed size. We used an additional subsample layer (sub-sampling), which allows to crop part of the object map to a fixed size.

4. Segment masks, that is a CNN that takes as input the areas of objects selected by the classifier, and generates masks for them. The generated masks have a low resolution of 28×28 pixels. The small size of the mask helps keep the mask network light. During training, we reduce the masks to 28×28 pixels to calculate the losses, and during the output we increase the predicted masks to the size of the bounding box of the object, and they are final masks, one per object.

**Test area.** The test area is located in the north of the city of Granada, Andalusia, Spain. The object of study is the *Picular* tree. This is a cultivated variety of olives used to produce olive oil (*Marteño*, *Nevadillo*, *Lopereño*). Trees were planted in 2006. The number of trees on the test site was 2700 pieces, which covered an area of 12 hectares, but in total, 11000 trees grow on the plantation (total area of 50 hectares). For the experiment we used images acquired by an unmanned aerial vehicle (UAV). We used two UAVs: PARROT DISCO-PRO AG with a Parrot Sequoia multispectral sensor in four bands (green (Green), red (Red), extreme red (Red_ Edge), and near infrared (NIR)) and DL-Phantom 4 Pro with RGB camera (Fig. 1).



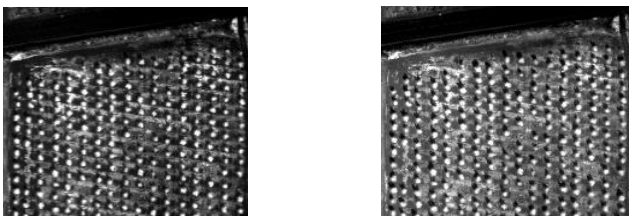

*a* *b*

Fig. 1. Fragments of the orthoimages of the test section. a – four-channel image (a – Green, b – Red, c – Red_Edge, d – NIR), b – RGB image.

Ultra-high-resolution four-channel images were obtained in February 2019 with a resolution of 13 cm/pixel, and a color (RGB) image was obtained in July 2019 with a resolution of 3 cm/pixel. Both flights of drones were made at a height of 120 meters. Also, as an experiment, we calculated vegetation indices (VI): the normalized vegetation index NDVI (1) and the green normalized vegetation index GNDVI (2) according to a four-channel image. GNDVI is an indicator of the photosynthetic activity of vegetation cover, most often it is used in evaluating moisture content and nitrogen concentrations in plant leaves. GNDVI is more sensitive to chlorophyll concentrations than NDVI. (Fig. 2) [7].

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}. \quad (2)$$



*а* *б*

Fig. 2. Fragment of orthoimages of the calculated: a – NDVI and b – GNDVI

Thus, for the experiments we used the following channel combinations: a) RGB image, b) Green-Red-NIR, c) NDVI, and d) GNDVI.

On the selected combinations, the data set for training and testing Mask R-CNN was then prepared. We prepared 150 images (patches), of which 80% were intended for training the model, and 20% for validating and testing the trained model. A patch is an image of one to eight trees. The general scheme for creating the data set is shown in Fig. 3

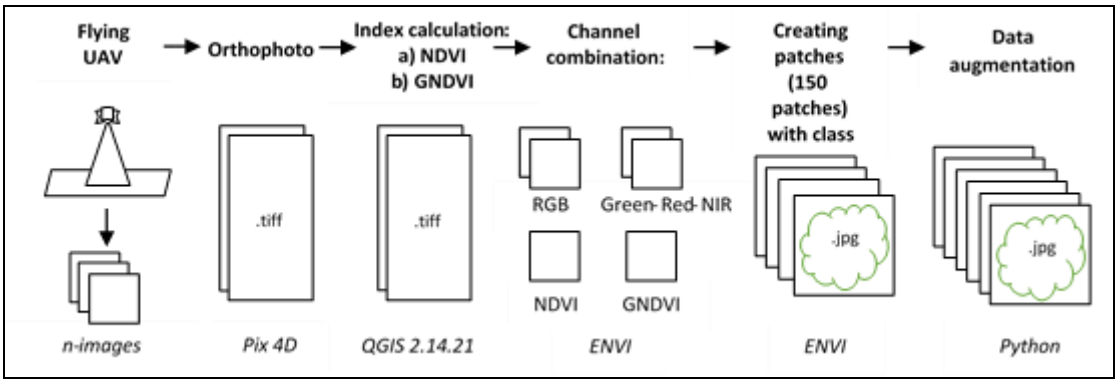



Fig. 3. The process of obtaining and creating a data set for training and testing the model

The prepared set of patches was converted to single-channel images in the .jpg format for further artificial data augmentation [8] using functions such as: rotate the image horizontally by 99 %, rotate the image vertically by 99 %, improve or degrade the image contrast, sharpen, change image brightness at 10–150 % of the original image. The test data set was artificially enlarged to 1 500 images for each combination of data set.

**The results of the experiments.** This section presents the results of experimental studies of the use of Mask R-CNN in the problem of segmentation of olive trees in ultra-high-resolution images obtained using UAVs.

The main work was done using the Python programming language and the machine learning module TensorFlow Object Detection API. TensorFlow is an open source software library for high-performance numerical computing that works in a variety of heterogeneous systems, including clusters of distributed graphics processors (GPUs). The calculations were performed on a PC with an Intel Xeon E5-2630v4 processor, accelerated using an NVIDIA Titan Xp graphics processor as a platform for learning and testing the proposed methodology. The following programs were used to prepare a set of images: Pix 4D, QGIS 2.14.21, ENVI, VGG Image Annotator. VGG Image Annotator is a standalone software for manual annotation of images, audio, and video. The creation of class labels was carried out in the VGG Image Annotator program with their saving in the JSON format (an example of manual drawing of labels on the RGB image is presented in Fig. 4).

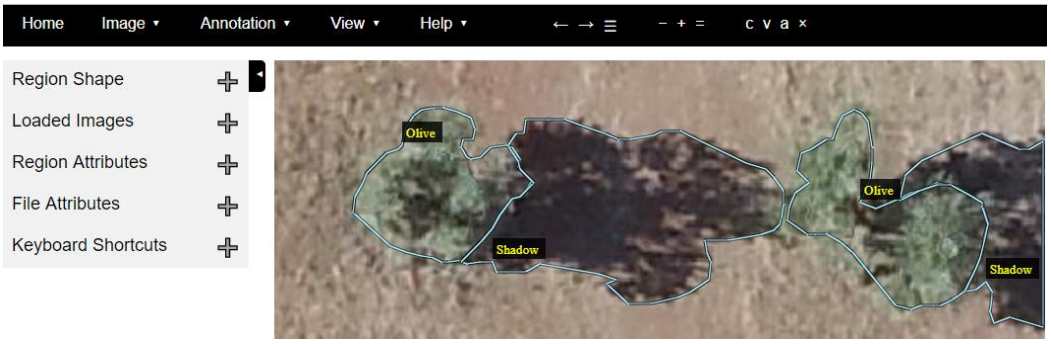



Fig. 4. Creating labels of the classes «Olive trees» and «Shadow» in the RGB image

Further, the Mask R-CNN network has been trained for 100 epochs for each channel combination for 60 hours. The results of segmentation of olive trees for each combination of images are presented in Fig. 5.

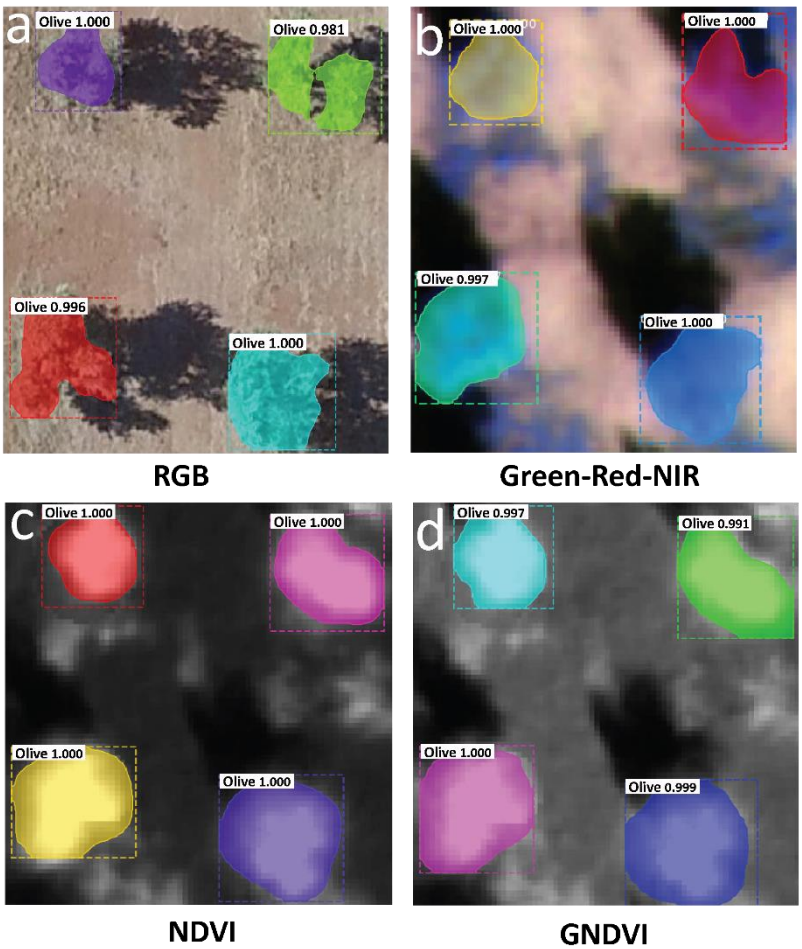



Fig. 5. The result of the segmentation of the class «Olive trees» using Mask R-CNN with the data augmentation: *a* – RGB, *b* – Green-Red-NIR, *c* – NDVI and *d* – GNDVI

As can be seen from Fig. 5, the results of segmentation and construction of pixel masks for each object in the images give an average accuracy of 99,66 %, where RGB – 99,42 %, Green-Red-NIR – 99,92 %, NDVI – 100 % and GNDVI – 99,67 %.

As an experiment, we conducted additional training of the CNN for the segmentation of the “shade of olive trees” class, and for calculating the sizes of each tree. The results of the

calculations performed coincide with ground measurements of 10 test trees on average by 95%. Thus, using the R-CNN architecture we managed to calculate:

- pixel by pixel area of the object, given that the size of one pixel in the mask corresponds to 3 cm for RGB images and 13 cm for the image of Green-Red-NIR, NDVI, GNDV;
- tree height (h) according to the size of the tree shade in meters (lT) and taking into account the height of the sun above the horizon depending on the geographical position (latitude and longitude), date and time of imagery acquisition (tgγ) (3) [9].

$$h = l \times tg\gamma \tag{3}$$

- the volume of the tree crown, excluding the lower part of the tree trunk, on which there are no branches (on average up to 0.5 meters) (Fig. 6).

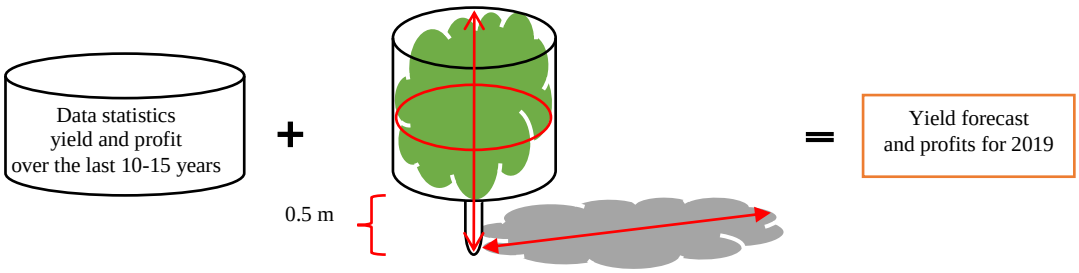



Fig. 6. Graphic representation of the calculation of the parameters of olive trees

The proposed calculations can be used to conduct additional field measurements and experiments to predict the yield and profit from each tree with the existing statistics for the last 10-15 years.

**Conclusion.** The results show that the use of machine learning, and, in particular, deep neural networks, makes it possible to solve the objectives with high accuracy. The proposed technique of segmentation of olive trees using the neural network architecture Mask R-CNN and TensorFlow demonstrated an average recognition accuracy of 99.66%. Thus, this method of pixel segmentation using machine learning can be used with high efficiency in problems of agriculture and forestry. In the future, it is planned to conduct testing of trained CNN on satellite data of medium resolution, which is of the greatest interest for using possible results over large areas, as well as forecasting yields and profits from olive trees.

*The work was done with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation for conducting a scientific internship abroad for the 2018/19 academic year of 07.06.2018, No. 05-1997 and Russian Foundation for Basic Research (project number: 18-47-242002 p_mk), Government of the Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the research project: "Development of technology for creating intelligent information systems for object-oriented monitoring of territories using remote sensing data".*

**References**

1. EU olive oil farms report // European commission. Greece, Italy, Spain. 2012 http://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/326556/ (date of the application 25.06.2019).

2. Wei Zhang, Ping Tang, Lijun Zhao. Remote Sensing Image Scene Classification Using CNN-CapsNet // Remote Sensing: Very High Resolution (VHR) Satellite Imagery: Processing and Applications. 2019.

3. Gonzalez-Fernandez I., Iglesias-Otero M.A, Esteki M., Moldes O.A., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. A critical review on the use of artificial neural networks in olive oil production, characterization and authentication // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. № 59. 2018. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1433628 (date of the application 25.06.2019).

4. Safonova, A., Tabik, S., Alcaraz-Segura, D., Rubtsov, A., Maglinets, Y., & Herrera, F. (2019). Detection of Fir Trees (Abies sibirica) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. Remote Sensing, 2019. 11(6), 643.

5. E Guirado, S Tabik, D Alcaraz-Segura, J Cabello, F Herrera. Deep-learning versus OBIA for scattered shrub detection with Google Earth imagery: Ziziphus lotus as case study // Remote Sensing, 2017. 9 (12).

6. Kaiming He., Georgia Gkioxari, Piotr Dollar, Ross Girshick. Mask R-CNN // Facebook AI Research (FAIR). 2018.

7. S Tabik, D Peralta, A Herrera-Poyatos, F Herrera. A snapshot of image pre-processing for convolutional neural networks: case study of MNIST // International Journal of Computational Intelligence Systems, 2017. 10, 555–568.

8. Vegetation // Geoanalytics. Agro. http://agro.geoanalitika.com/ru/products/rastitelnost/# (date of the application 25.06.2019).

9. Selly H.E. Tree Heights from shadows // Photogrammetric Engineering. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1942journal/jun/1942_jun_100-109.pdf (date of the application 25.06.2019).

# Секция

# МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 528

**А.В. Артюшина, Т.Б. Журавлева**

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

e-mail: vav@iao.ru, ztb@iao.ru

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА MERRA-2

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость содержания черного углерода (сажи) в приземном слое и столбе атмосферы по данным реанализа MERRA-2 над территорией Российской Арктики по данным 2000–2018 гг. Представлены результаты сопоставления данных реанализа с данными натурных измерений, полученными на основе самолетного зондирования вертикальных профилей черного углерода над некоторыми арктическими районами и измерениями приземной концентрации сажи на ст. Тикси (Якутия).

*Ключевые слова: Российская Арктика, черный углерод, данные реанализа, самолетное зондирование, приземные измерения*

**Введение.** Несмотря на то, что черный углерод (black carbon, BC) антропогенного и естественного происхождения оказывает существенный вклад в радиационный бюджет атмосферы как в глобальном, так и в региональном масштабе, в химико-транспортных и климатических моделях эта атмосферная составляющая описана недостаточно полно. Над обширной территорией Арктики это связано с крайне ограниченным количеством натурных измерений ввиду значительной площади, малой доступности и суровых климатических условий исследуемого региона.

Активизации исследований аэрозоля в российском секторе Арктики способствовало проведение Международного полярного года 2007/2008. В настоящее время регулярные измерения аэрозольных характеристик проводятся в п. Баренцбург (арх. Шпицберген) и Гидрометеорологической обсерватории Тикси (Якутия). С 2018 г. начались комплексные исследования физико-химических характеристик аэрозоля на стационаре «Ледовая база "Мыс Баранова"» [1]. Ограниченные по срокам и георафическим районам данные получены в ходе морских и самолетных экспедиций [2].

В отличие от результатов этих фрагментарных на сегодняшний день исследований более полная картина о пространственно-временной изменчивости сажи в арктической зоне может быть получена по данным реанализа MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 [3]). Целью настоящей работы является (1) анализ данных о содержании сажи в столбе атмосферы и ее концентрации на территории российского сектора Арктики по данным реанализа MERRA-2 и (2) сопоставление этих данных с результатами натурных измерений, полученными в ходе самолетных экспедиций и приземных измерений на ГМО Тикси.

© Артюшина А.В., Журавлева Т.Б., 2019

**Исходные данные.** Моделирование аэрозольных свойств в MERRA-2 выполняется на основе модели GOCART (Goddard Chemistry, Aerosol, Radiation and Transport), совмещенной с метеорологическими данными системы наблюдений GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, version 5). Реализованная в MERRA-2 ассимиляция модельной аэрозольной оптической толщины (АОТ) на длине волны 0,55 мкм с результатами спутниковых и наземных наблюдений (MODIS, AVHRR, MISR, AERONET) обеспечивает получение вертикальных профилей внешней смеси для пяти различных аэрозольных компонентов – пыли, морской соли, сульфатов, черного и органического углерода.

Анализ общего содержания (ОС) черного углерода в столбе атмосферы и его приземной концентрации ([BC]) за 2000–2018 гг. выполнен для территории всего российского побережья Северного Ледовитого океана [65–82° с.ш., 30–170° в.д.], а также отдельно для четырех северных территорий, включающих заповедники (рис. 1): 1 – Лапландский, 2 – Ненецкий, 3 – Гыданский, 4 – Усть-Ленский. Рассматриваются данные с пространственно-временным разрешением – 0,5° × 0,625° и 1 месяц соответственно (http://giovanni.gsfc.nasa.gov).

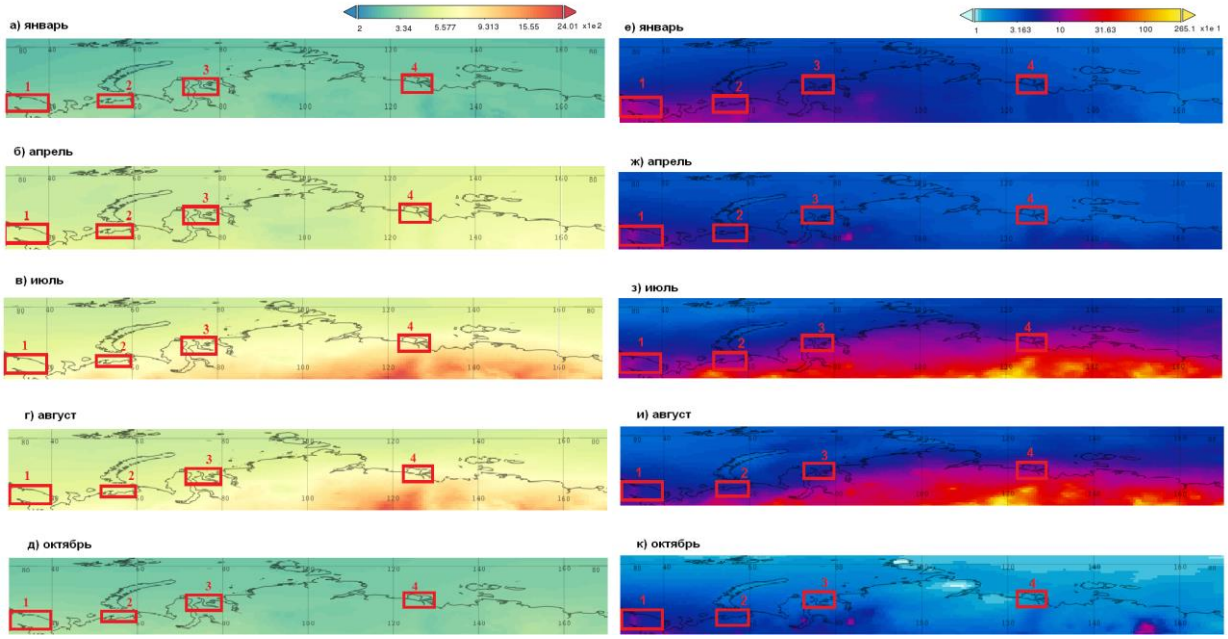



Рис. 1. Среднемесячные значения общего содержания черного углерода в столбе атмосферы (*а–д*), мкг/м$^2$, и [BC] (*е–к*), нг/м$^3$

Пространственно-временная изменчивость содержания сажи в атмосфере по данным MERRA-2. Согласно MERRA-2 (рис. 1), ОС черного углерода в столбе атмосферы с октября по апрель квазиравномерно распределено по всей рассматриваемой территории и составляет ~290 мкг/м$^2$ в январе, ~510 мкг/м$^2$ в апреле и ~330 мкг/м$^2$ – в октябре. В то же время распределение [BC] в зимне-весенний период крайне неоднородно: значения [BC], минимальные в районе Усть-Ленского заповедника (~20–25 нг/м$^3$), увеличиваются примерно на порядок на территории Кольского полуострова (~150–175 нг/м$^3$).

Летний период характеризуется максимальной пространственной изменчивостью как ОС черного углерода, так и его приземной концентрации. В обоих случаях эти характеристики достигают наибольших значений на территории Восточной Сибири (~2 300 мкг/м$^2$ и ~2 600 нг/м$^3$ соответственно) и связаны, вероятно, с переносом дымов лесных пожаров.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что ОС черного углерода в холодные месяцы (январь и октябрь) явно ниже по сравнению с теплым периодом, несмотря на то, что атмосфера Арктики в этот период находится под воздействием аэрозольно-газовых выносов (преимущественно антропогенного происхождения) из более южных районов Евразии и Америки.

**Сопоставление с данными натурных измерений.** Сравним данные реанализа с результатами круглогодичных измерений [BC] в ГМО Тикси (https://www.esrl.noaa.gov/psd/iasoa/stations/tiksi). Из представленных на рис. 2 результатов следует, что средние концентрации черного углерода за май-июль по данным натурных измерений и реанализа находятся в разумном согласии (отклонения в пределах 40 %), тогда как в августе-сентябре расхождения увеличиваются до ~150 %. Еще более существенные различия между двумя источниками данных наблюдаются в зимние месяцы: например, в январе данные реанализа занижены по сравнению с результатами измерений более, чем в 4 раза.

Рис. 2. [BC] за 2010–2018 гг. по данным реанализа и измерений на ГМО Тикси

Данные о вертикальных профилях сажи в атмосфере Российской Арктики крайне немногочисленны. В данной работе представлено сопоставление ОС сажи по данным реанализа с результатами, полученными в ходе зондирования самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» [2]. Полеты выполнялись в 2014–2015 гг. над районами полуострова Ямал, Карского моря и архипелага Новая Земля, а также в Московском регионе. Приведенные в таблице результаты свидетельствуют о том, что общее содержание BC по данным MERRA-2 существенно – в 3–5 раз – превышает данные, полученные на основе самолетного зондирования. Отметим, что эти сопоставления выполнены для конкретных периодов наблюдений, т.е. временное разрешение данных реанализа выбиралось равным одним суткам.

Таблица

ОС BC, мкг·м$^{-2}$, данные полетов 3 ноября 2014 г. и 28 февраля 2015 г.

| Регион | Самолет | MERRA-2 |
|---|---|---|
| Московская область | 72–170 | 550–750 |
| Район архипелага Новая Земля | 4–90 | 280–315 |
| Полуостров Ямал (мыс Каменный) | 80 | 270–305 |
| Район г. Нарьян-Мар | 4–90 | 370–420 |

Представленные в работе результаты являются предварительными, поскольку основаны на ограниченном наборе имеющихся в открытом доступе данных. Тем не менее

валидация данных реанализа показала, что в арктическом регионе среднемесячные значения приземной концентрации сажи в теплый период наблюдений находятся в разумном (<50 %) согласии с данными натурных наблюдений. Среднемесячные значения [BC] в зимние месяцы по данным двух рассмотренных источников различаются в несколько раз. Среди возможных причин этих расхождений отметим, что в необходимые для процедуры восстановления ОС и приземной концентрации сажи значения аэрозольной оптической толщи по данным MODIS в зимний период отсутствуют. Что касается результатов сопоставлений ОС сажи, то столь существенные отличия могут быть связаны с особенностями вертикальных профилей концентрации сажи, заложенных в модели GOCART. Кроме того, в работе обсуждаются результаты сопоставлений ОС сажи с временным разрешением 1 сутки, в связи с чем возникает вопрос о соответствии реальной и модельной (GEOS-5) метеорологической ситуации.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00245) и программы Президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».*

**Список литературы**

1. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база "Мыс Баранова"» в 2018 г. / С.М. Сакерин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 421–429.

2. Результаты сравнительного анализа сравнения аэрозольных примесей в атмосфере регионов Арктики и Московской области по данным самолетных исследований в 2014–2015 годах / Д.Р. Кирин [и др.] // Тр. Военно-космич. акад. им. А.Ф. Можайского. 2018. В. 662. С. 219–223.

3. The Modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) / R. Gelaro [et al.] // J. Climate. 2017. Vol. 30. P. 5419–5454.

УДК 528.8

**О.П. Архипкин[1], Г.С. Сагатдинова[2], Ж.А. Бралинова[2]**

[1] Кандидат физико-математических наук,
начальник Центра приема космической информации
[2] Национальный центр космических исследований и технологий
Алма-Ата, Казахстан
e-mail: oarkhipkin@rambler.ru, mkmikikz@mail.ru

# СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ РАДАРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

Показано, что использование появившихся в последние годы в свободном доступе оптических (Landsat-8, Sentinel-2A и Sentinel-2B) и радарных (Sentinel-1A и Sentinel-1B) данных среднего разрешения позволяет формировать регулярный и представительный ряд для космического мониторинга водохранилищ. Кроме того, синтезирование оптических и радарных данных позволяет уменьшить ошибки выделения водных поверхностей водохранилищ, обусловленные недостатками этих данных. В качестве примеров приведена динамика водной поверхности Чардаринского водохранилища по радарным и оптическим данным, а также синтез радарных и оптических данных для Сергеевского водохранилища.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, водохранилища, оптические космоснимки, радарные данные, слияние данных.*

**Введение.** Наша организация занимается разработкой и внедрением ГИС-технологий космического мониторинга ЧС с 2001 г., включая различные задачи мониторинга паводков, пожаров, нефтяных разливов. В зимне-весенний период 2004–2005 гг. в казахстанской части реки Сырдарьи стали фиксироваться зимние наводнения. Это было вызвано зимним спуском воды с Токтогульского водохранилища в связи с изменением режима его работы с мелиоративного на энергетический. В связи с этим в этом регионе стал проводиться космический мониторинг зимних наводнений с выделением в отдельную задачу мониторинга Чардаринского водохранилища.

Далее подобная задача была распространена и на ряд других водохранилищ, в основном в южных регионах. При этом на средних и малых по площади водохранилищах для мониторинга использовались данные среднего и высокого разрешения, получаемые нерегулярно и в основном на платной основе. Для крупных водохранилищ использовались также данные низкого разрешения, получаемых регулярно.

В настоящее время появилась возможность проводить на регулярной основе мониторинг водохранилищ по находящимся в свободном доступе данным среднего разрешения, оптическим данных Landsat-8 и Sentinel-2A и 2B, а также радарных Sentinel-1A и Sentinel-1B. Это существенно увеличило информационность космического мониторинга.

**Современные возможности использования оптических и радарных данных при космическом мониторинге водохранилищ.** Данные среднего разрешения теперь являются базовыми при космическом мониторинге водохранилищ. Они позволяют образовать довольно представительный временной ряд, особенно если их использовать совместно. Так в 2018 г. для Чардаринского водохранилища были получены 85 радарных данных Sentinel-1A и Sentinel-1B, 39 оптических данных Sentinel-2A и 2B, а также 15 данных Landsat-8. Всего 139 данных среднего разрешения. Особо отметим большое

© Архипкин О.П., Сагатдинова Г.С., Бралинова Ж.А., 2019

количество радарных данных, которые не зависят от времени суток и облачности, высокая степень которой характерна для периода прохождения паводковых вод.

Главной задачей мониторинга является оценка текущей водной поверхности водохранилища и определение ее динамики. Также возможны и другие задачи: инвентаризация водохранилищ, оценка загрязнения их поверхности, в том числе растительностью, оценка степени опасности водохранилищ для ниже лежащих населенных пунктов. В весенний период представляет интерес определение текущего состояния ледяной поверхности для определения зон неустойчивого ледового покрова, в том числе для запрещения рыбной ловли (рис. 1).

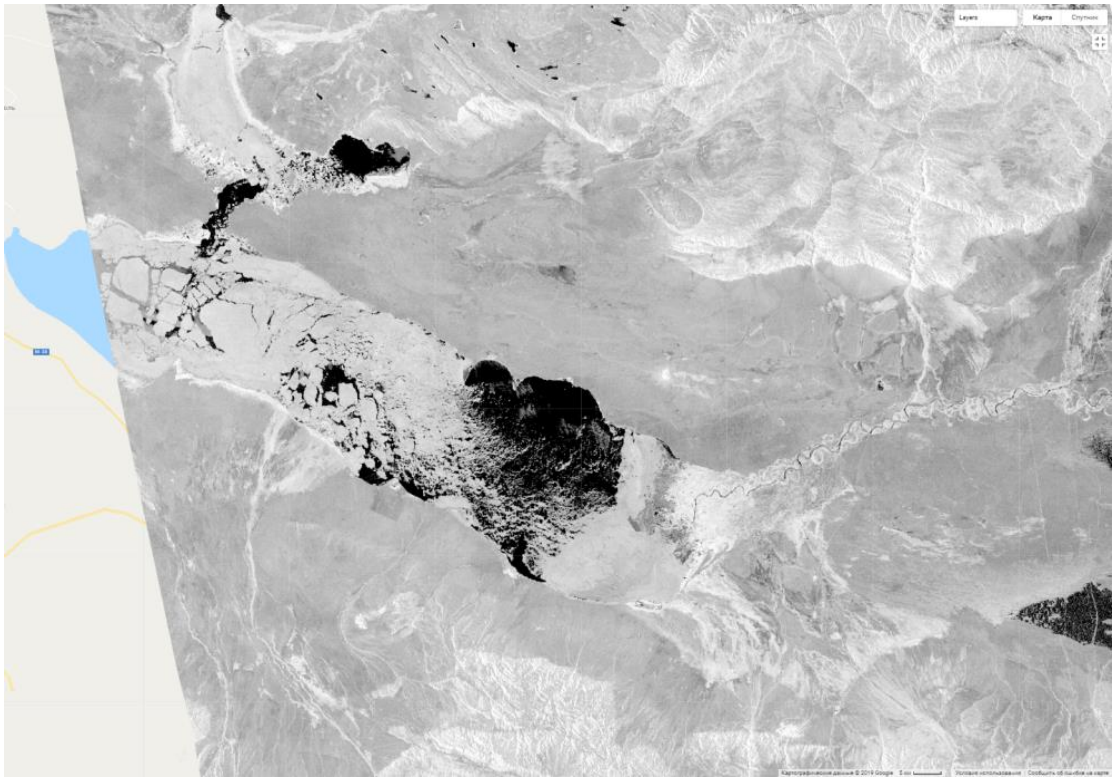


Рис. 1. Состояние ледового покрова на озере Зайсан
по данным Sentinel 1 за 14 апреля 2019 г.

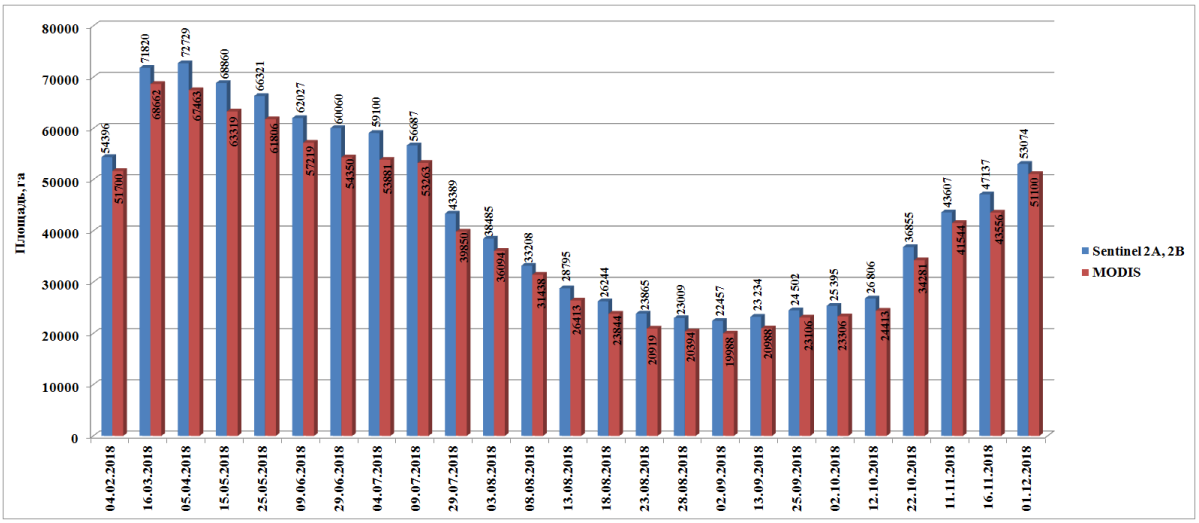



Рис. 2. Сравнительная динамика заполнения Чардаринского водохранилища
за 2018 г. по данным Sentinel 2A, 2B и MODIS

Космический мониторинг динамики заполнения Чардаринского водохранилища в 2018 г.

Динамика заполнения водохранилищ может формироваться несколькими способами, в том числе диаграммным, который четко отражает изменение площадных характеристик в течение сезона. На рис. 2 представлены динамики заполнения Чардаринского водохранилища по оптическим данным Sentinel-2 и MODIS. Из него видно, что по обоим данным качественная картина динамики получается одинаковой, а численно данные MODIS всегда меньше.

Можно представлять выделенную по космоснимкам водную поверхность в картографическом виде, когда эту поверхность в полигонном виде накладывают на картографическую основу, в качестве которой может быть сам космоснимок или какие-либо картографические слои. Динамику в этом случае дают в виде разноцветных полигонов, наложенных друг на друга. При этом можно указывать только полигоны на текущую и предыдущую дату, а можно дополнительно представлять минимальную и максимальную поверхности (рис. 3).

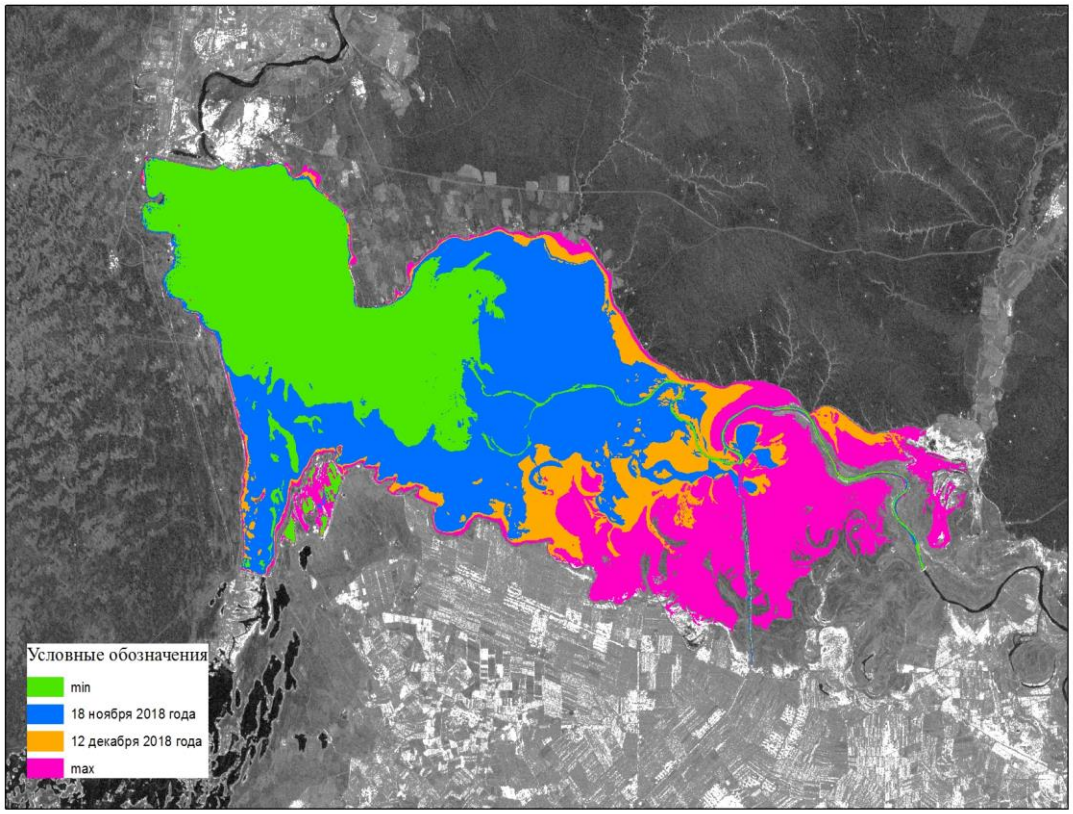
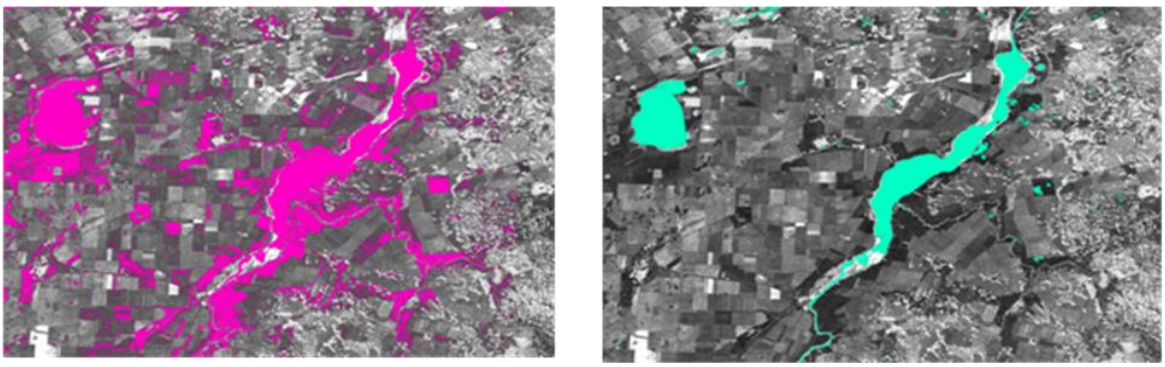



Рис. 3. Динамика заполнения Чардаринского водохранилища
по радарным данным Sentinel 1 в 2018 г.

**Слияние оптических и радарных данных при космическом мониторинге водохранилищ.** Слияние радарных и оптических данных активно используется при классификации подстилающей поверхности в различных природоресурсных задачах с целью повышения информативности космического мониторинга, а также повышения качества получаемых в результате слияния выходных данных, учитывая преимущества и недостатки радарных и оптических данных.

Так на рис. 4, *а* водная поверхность Сергеевского водохранилища по радарным данным содержит много ошибочных пикселей, которые устраняются при слиянии радарных и оптических данных (рис. 4, *б*). Аналогичным образом слияние оптических данных с радарными позволит устранить влияние облачности на водную поверхность, определенную только по оптическим данным.



*а* *б*

Рис. 4. Выделение водной поверхности по космоснимку Sentinel -1B в районе Сергеевского водохранилища за 5 сентября 2018 г. без использования оптического снимка Sentinel-2 за 3 сентября 2018 г. (*а*) и с его использованием (*б*)

**Выводы.** Совместное использование современных свободного доступа радарных и оптических данных среднего разрешения позволяет поднять космический мониторинг водохранилищ на новый качественный уровень.

Использование синтезированных радарных и оптических данных позволяет снизить ошибки выделения водных поверхностей водохранилищ.

УДК 528.871:571.1:553.984

**А. Ю. Белоносов[1], А. Е. Кудрявцев[2],**
**С. А. Шешуков[2], Д. В. Борисов[3]**

[1] Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия, e-mail: belonosov74313@mail.ru
[2] Младший научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой
геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия,
e-mail: kudryavtsevae85@mail.ru, sheshukovsa@ipgg.sbras.ru
[3] Автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Научно-
аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана»,
Тюмень, Россия, e-mail: dimbo2007@yandex.ru

# ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

На юге Западной Сибири нефтеперспективные юрские отложения характеризуются много- и мелкокупольностью. Дешифрирование материалов ДЗЗ в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном диапазонах позволило оценить нефтеперспективность многочисленных куполов и впадин на основе комплексирования геодинамически-напряженных зон и расчета физических характеристик земной поверхности (альбедо, коэффициент излучения, тепловая инерция, конвективный тепловой поток, суточное испарение влаги, ЦМР, метеоусловия и т.д.), включая процедуру эталонной классификации, где эталонами являются ближайшие месторождения нефти и газоконденсата. Прогнозная граница «нефтегазоконденсатных» земель юга Западной Сибири смещена до широты п.г.т. Лебяжье восточной части Курганской области.

*Ключевые слова: нефтеперспективность юрских отложений, купола и впадины, дешифрирование материалов ДЗЗ, видимый, ближний и дальний инфракрасный диапазоны, геодинамически-напряженные зоны, эталонная классификация.*

География поисков нефти и газа с каждым годом расширяется. Несмотря на то, что главный вектор поисковых геолого-геофизических исследований направлен на северные и восточные окраины Западной Сибири, западные и южные части по-прежнему относятся к резервным ресурсным территориям [1]. С накоплением новых материалов геолого-геофизических работ периодически производится региональная переоценка нефтеперспективности малоизученных крупных структурно-тектонических элементов: антеклиз, синеклиз, сводов, впадин, куполов и котловин [2, 3].

На юге Западной Сибири, включающей Тюменскую (без автономных округов – ХМАО и ЯНАО), Курганскую и частично Омскую и Свердловскую области, по результатам региональных и фрагментарных площадных сейсморазведочных работ, с учетом уже пробуренных около 300 поисково-разведочных скважин, установлено сокращение осадочного чехла в южном направлении. В приграничной полосе с Республикой Казахстан его толщина составляет в среднем 50–100 м.

В настоящее время границу нефтеперспективных земель на юге Западной Сибири условно проводят по административной границе Уватского и Вагайского районов Тюменской области.

С другой стороны, доюрское основание (условно триас-палеозойский фундамент) Западно-Сибирской плиты (ЗСП) имеет ступенчатое строение и погружается на север,

© Белоносов А.Ю., Кудрявцев А.Е., Шешуков С.А., Борисов Д.В., 2019

а нефтеперспективные юрские отложения осадочного чехла характеризуются многокупольностью и мелкокупольностью [3–5]. Учитывая малый размер структур, и, соответственно, небольшие запасы углеводородного сырья, встает вопрос об их разбраковке на продуктивные и «пустые», так как каждую мелкую антиклинальную структуру проверить глубокой (около 3 км) поисковой скважиной не представляется возможным. Поэтому ведущие нефтедобывающие компании неохотно рассматривают нефтяные перспективы южных районов Западной Сибири, а у средних и малых компаний, как правило, не хватает финансового обеспечения на полный цикл поисково-разведочных работ. Отсюда актуальными становятся следующие задачи:

1) предложить и заинтересовать ведущие нефтегазодобывающие компании крупными перспективными геологическими объектами;

2) применить методику дистанционного прогноза «нефтяных» земель, проведя нефтеперспективное районирование и фильтрацию «пустых» и продуктивных структур.

Материалы региональных сейсмических исследований с учетом скважинных материалов показывают, что в осадочном чехле на юге ЗСП выделяется несколько крупных впадин, которые соответствуют субмеридиональным грабенообразным протяженным структурам доюрского фундамента [6–8].

Во-первых, грабенообразные впадины характеризуются полным набором мезозойских осадочных отложений от триаса до мела. Во-вторых, грабенообразные структуры фундамента ограничены глубинными разломами, которые являются трансляторами углеводородных флюидов к земной поверхности [9]. В-третьих, во впадинах накапливается обломочный материал сноса, который является, как правило, хорошим коллектором. В-четвертых, присутствие баженовского горизонта является качественной покрышкой, что резко увеличивает вероятность образования нефтяных залежей [2].

В связи с недостаточностью геологических и геофизических материалов, в детализации региональных нефтепоисковых работ находят свое место различные пакеты материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Для дешифрования этих пакетов может применяться не только «классическое» распознавание образов, но и передовые программные продукты, использующие нейронные сети.

Спутниковые технологии позволяют в первом приближении оценить нефтеперспективность впадин для постановки дальнейших наземных геологоразведочных работ [3– 5; 10– 12].

Для решения выше поставленных задач были использованы космические материалы в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном диапазонах [10–12]. Это фрагменты космических снимков масштаба 1 : 500 000 (компонент дистанционной основы Геолкарты-1000, композит по материалам космических фотосъемок камерами «КАТЭ-200» – спектральные зоны 510–850 нм), фрагменты глобальной мозаики, снятые сканером ETM+ спутника Landsat-7 в спектральном диапазоне 0,53–0,90 и 1,55–1,75 мкм, а также цифровая модель рельефа (ЦМР) – SRTM DEM на основе данных сенсоров SIR-C и X-SAR космического аппарата Shuttle.

Методика геологического анализа и дешифрования космических материалов состояла из трех этапов [3, 4].

Первый этап «Обработка и дешифрование космических изображений» предполагал топогеодезическую привязку космических снимков, проведение геоморфологических исследований и линеаментного анализа. Далее, при генерализации схемы линеаментов были выделены геодинамически напряженные зоны (ГДНЗ). Они представляют собой «каркас мобильных структур растяжения» и характеризуют региональную глубинную трещинноватость, а также флюидодинамические процессы в осадочном чехле.

Второй этап «Комплексирование геолого-геофизических материалов с системами ГДНЗ» заключался в сравнительном анализе каркаса ГДНЗ с геофизическими и геохи-

мическими полями, со структурными картами, с геологическими разрезами, данными поисково-разведочных скважин и т.д. и т.п.

Третий этап «Геологическая интерпретация космических материалов» заключался в рассмотрении процессов нефтегазонакопления в ловушках УВ в каркасе ГДНЗ.

Интересным фактом является то, что ловушки УВ с доказанной нефтегазоносностью находятся в пределах определенного радиуса от мест пересечения ГДНЗ (узлы ГДНЗ). На дневной поверхности узлы ГДНЗ характеризуются аномальными положительными, либо отрицательными эффектами геофизических, геохимических, тепловых, радиоактивных, микробиологических и других полей.

Крупные впадины осадочного чехла, унаследовавшие общую структуру серии грабенов фундамента, как правило, совпадают в плане с ГДНЗ, выделенными по космическим материалам.

Анализ регионального размещения месторождений УВ на материалах ДЗЗ показал, что большинство месторождений нефти и газа расположены вблизи линейных тепловых зон. Эти зоны, как правило, отображают активные флюидопроводящие транзитные разломы, выходящие из фундамента и секущие весь осадочный чехол до земной поверхности. На картах более крупного масштаба, месторождения нефти и газа приурочены к локальным тепловым аномалиям, либо к их «кольцам». Это подтверждается заверочными наземными геотермическими и геохимическими съемками. Объяснением данного факта является вертикальный процесс тепломассопереноса по флюидопроводящим системам трещин и разломов, оконтуривающим ловушки УВ [9].

Таким образом, тепловая космическая съемка (ТКС) может служить первым шагом в определении нефтегазоперспективности структурно-тектонических элементов верхней части осадочного чехла на малоизученных территориях.

Но следует отметить, что не все тепловые аномалии являются прямым критерием нефтегазонасыщения осадочных отложений.

Чтобы систематизировать космические тепловые аномалии (какие из них связаны с месторождениями УВ, а какие – нет), в Центре экологической безопасности РАН РФ (г. Санкт-Петербург) была разработана методика, базирующаяся на применении многократной ТКС и специальном алгоритме обработки тепловых изображений земной поверхности (ЗП). Методика включала расчет физических характеристик земной поверхности, таких как плотность потока суммарной солнечной радиации, альбедо, коэффициент излучения, тепловая инерция (ТИ) ЗП, конвективный тепловой поток (КТП) из недр, суточное испарение влаги (СИ) ЗП, влажность почвы, цифровая модель рельефа (ЦМР) ЗП, структура грунта, метеорологические условия, концентрация в атмосфере оптически активных газов ($CO_2$, $SO_2$) и время [10, 12].

Алгоритм расчета КТП, ТИ и СИ базировался на математической модели суточного хода температуры земной поверхности (ТЗП), учитывая метеоданные (температура, давление, влажность воздуха, скорость ветра, облачность) и основные факторы, под влиянием которых формируется ТЗП.

Для районирования территории юга Западной Сибири на основе полученных количественных характеристик земной поверхности были подготовлены цифровые мозаики посредством программных средств Geomatics и ERDAS. Интерпретация космических материалов с целью прогноза нефтеперспективных земель проводилась через процедуру классификации вышеполученных данных. Для эталонной классификации был применен метод максимального правдоподобия [10].

В качестве обучающей выборки использованы нефтяные, нефтеконденсатные и газоконденсатные месторождения, приведенные в ГИС «Природные ресурсы России». Для анализа было выбрано несколько эталонов, представляющих набор признаков ЗП на уже известных месторождениях нефти и газа, находящихся по близости от исследуемой территории.

В результате, из выбранных эталонов (месторождений) на территории юга Западной Сибири вплоть до границы с Республикой Казахстан, пространственно зафиксированы места (площади), на которых проявились признаки с Кальчинского, Полуньяхского, Тайтымского и Тевризского нефтяных, нефтегазовых и газоконденсатных месторождений.

Пространственное распределение этих мест имеет четкую закономерность. Начиная с широты г. Тобольска и до государственной границы с Республикой Казахстан, количество и площадь этих перспективных мест постепенно сокращается, а в приграничных районах полностью исчезает. Данный тренд является логичным, так как к границе с Республикой Казахстан практически сокращается толщина осадочного чехла, для которого были выбраны эталоны (месторождения).

При наложении структурной карты по кровле баженовского горизонта с нефтеперспективными площадями, выявленными с помощью эталонной классификации по данным ДЗЗ, приблизительно половина мелких структур была отнесена в разряд бесперспективных. Таким образом, количество перспективных антиклинальных структур подверглось первому этапу фильтрации и их количество резко сократилось, практически в 2 раза.

По данным дистанционного прогноза залежей УВ, проведенного с использованием материалов ДЗЗ, граница нефтеперспективности земель на юге Западной Сибири сдвинулась до широты п.г.т. Лебяжье Курганской области.

Анализ пространственного распределения площадей (участков) с признаками Кальчинского, Полуньяхского, Тайтымского и Тевризского нефтегазовых и газоконденсатных месторождений, выделенных по материалам ДЗЗ, и грабенообразных впадин, выявленных по региональным сейсмическим работам, показал: а) перспективные участки, в основном, находятся в пределах впадин; б) перспективные участки тяготеют к бортовым частям впадин; в) наибольшее количество участков зафиксировано на восточных бортах впадин.

Материалы геолого-геохимических и геофизических исследований не исключают возможности наличия залежей УВ в палеозойском этаже южных районов Западной Сибири. Но в этом случае, при привлечении материалов ДЗЗ, будут учитываться уже другие признаки ЗП и, соответственно, другое районирование территории, другая классификация и другие эталоны. Эти процедуры уже будут направлены на поиск месторождений углеводородов в фундаменте.

Результаты данных исследований могут существенно оптимизировать нефтепоисковые работы.

**Список литературы**

1. Шпуров И.В., Файбусович Я.Э., Рыльков В.А. Задачи и перспективы развития минерально-сырьевой базы, основы экономического развития юга Тюменской области // Наука и ТЭК. 2011. № 1. С. 10–16.

2. Цимбалюк Ю.А., Боркун Ф.Я., Шепелев Я.А. Анализ состояния вопроса. Обоснование методики оценки запасов нефти в верхнеюрских отложениях (баженовская и абалакская свиты) Западной Сибири // НЕФТЬГАЗТЭК: материалы VI Тюмен. междунар. инновационного форума. Правительство Тюменской области, комитет по инновациям Тюменской области. 2015. С. 438–449.

3. Курчиков А.Р., Белоносов А.Ю., Мартынов О.С. Региональная оценка перспектив нефтегазоносности юга Западно-Сибирского бассейна по комплексу дистанционных и наземных данных // Материалы VII науч.-практ. конф. «Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа». Ханты-Мансийск, 2003. Т. 1. С. 41–44.

4. Применение дистанционных и заверочных наземных работ для оценки перспектив нефтегазоносности Вагайско-Ишимской впадины / А.Ю. Белоносов, Р.И. Тимшанов, А.Е. Кудрявцев, С.А. Шешуков // Академич. журн. Западной Сибири. 2016. Т. 12, № 3 (64). С. 5–6.

5. Структурно-геодинамический анализ геофизических и космических материалов южной части Западно-Сибирской плиты / А.Ю. Белоносов, Д.В. Борисов, А.Е. Кудрявцев, С.А. Шешуков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2017: материалв XIII Междунар. науч. конгр. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ. 2017. Т. 2. С. 172–175.

6. Воронов В.Н., Цимбалюк Ю.А., Смирнов Л.В. Доюрские комплексы Западной Сибири – актуальные нефтегазоносные объекты // Наука и ТЭК. 2011. № 6. С. 43–50.

7. Кирда Н.П. К проблеме нефтегазоносности доюрских комплексов в центральных районах Западной Сибири и Южном Зауралье // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2013. № 3. С. 39–49.

8. Кирда Н.П. Перспективы нефтегазоносности доюрских комплексов Зауралья // Горные ведомости. 2013. № 10 (113). С. 20–39.

9. Матусевич В.М., Курчиков А.Р., Рыльков А.В. Геофлюдальные системы Западно-Сибирского мегабассейна как фактор массопереноса вещества и энергий в 4-мерном пространстве // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Нефть и газ. 2011. № 2. С. 4–13.

10. Горный В.И., Крицук С.Г. Прогноз нефтеперспективных площадей в республике Чувашия на основе визуального и инструментального анализа цифровых космических материалов // II Междунар. конф. «Перспективы развития и освоения топливно-энергетической базы Северо-Западного экономического района Российской Федерации»: тез. докл. 2000. С. 41–42.

11. Belonosov A.Y. Kudryavtsev A.E., Borisov D.V. Processing of satellite imagery with satellite «Terra» to decipher the oil-bearing geological structures of south of Western Siberia // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017. № 10 (6). P. 758–763.

12. Горный В.И., Степанов И.В. Комплексирование тепловой многоспектральной и аэромагнитной съемок при решении прогнозно-поисковых задач // Разведка и охрана недр. 2001. Вып. 9. С. 39–43.

УДК 528.8.04, 528.88

**И. Ю. Ботвич, Т.И. Письман, Д.В. Емельянов, А.П. Шевырногов**
Институт биофизики СО РАН, ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярск, Россия
e-mail: irina.pugacheva@mail.ru

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАПОВЕДНИКА СТОЛБЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Проведено изучение пространственно-временной изменчивости лесной растительности заповедника Столбы (Красноярский край) по спутниковым данным Modis (продукты MOD09Q1, MYD09Q1). Построены пространственные распределения линейных трендов NDVI лесной растительности заповедника за период с 2000 по 2018 г. Проведена оценка направленности изменений NDVI лесной растительности в пределах исследуемого региона. Определены области с отрицательными и положительными трендами. Установлено, что для большинства классов растительности преобладают отрицательные тренды NDVImean и NDVIjuly. Наибольшее количество пикселей с отрицательным уклоном трендов NDVImean и NDVIjuly имеют классы кедр сибирский *Pinus sibirica* и пихта сибирская *Abies sibirica.* Преобладание количества пикселей с положительным уклоном линейного тренда NDVImean характерно для класса сосна обыкновенная *Pinus silvestris*.

*Ключевые слова: заповедник Столбы, Modis, тренды, NDVI, хвойная и лиственная растительность, временные ряды.*

**Введение.** Государственный природный заповедник «Столбы» занимает площадь около 47 тыс. га, располагается на правом берегу р. Енисей между его притоками Базаихой, Маной, Б. Слизневой; в северо-восточной части граничит с Красноярском. В условиях труднодоступности и обширности территории заповедника методы дистанционного зондирования позволяют получать неоценимую информацию о состоянии лесной растительности.

По данным наземных исследований известно, что с 1960-х гг. наметилась тенденция ухудшения санитарного состояния со случаями массового усыхания осинников на территории заповедника [1]. С середины 1990-х гг. в горных лесах Южной Сибири наблюдается усыхание пихты сибирской (*A. Sibirica Ledeb.*) [2].

Анализ отдельных тестовых участков, расположенных на территории заповедника, показал, что с 2003 по 2016 г. хвойные и лиственные древостои имеют отрицательный уклон трендов усредненных NDVI за период май – сентябрь ($NDVI_{mean}$) и максимальных значений NDVI. При этом уклон трендов усредненных NDVI хвойных древостоев за период май – сентябрь и максимальных NDVI превышает уклон трендов NDVI лиственных древостоев. Это свидетельствует о более быстром уменьшении биомассы хвойной растительности, чем лиственной [3].

Цель исследования – оценка пространственно-временной изменчивости древесной растительности заповедника «Столбы» Красноярского края по спутниковым данным.

**Методика и объекты исследования.** Объектом исследований является древесная растительность заповедника Столбы. В заповеднике восемь лесообразующих пород: хвойные – лиственница сибирская (*Larix sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*), пихта сибирская (*Abies sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*) и лиственные – осина (*Populus tremula*), береза белая (*Betula alba*) и береза по-

© Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П., 2019

вислая (*Betula pendula*). Изучение динамики спектральных оптических характеристик древесной растительности проводилось по спутниковым данным MODIS (продукты MOD09Q1, MYD09Q1) в течение 2000–2018 гг. В ходе тематической обработки спутниковой информации производился расчет средних значений Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua. Расчет NDVI базируется на данных красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) диапазонов оптического спектра [4].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Для определения местоположения исследуемых тестовых участков использовали информацию Экологического атласа заповедника Столбы (http://stolby.torins.ru/main.php) [5].

**Результаты и обсуждения.** Оценка пространственно-временной изменчивости древесной растительности заповедника Столбы производилась на основе анализа пространственного распределения значений линейных трендов $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{july}$ растительности в течение периода с 2000 по 2018 г.

Расчет линейного тренда $NDVI_{mean}$ ($NDVI_{july}$) отдельного пикселя спутникового изображения основывается на значениях NDVI усредненных за период с мая по сентябрь (– июль) каждого периода вегетации в течение 2000–2018 гг.

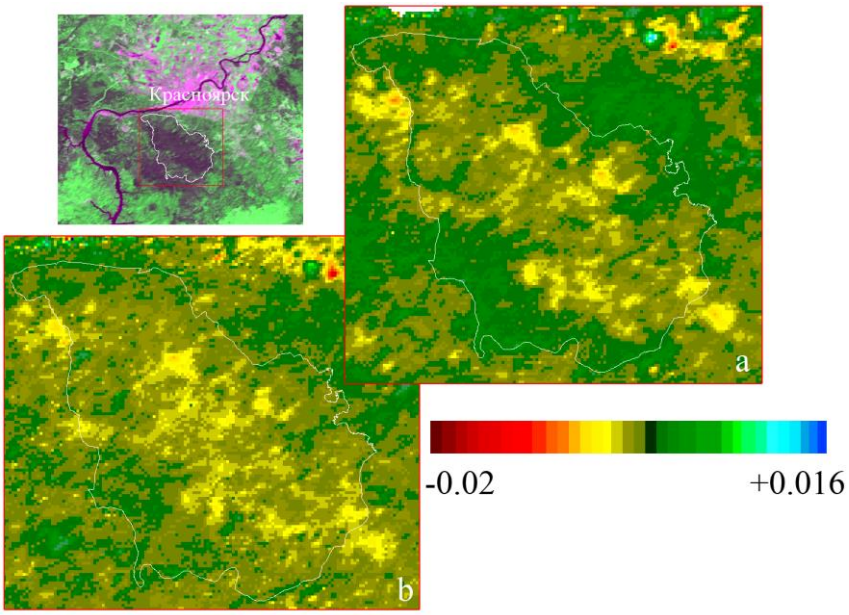



Рисунок. Пространственное распределение значений трендов: *a* – NDVImean; *b* – NDVIjuly растительности в течение периода с 2000 по 2018 г.

Анализ распределения количества пикселей по значениям тренда $NDVI_{mean}$ выявил, что для класса хвойная растительность преобладают отрицательные значения линейного тренда (на 30 %), для класса лиственная растительность – количество пикселей с отрицательными значениями уклона линейного тренда на 4,5 % больше, чем с положительными. В целом, для большинства классов растительности преобладают отрицательные тренды $NDVI_{mean}$. Установлено, что для классов кедр сибирский *Pinus sibirica* и пихта сибирская *Abies sibirica* значительно доминируют пиксели с отрицательным уклоном тренда на 95 и 83 % соответственно, по сравнению с положительным. Для классов осина *Populus tremula*, береза *Betula* пиксели с отрицательным уклоном тренда преобладают на 5,9 и 1,1 %. Преобладание количества пикселей с положительным уклоном линейного тренда NDVImean характерно для класса сосна обыкновенная *Pinus silvestris.*

Анализ распределения количества пикселей по значениям тренда $NDVI_{july}$ показал, что для всех классов растительности доминируют отрицательные значения линейного тренда.

**Заключение.** В ходе исследований изменчивости древесной растительности на территории заповедника Столбы (Красноярский край) по спутниковым данным Modis построены пространственные распределения значений линейных трендов $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{july}$ в течение периода с 2000 по 2018 г.

Анализ полученных результатов показал, что:

- для большинства классов растительности преобладают отрицательные тренды $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{july}$;
- наибольшее количество пикселей с отрицательным уклоном трендов $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{july}$ имеют классы *Pinus sibirica* и *Abies sibirica*;
- преобладание количества пикселей с положительным уклоном линейного тренда $NDVI_{mean}$ характерно для класса *Pinus silvestris*;

В целом на основе представленных данных можно сделать вывод о частичном ухудшении состояния лесной растительности Государственного заповедника Столбы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-45-243007 р_мол_а.*

**Список литературы**

1. Татаринцев А.И. Состояние и причины усыхания древостоев Populus tremula l. в горно-таежных лесах зеленой зоны г. Красноярска (ТЭР заповедника «Столбы») // Хвойные бореальной зоны. XXIX. 2011. № 3-4. С. 323–326.
2. Бажина Е.В. О факторах усыхания пихтовых лесов в горах Южной Сибири // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Биология. Экология. 2010. Т. 3, № 3. С. 20–25.
3. Письман Т.И., Ботвич И.Ю., Шевырногов А.П. Оценка состояния лесной растительности Красноярского края (заповедник Столбы) по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2018. Т. 15, № 5. С. 130–140.
4. Deering D.W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors // Ph. D. Dissertation. Texas A & M University. College Station. 1978. T. X. 338 p.
5. Erunova M.G., Sadovsky M.G., Gosteva A.A. GIS-aided simulation of spatially distributed environmental processes at Stolby State Reservation// Ecological Modelling. 2006. T. 195, № 3-4. C. 296–306.

УДК 551.465.7

**В.И. Бышев[1], В.Г. Нейман[2], А.Н. Сидорова[3], И.В. Серых[4], М.В. Анисимов[4]**

[1] Доктор физико-математических наук
[2] Доктор географических наук, главный научный сотрудник
[3] Научный сотрудник
[4] Кандидат физико-маетматических наук
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Изменчивость современного глобального климата демонстрирует характерную мультидекадную ритмику (1905–1975, 1940–2000, 1975–2018, …). Каждый ритм состоит из двух фаз: из относительно влажной (1905–1935, 1975–1999) и континентальной (1940–1974, 2000–2018, …). Переходы климата из одной фазы в другую совершаются стремительно и представляют собой климатические сдвиги (1936–1939, 1973–1976, 2001–2005). Изучение механизма наблюдаемой изменчивости и её источников является важнейшей проблемой в науках о Земле.

*Ключевые слова: современный климат, изменчивость, фазовый переход, океан, атмосфера, планетарные осцилляции.*

**Введение.** Увеличение частоты экстремальных природных явлений в XX – начале XXI столетия: аномальные морозы и жара, засухи и наводнения, лесные пожары на Евроазиатском континенте, в Северной Америке и Австралии – всё это не без оснований связывается с изменчивостью современного климата. Следствием изменения климата являются также экстремальные ледовые условия в Баренцевом море в 1966 и 1998 гг. [1] (с замерзанием Мурманского морского порта), засухи в Приморском крае в 1982 и 1997 гг. [2] (с нарушением водоснабжения г. Владивостока), природные пожары в Центральной России в 1972 и 2010 гг. Наблюдаемые климатические изменения уровня Каспийского моря с его падением до середины 70-х гг. прошлого века и ростом, вопреки прогнозу, после позволили избежать катастрофического разворота стока северных рек для спасения Каспия. Уровень моря сначала XXI столетия вновь начал понижаться [3].

Текущий климат характеризуется (рис. 1) мультидекадной ритмикой [4]. Каждый ритм продолжается 50–70 лет и состоит из двух фаз по 25–35 лет. Одна от другой фазы отличаются степенью континентальности. «Внезапные» и быстрые фазовые переходы, сопровождаемые значительными качественными изменениями климата, воспринимаются как «скачки» или климатические сдвиги [5]. За последние 100 лет фазовые изменения климата (рис. 1) имели [6] планетарный характер и происходили в конце 30-х и в середине 70-х гг. прошлого века, а также на рубеже XX и XXI столетий.

Фазовые траектории позволяют выделить [7] различные сценарии климата в Североатлантическом регионе: вынос тёплых и влажных воздушных масс с Атлантического океана на европейский континент (1905–1935 и 1975–1999 гг.) и, напротив, ослабление выноса атлантических воздушных масс на континент (1940–1974 гг. и 2000–2018…). В первом случае к востоку от Атлантики на континенте устанавливался тёплый и влажный климат, а во втором – более континентальный. Катастрофические пожары в 1972 и 2010 гг. в Центральной России характеризовались одними и теми же термобарическими условиями.

© Бышев В.И., Нейман В.Г., Сидорова А.Н., Серых И.В., Анисимов М.В., 2019

**Материалы и методика.** Изучение изменчивости современного климата основывалось на: 1) диагностических оценках по материалам наблюдений термохалинной структуры вод северо-западной части Тихого океана (СЗТО) [8] (период 1950–2014 гг., район 30–62° с.ш., 130–180° в.д., слой 0–1 000 м, 1 048 113 станций); 2) анализе глобальных полей приповерхностной температуры и атмосферного давления [9–11] и 3) результатах численного моделирования термохалинной циркуляции вод Мирового океана [12].

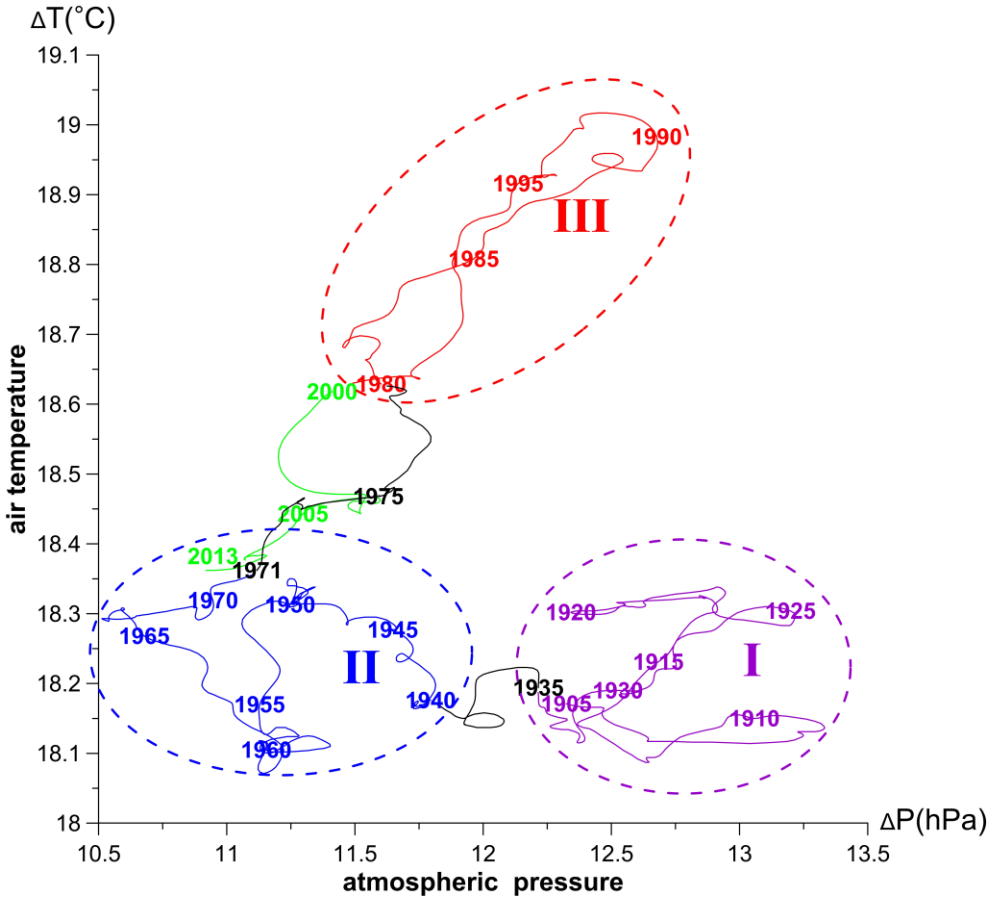



Рис. 1. Фазовая траектория термобарического параметра состояния северо-атлантического региона (штриховыми контурами выделены фазовые подмножества, соответствующие различным сценариям климата): I – 1905–1935; II – 1940–1972; III – 1980–1999

**Результаты и их обсуждение.** Изучение сезонной и многолетней изменчивости термохалинной структуры вод СЗТО показало (рис. 2), что в фазу 1960–1974 гг. воды верхнего деятельного слоя (ВДС) в структурных зонах субтропической и смешения были заметно прогретыми. В фазу 1975–1999 гг. наблюдалось значительное выхолаживание ВДС этих структур, а в 2000–2014 гг. их ВДС вновь начал прогреваться. Экспериментальные исследования по проекту МЕГАПОЛИГОН (1987) позволили установить [13], что выхолаживание вод ВДС в СЗТО происходило вследствие отрицательных бюджетов тепла поверхности океана, обусловленных высокими величинами потоков явного и скрытого тепла из океана в атмосферу при аномально развитой облачности, экранирующей приток коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана. Отметим, что аналогичная ситуация в эту фазу климата была и в Северной Атлантике [14].

В фазу 2000–2014 гг. прогрев ВДС происходил на фоне ослабления потоков явного и скрытого тепла из океана [15] и сокращения содержания водяного пара в глобальной атмосфере [16], а следовательно, и общей облачности. Последнее способствует увеличению притока коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана

и аномальному прогреву её тонкого (~10–20 м) приповерхностного слоя. Вместе с тем промежуточные воды (слой 100–300 м) продолжают сохранять пониженное, относительно фазы 1960–1974 гг., теплосодержание [8]. Численное моделирование позволило установить наличие планетарно-океанической осцилляции, сопровождающееся фазами выхолаживания и теплонакопления ВДС Мирового океана [4]. Открытие глобальной атмосферной осцилляции [18] выявило существование ещё одной планетарной структуры, сопутствующей наблюдаемой мультидекадной изменчивости климата.

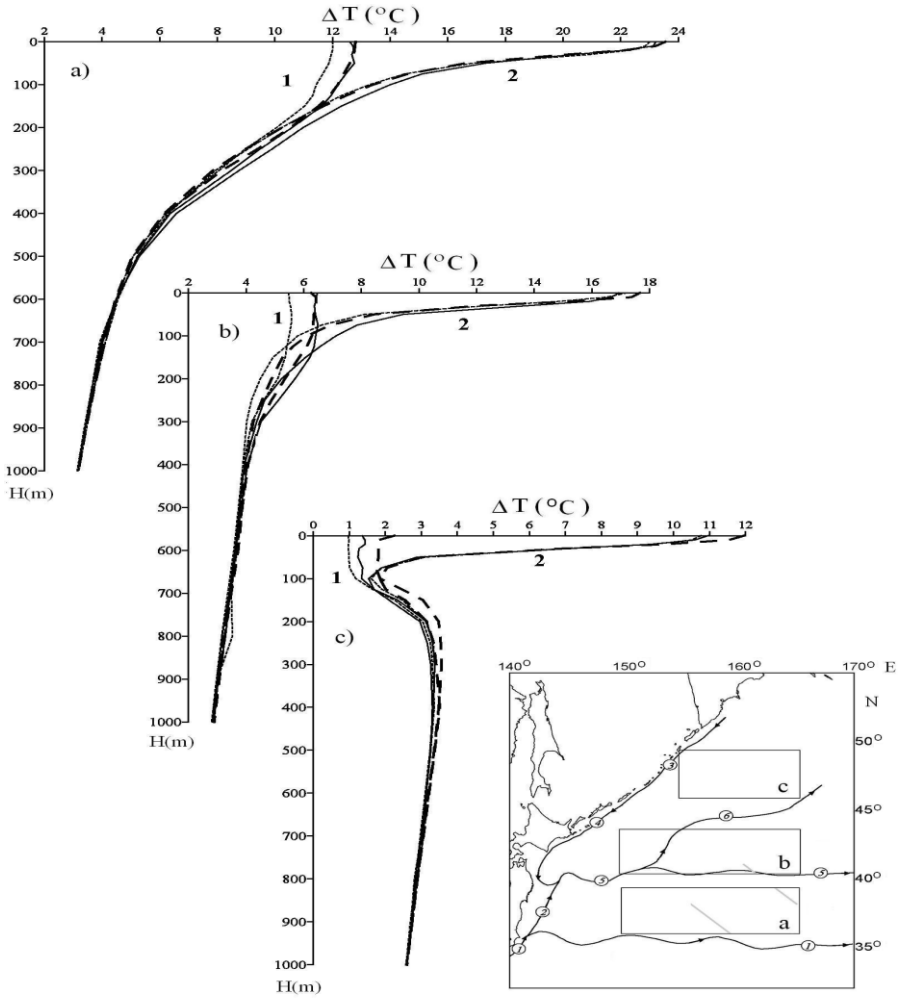



Рис. 2 Средние вертикальные распределения температуры верхнего 1000-метрового слоя воды в СЗТО в холодный (1) и тёплый (2) сезоны для трёх структурных зон: (a) субтропической, (b) смешения, (c) субарктической. Осреднения профилей температуры произведены для трёх фаз климата: 1960-1974 (непрерывная кривая), 1975–1999 (штрих-пунктирная кривая), 2000–2014 (точечная линия). На врезке показана схема главных течений (линии со стрелками: 1 – Куросио; 2 – северная ветвь Куросио; 3 – Курильское течение; 4 – Ойясио; 5 – субарктическое течение; 6 – Северная ветвь субарктического течения

Результаты численного моделирования (рис.1, *б*) из [13] и диагностические оценки (рис. 2) показали хорошее согласование. Это позволило рассматривать модельные вычисления в качестве удовлетворительно отражающих реальную эволюцию термохалинной структуры вод Мирового океана.

**Заключение.** Наблюдаемая мультидекадная (50–70 лет) изменчивость современного климата представляет его важнейшую особенность.

Отдельный мультидекадный ритм представляет собой две качественно различающиеся фазы по 25–35 лет каждая: относительно влажную фазу, в течение которой ВДС Мирового океана, локально отдавая явное и скрытое тепло в атмосферу, совершает своеобразную тепловую разгрузку, и более континентальной фазы, когда ВДС океа-

на аккумулирует тепло, стремясь восстановить своё начальное теплосодержание, которое наблюдалось накануне его тепловой разгрузки.

Мультидекадную изменчивость глобального климата Земли сопровождают изменения теплосодержания ВДС Мирового океана. Рост теплосодержания ВДС соответствует континентальной, а его выхолаживание – влажной фазе климата.

Наблюдаемая ритмика климата осуществляется и поддерживается выявленными нами планетарными структурами: глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО) и мультидекадной осцилляцией теплосодержания океана (МОСТОК).

*Работа выполнена в рамках государственного задания, тема № 0149-2019-0002.*

**Список литературы**

1. Похолодание Баренцева моря в период явления Эль-Ниньо 1997–1998 гг. / В.И. Бышев, Л.И. Галеркин, Н.Л. Галеркина [и др.] // ДАН. 2001. Т. 376, № 3. С. 397–400.
2. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, В.И. Пономарёв [и др.] // ДАН. 2014. Т. 458, № 1. С. 92–96.
3. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / ред. Е.С. Нестеров. М.: Триада Лтд. 2016. 378 с.
4. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Климатические ритмы теплового режима Мирового океана // Природа. 2016. № 8. С. 26–33.
5. Wang G., Swanson K.L., Tsonis A.A. The pacemaker of major climate shifts // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L07708. DOI: 10.1029/2008 GL036874.
6. Изменение планетарного климатического режима на рубеже XX–XXI веков / В.И. Пономарев, Е.В. Дмитриева, С.П. Шкорба, А.А. Карнаухов // Вестн. МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.
7. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых // ДАН. 2011. Т. 438, № 6. С. 817–822.
8. Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // ДАН. 2017. Т. 477, №2. С. 240–244.
9. Allan R.J., Ansell T.J. A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850-2004 // J. Climate. 2006. № 19. P. 5816–5846.
10. The twentieth century reanalysis project. Quarterly J. Roy / G.P. Compo [et al.] // Meteorol. Soc. 2011. № 137. P. 1–28. DOI: 10.1002/qj.77.
11. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset / C.P. Morice, J.J. Kennedy, N.A. Rayner, P.D. Jones // J. Geophys. Res. 2012. № 117. D08101. DOI: 10.1029/2011JD017187.
12. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Серия: Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 3–15.
13. Бышев В.И., Снопков В.Г. О формировании поля температуры воды поверхности океана в энергоактивной зоне северо-западной части Тихого океана на примере полигона «МЕГАПОЛИГОН» // Метеорология и гидрология. 1990. № 11. С. 70–77.
14. Аномальное состояние Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в 1990 г. / В.И. Бышев, Л.Н. Копрова, С.Е. Навроцкая [и др.] // ДАН. 1993. Т. 331, № 6. С. 735–738.
15. Междекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость / М.В. Анисимов, В.И. Бышев, В.Б. Залесный, С.Н. Мошонкин // ДАН. 2012. Т. 443, № 3. С. 372–376.
16. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data / K. Mao, J. Chen, Z. LI [et al.] // Chin. Geogra. Sci. 2017. Vol. 27, № 1. P. 1–7. DOI: 10.1007/s11769-017-0841-6.
17. О мультидекадной изменчивости современного климата и перспективах её мониторинга / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, А.Н. Сидорова [т др.] // Материалы V Междунар. науч. конфер. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», Красноярск, 11–14 сентября 2018. С. 260–263.
18. Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 62–71.

УДК 528.88

**Е.В. Варламова[1, 2], В.С. Соловьев[1, 2]**

[1] Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия

[2] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

# ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ NDVI РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ AVHRR/NOAA

Проведены исследования особенностей пространственно-временной динамики NDVI растительного покрова Восточной Сибири по данным GIMMS (1982–2015 гг.). Карта распределения тренда сезонных (май-сентябрь) значений NDVI демонстрирует, что на севере Якутии наблюдается обширная область с наиболее высокими показателями (~15–20 %) тренда NDVI. Анализ среднемесячных (с мая по сентябрь) вариаций NDVI на севере Якутии показал, что существенный вклад в тренд сезонных NDVI вносит устойчивый рост (на ~26 %) его майских значений за последние 12 лет (2004–2015 гг.). Вариации майских значений NDVI хорошо согласуются (R = 0,9) с изменениями майской температуры воздуха, который также имеет устойчивую тенденцию роста (на ~6,1 °C). Следует отметить отсутствие связи вариаций NDVI с осадками, что вероятно обусловлено невысоким их уровнем для исследуемой территории.

*Ключевые слова: AVHRR/NOAA, GIMMS, NDVI, растительный покров, Восточная Сибирь.*

**Введение.** Длинные ряды спутниковых данных AVHRR/NOAA (продукты LTDR, GIMMS) позволяют отслеживать изменения в окружающей среде, вызванные процессами глобального изменения климата [1]. Растительный покров является одним из наиболее чувствительных природных индикаторов таких изменений. В работах [2–4] приводятся результаты исследований многолетних трендов состояния лесов и изменений фенологических сроков, показывающих, что за последние десятилетия наблюдаются существенные пространственно-временные изменения параметров растительного покрова (биофизических характеристик, характеристик фенологических ритмов). Целью работы является исследование особенностей пространственно-временной динамики NDVI растительного покрова Восточной Сибири за период 1982–2015 гг. по данным GIMMS.

**Данные и методика.** Для анализа динамики NDVI за последние три десятилетия был использован набор данных продукта GIMMS3g (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, 3rd generation) [5], представляющий собой композиты 15-дневных максимальных значений NDVI за период 1982–2015 гг. Для оценки связи между вариациями NDVI и метеорологическими параметрами были использованы среднемесячные временные ряды приземной температуры воздуха и атмосферных осадков продукта CRU TS (Climatic Research Unit Time-series) v.4.01 [6], основанного на наблюдениях наземных станций и охватывающего период с 1901 по 2015 г.

**Результаты и обсуждения.** Временные ряды NDVI были приведены к среднемесячному разрешению и построены карты линейного тренда NDVI на территории Сибири за период май – сентябрь 1982–2015 гг. Сезонный (усредненный за май – сентябрь)

© Варламова Е.В., Соловьев В.С., 2019

тренд NDVI показан на рис. 1, *а*. Как следует из рис. 1, *а*, карта распределения сезонного тренда NDVI неоднородна, однако, в целом, преобладает положительная динамика со средним ростом тренда NDVI около 3 %. Обширная область с наиболее высоким приростом тренда NDVI (10–20 %) наблюдается на севере Якутии (выше 64-й параллели). Следует отметить, что в прирост сезонного тренда NDVI значительный вклад вносит рост майских значений NDVI, тренд которого показан на рис. 1, *б*.

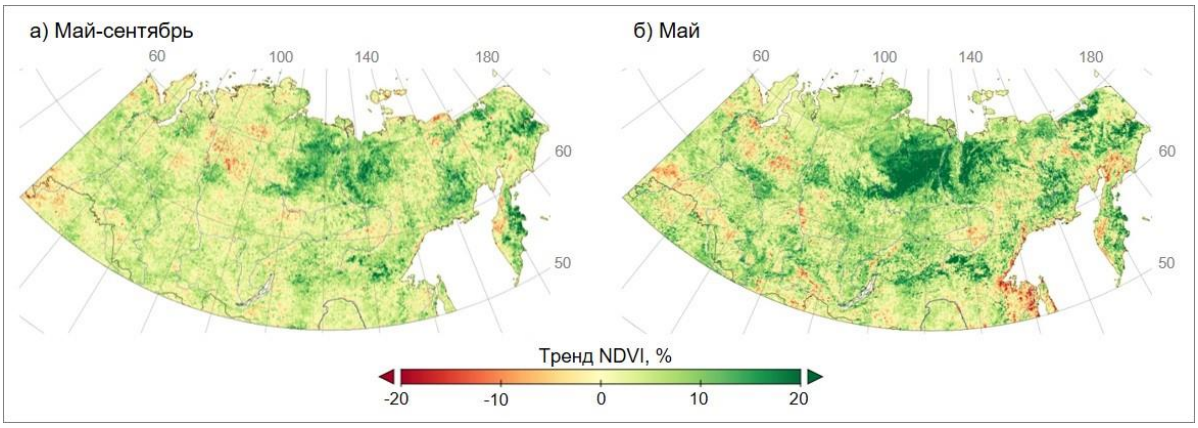



Рис. 1. Тренды NDVI растительного покрова Сибири за период 1982–2015 гг.:
*а* – усредненный за сезон май – сентябрь; *б* – усредненный за май

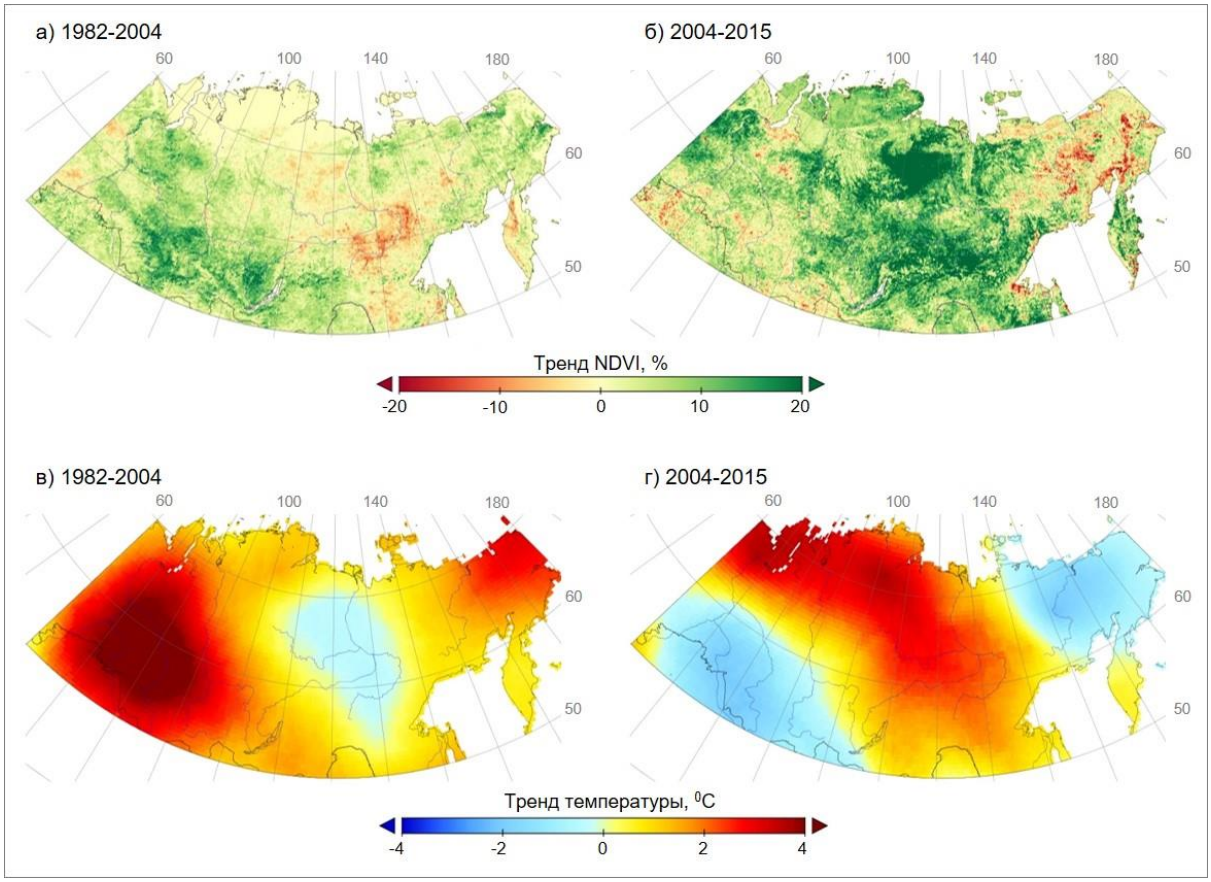



Рис. 2. Тренды майских значений NDVI (*а*, *б*) и температуры воздуха (*в*, *г*)
за периоды 1982–2004 гг. и 2004–2015 гг.

Как было показано ранее в [7], на тестовом участке, расположенном на севере Якутии устойчивый рост (на ~26 %) майских значений NDVI наблюдался в течение 2004–2015 гг., однако в 1982–2004 гг. тренд был незначительным. Также в [7] было показано, что между вариациями майских значений NDVI и температурой воздуха на тестовом участке наблюдается высокая корреляция (R = 0,9) за период 1982–2015 гг. Таким образом, за периоды 1982–2004 и 2004–2015 гг. были построены карты тренда майских значений NDVI (рис. 2, *а*, *б*) и температуры воздуха (рис. 2, *в*, *г*). Как следует из рис. 2, *а*, *в*, в течение 1982-2004 гг. в регионах с наибольшим ростом температуры на ~1,5–3,0 °С (на юго-западе и северо-востоке Сибири, а также на Дальнем Востоке) наблюдается и рост NDVI. Напротив, в области отрицательных и/или околонулевых трендов температуры в районе центральной части Восточной Сибири наблюдаются заметные отрицательные тренды NDVI. В течение второго периода (рис. 2, *б*, *г*) тренды поменяли знак на противоположный. На северо-западе Сибири и в центральной части Восточной Сибири наблюдается устойчивый рост температуры (рис. 2, *г*) и NDVI (рис. 2, *б*).

Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми вариациями NDVI и вариациями среднегодовой приземной температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1982–2015 гг. показаны на рис. 3, *а*, *б*. Из рис. 3, *а* видно, что преимущественно на севере Восточной Сибири наблюдается высокая корреляция между NDVI и температурой воздуха, на остальной территории наблюдается слабовыраженная связь этих параметров. Распределение корреляции между NDVI и осадками (рис. 3, *б*) показывает их незначительную связь на всей территории Сибири.

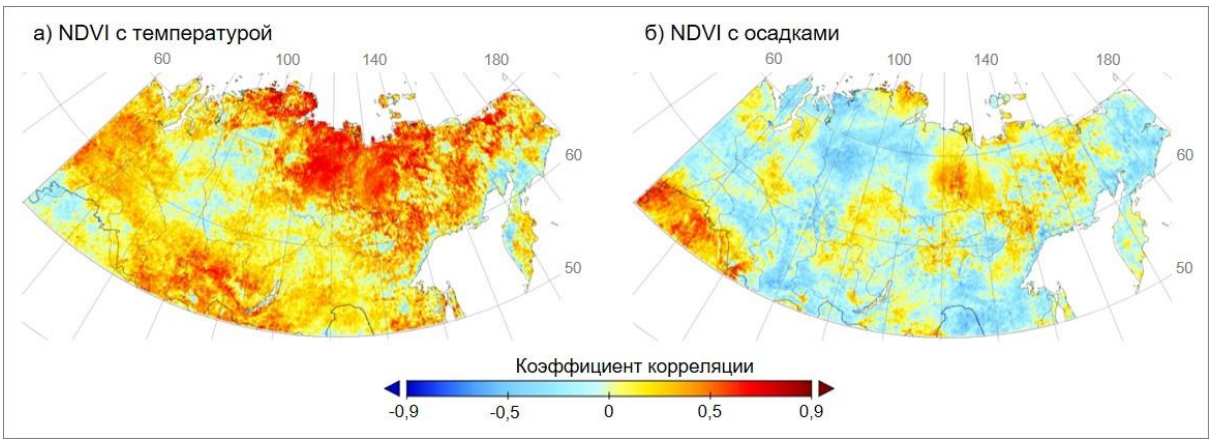



Рис. 3. Коэффициенты корреляции между среднегодовыми вариациями NDVI и вариациями:
*а* – среднегодовой приземной температуры воздуха;
*б* – суммы атмосферных осадков за период 1982–2015 гг.

**Выводы.** Анализ пространственно-временной динамики NDVI растительного покрова Сибири за 1982–2015 гг. показал, что значительный рост (~15–20 %) сезонных значений NDVI наблюдается на севере Якутии. Существенный вклад в сезонный тренд NDVI вносит устойчивый рост (на ~26 %) его майских значений за последние 12 лет (2004–2015), коррелирующих (R = 0,9) с вариациями и ростом (на 6,1 °С) майской температуры воздуха. Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми вариациями NDVI и метеопараметрами показывает тесную связь вариаций NDVI с температурой воздуха преимущественно на севере Восточной Сибири.

**Список литературы**

1. Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change, Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. 1535 P.

2. Satellite monitoring of boreal forest phenology and its climatic responses in Eurasia / Haibo Li, Cuizhen Wang, Lijuan Zhang [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38. No. 19. P. 5446-5463. doi: 10.1080/01431161.2017.1339925

3. Lanhui Wang, Rasmus Fensholt. Temporal Changes in Coupled Vegetation Phenology and Productivity are Biome-Specific in the Northern Hemisphere // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, № 12. P. 1277. DOI:10.3390/rs9121277.

4. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование трендов NDVI и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 206–214.

5. Pinzon J.E, Tucker C.J. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. P. 6929–6960.

6. Harris I.C., Jones P.D. University of East Anglia climatic research unit, CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901 – Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis, 04 December 2017. DOI: 10.5285/58a8802721c94c66ae45c3baa4d814d0.

7. Varlamova E.V., Solovyev V.S. Investigation of Eastern Siberia vegetation index variations on long-term satellite data // Proceedings of SPIE on 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. Vol. 10833. P. 108338C.

УДК 519.688

**И.П. Вершинина**

Кандидат географических наук, Национальный исследовательский
Томский государственный университет, Томск, Россия
e-mail: ipvershinina@rambler.ru

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ ТОМЬ

Выпуск гидрологических прогнозов высокого качества и долгосрочной заблаговременности – одна из приоритетных задач гидрологии. Климат, формирующий питание рек, – динамичная система, в последние годы отмечается особенная его нестабильность и возникает необходимость ежегодной корректировки параметров разработанных моделей прогноза характеристик стока. При апробации модели Д.А. Буракова прогноза уровней воды р. Томь у г. Томск наземные наблюдения запасов воды в снеге дополнялись информацией о динамике площади снегового покрова по спутниковым данным КА «Terra», что дало хорошую точность прогнозов 1–7-дневной заблаговременности.

*Ключевые слова: снежный покров, запас воды в снеге, динамика площади снегового покрова, прогноз уровня воды, река Томь.*

Управления Росгидромета в сибирских регионах для прогноза ежедневных уровней (расходов) воды используют технологию выпуска прогнозов, основанную на концептуальной математической модели формирования стока рек (модель Д.А. Буракова) [1], в том числе и для прогноза на р. Томь у г. Томска. В [2–7] изложены общая структура и принципы построения модели. В современных технологиях выпуска гидрологических прогнозов возможность использования космических снимков заснеженности территории бассейнов сибирских рек для оценки запасов воды в речных бассейнах стали применять с конца девяностых годов XX века. На сегодняшний день процесс получения информация о динамике площади снегового покрова доведён до автоматического режима благодаря специальному программному обеспечению «Системы мониторинга заснеженности», функционирующей в СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"» [8–11].

В бассейнах средних и крупных рек, как отмечается в [7, 8], по спутниковым снимкам среднего линейного разрешения (500 м) заснеженность определяется с погрешностями от 6 и менее процентов. Благодаря совершенствованию автоматизированной системы оперативной оценки площади снегового покрытия речных бассейнов, расчёт высоты снеговой линии со съёмок с искусственных спутников Земли среднего разрешения имеет погрешность около 150–200 м. Обработка данных радиометра *MODIS* со спутников «*Terra»* выполняется без участия оператора. Технология рассчитана на функционирование в автоматическом режиме в пунктах приёма данных *КА «Terra»*.

Результатом работы программы является распределение снегового покрытия в относительном (%) и абсолютном (км$^2$) выражении по высотным зонам в пределах речного бассейна. Выделение снежного покрова ведётся с использованием алгоритма классификации снежного покрова, разработанного в *NASA* для глобального картирования снежного покрова по данным с радиометра *MODIS* [7; 10–13]. Применённый алгоритм, основанный на дифференциальном нормализованном снежном индексе (*Normalized Differential Snow Index, NDSI*), использует специфическое свойство снега к поглощению света в диапазоне 1,6 мкм, что позволяет различать снег и облака.

© Вершинина И.П., 2019

Согласно работ [14, 15] на площадях бассейнов, покрытых лесом, дополнительно рассчитывается значение дифференциального нормализованного растительного индекса (*NDVI*), который даёт возможность идентифицировать наличие лесного покрова. По оценке «Системы мониторинга заснеженности», средняя многолетняя зимняя заснеженность на начало снеготаяния в бассейне реки Томи до города Томска составляет 99 %. Максимальная заснеженность за 16 суток составляет 100 % и наблюдается ежегодно. Остаточную лесистость бассейна, на которой снег не распознаётся, следует считать близкой к 0 % [10].

Для адаптации математической модели прогноза стока в бассейне реки выделяются ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны. В бассейне р. Томь выделены три района (рис. 1, 2).

**Первый район** занимает площадь 21 300 км$^2$ равнинно-холмистого предгорья левого склона бассейна от г. Томска до г. Новокузнецка и часть правого, до пгт. Крапивинский. **Второй район –** площадь 8 200 км$^2$ юго-западной горной правобережной части бассейна. В его пределах расположен бассейн реки Кондомы. **Третий район –** 27 500 км$^2$ – горное лево- и правобережье, от водораздела до г. Новокузнецка, включает бассейны рек, берущих начало на западных склонах Кузнецкого Алатау, Абаканского хребта, северных отрогов Бийской гривы.

Приход весны в бассейне Томи наблюдается в среднем во второй декаде апреля, снеготаяние заканчивается в первой декаде мая, но даты наступления и окончания весны могут варьировать в пределах месяца.

Согласно [3], коррекция распределения нормы запасов воды в снежном покрове по высоте $H$ с использованием данных спутникового мониторинга заснеженности применяется для уточнения поправочных коэффициентов $\varphi(H)$, которые входят в формулу расчёта снегозапаса $S_H$ за конкретный год

$$S_H = m_0 \cdot \left[ \frac{\overline{S_0} + \dfrac{\Delta X_{0H}}{m_0}}{\overline{S_0 + \Delta X_{0H}}} \right] \cdot \left[ \overline{S} + \left( \frac{\Delta H}{100} \right)^n \cdot gradS \right] \cdot \varphi(H), \qquad (1)$$

где $S_0$ – запас воды в снежном покрове на опорной станции; $\overline{S_0}$ – его норма; $\Delta X_{0H}$ – количество осенних осадков за период от даты начала снегонакопления на высоте $H$ до той же даты на опорной станции; $\overline{S_0 + \Delta X_{0H}}$ – средняя многолетняя сумма снегозапаса и осенних осадков; $gradS$ и $n$ – соответственно высотный градиент и показатель степени, характеризующие распределение снега по высоте; $\Delta H$ – разница высот нижней и верхней зон; $\overline{S}$ – норма снегонакопления в нижней высотной зоне; $\varphi(H)$ – поправочный коэффициент, позволяющий корректировать норму снегонакопления при наличии дополнительной информации (при отсутствии последней принимаем $\varphi(H)$ равным единице).

В первом приближении параметры формулы (1) определяются обобщением многолетних данных наземных гидрометеорологических наблюдений. Поправочные коэффициенты $\varphi(H)$ уточняются сопоставлением результатов расчёта заснеженности районов и высотных зон, рассчитанных по модели формирования стока и наблюдениями заснеженности из космоса. Для этой цели по всем имеющимся космическим снимкам бассейна Томи в интерактивном режиме счёта выполняется коррекция коэффициентов так, чтобы как можно ближе совпали оценки «модельной» и «космической» заснеженности. На рис. 3 показаны графики динамики заснеженности бассейна Томи за 2005–2013 гг.

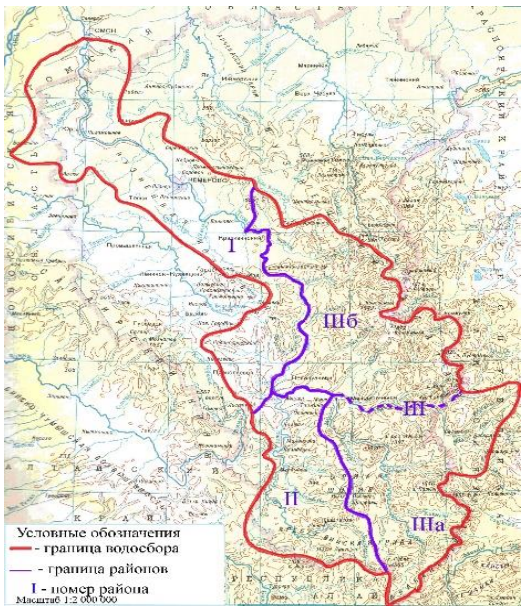



Рис. 1. Картосхема ландшафтно-гидрологических районов бассейна р. Томь [7]

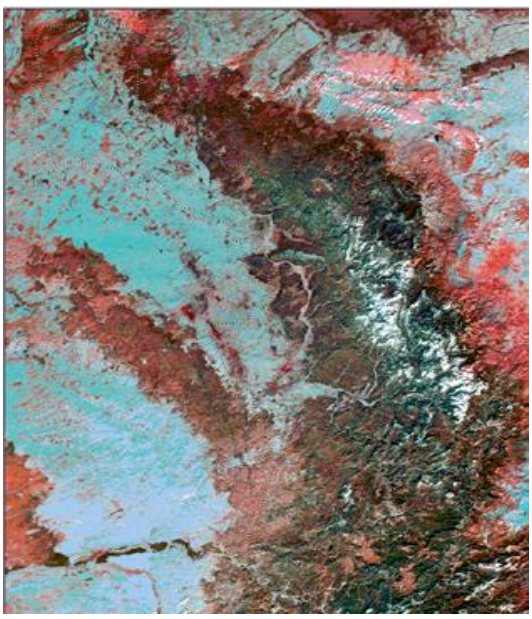


Рис. 2. Спутниковый снимок. бассейн р. Томь (13 марта 2011 г.) [11]

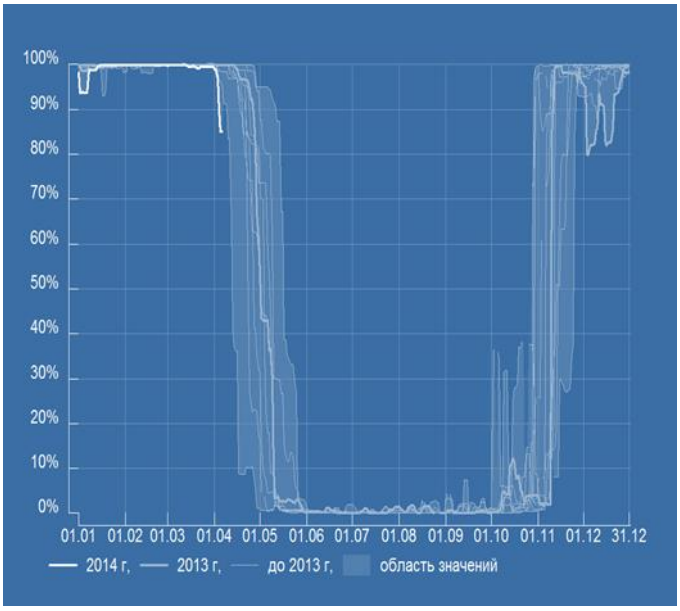



Рис. 3. Динамика заснеженности бассейна р. Томь – Томск за период сентябрь 2005 – март 2014 г. [11]

В результате корректировки временной ход заснеженности, рассчитанный по модели и космическому мониторингу, совпали с расхождениями, не превышающими в основном 10–15 % [7]. Информация космического мониторинга горных районов бассейна р. Томи дополняет наземные метеонаблюдения и повышает качество оценки снегонакопления.

В таблице 1 представлены результаты сопоставления среднего многолетнего слоя стока, рассчитанного по данным наблюдений и по модели, обобщённые по 2005 г. После оптимизации параметров модели прогноза получены близкие значения слоя стока для всех районов и бассейна в целом, отклонение составляет около 5 %.

Таблица

Средний многолетний объём стока в районах и в замыкающем створе Томи [7]

| Район (бассейн) | Площадь, км$^2$ | Средний многолетний слой стока (расчёты по данным наблюдений), мм | Средний многолетний слой стока (расчёт по модели), мм |
|---|---|---|---|
| I район | 21 300 | 193 | 152 |
| II район | 8 200 | 410 | 414 |
| III район | 27 500 | 584 | 572 |
| р. Томь – г. Томск | 57 000 | 408 | 394 |

Оправдываемость прогнозов по данных независимых наблюдений за 2005–2013 гг. составила 82 %. Критерий качества прогноза (S/σ) для заблаговременностей прогноза от одних до семи суток изменяется от 0,399 до 0,486, т.е. качество прогнозов оценивается как «хорошее» [7].

**Список литературы**

1. Разработать методы и технологию долгосрочного и краткосрочного прогноза ежедневных и максимальных уровней воды рек бассейна Томи, Чарыша с использованием наземной и спутниковой информации: отчёт о НИР и ОКР (заключительный) / Красноярский НИЦ СУГМС; ответств. исполн. Д.А. Бураков; исполн.: О.И. Черных [и др.]. Красноярск, 2002. 38 с. Методический кабинет Гидрометцентра России URL: http://method.meteorf.ru/norma/letters/letter03.html (дата обращения: 28.04.2017).

2. Бураков Д.А. Математическая модель расчёта весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология. 1978. № 1. С. 49–59.

3. Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 75–87.

4. Бураков Д.А., Вершинина И.П. Условия формирования и математическая модель прогноза ежедневных уровней воды р. Томи у г. Томск за период половодья // Климатология и гляциология Сибири: материалы Междунар. научно-практич. конф. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2012. С. 53–55.

5. Бураков Д.А., Вершинина И.П. Математическая модель прогноза ежедневных уровней воды горной реки // Охрана окружающей среды и природных ресурсов стран Большого Алтая: материалы Междунар. научно-практич. конф. / ред. Г. Я. Барышников. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. С. 40–44.

6. Бураков Д.А., Иванова О.И., Лариошкин В.В. Модель прогноза уровней воды весеннего половодья и дождевых паводков на реках бассейна Верхнего Амура // Климатология и гляциология Сибири: матер. Междунар. научно-практич. конф. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2012. С. 67–69.

7. Вершинина И.П. Геоэкологические условия формирования стока и прогнозы характеристик весеннего половодья реки Томи у города Томска: дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2018. 220 с.

8. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока / Д.А. Бураков, В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин [и др.] // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 100–109.

9. Бураков Д.А. Гордеев И.Н., Ромасько В.Ю. Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидролого-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: ООО «ДоМИРА», 2010. Т. 7, № 2. С. 113–121.

10. Ромасько В. Ю., Д.А. Бураков Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017. № 10 (6). С. 704–713.

11. GIS–Lab: NDVI – [теория] и практика. URL: http://gis–lab.info/qa/ndvi.html (дата обращения: 10.10.2014).

12. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. 2001.

13. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. 1995. Vol. 54. P. 127–140.

14. Klein A.G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model // Hydrological Processes. 1998. Vol. 12. P. 1723–1744.

15. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation–cover densities in central Alaska / D.K. Hall, J.L. Foster, D.L. Verbyla [et al.] // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 66. P. 129–137.

УДК 528.88

**А.Е. Воронова**
Младший научный сотрудник, Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"»
Новосибирск, Россия
e-mail: 35voran@gmail.com

# МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В НОВОСИБИРСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ

На примере Новосибирского водохранилища исследована возможность комплексного применения спутниковых изображений с прибора OLCI (Sentinel-3) и наземных данных для составления карт концентрации взвешенных веществ во внутренних пресных водоемах. Регрессионный анализ показал наличие статистически значимой связи между спутниковыми данными второго уровня обработки и натурными замерами. Приведены результаты множественной регрессии, графики теоретических и фактических значений концентрации и итоговая тематическая карта.

*Ключевые слова: концентрация взвешенных веществ, Sentinel-3, OLCI, Новосибирское водохранилище.*

**Введение.** Новосибирское водохранилище, расположенное в Новосибирской области и Алтайском крае на реке Оби, играет важную роль в обеспечении водой населения, сельского хозяйства и промышленности. Кроме этого, в водохранилище ведется лов рыбы, а на его берегах расположены рекреационные объекты. В связи с этим оперативный мониторинг состояния водоема имеет большое значение для оценки качества вод и планирования хозяйственной деятельности [1].

Традиционным способом мониторинга качества поверхностных вод является точечный отбор проб с последующим проведением лабораторных анализов. Однако данный метод оказывается весьма трудозатратным и дорогостоящим, и с его помощью сложно оценить состояние лимнологического объекта целиком.

На сегодняшний день данные дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли уже активно используются для оценки различных показателей качества воды [2, 3]. Запуск же аппарата Sentinel-3 в 2016 г. задал новые перспективы в области космического мониторинга водных объектов. Частота съемки, пространственное и спектральное разрешение прибора OLCI открывают широкие горизонты для исследований в этой области.

Целью данной работы является создание карт концентрации взвешенных веществ (КВВ) в Новосибирском водохранилище на основе данных OLCI (Sentinel-3) и натурных замеров.

**Данные.** Для работы использовались космические снимки с прибора OLCI (Sentinel-3) уровня обработки «level 1» (https://scihub.copernicus.eu/).

Натурные данные концентрации взвешенных веществ в Новосибирском водохранилище (за 28–29 июля и 27–28 сентября 2018 г.) получены для шести точек, расположенных вдоль всего водохранилища. Данные предоставлены ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

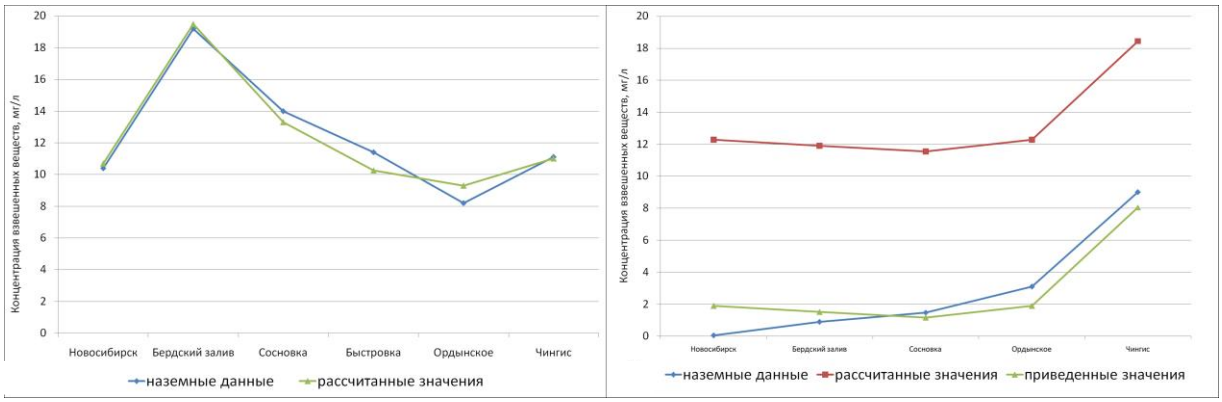
**Исследование.** На первом этапе были получены продукты второго уровня обработки при помощи модуля C2RCC (Case 2 Regional CoastColour). В нем реализована биооптическая модель, основанная на пяти компонентах IOP (Inherent Optical

© Воронова А.Е., 2019

Properties), по которым моделируются концентрации взвешенных веществ и хлорофилла-а. Концентрация взвешенных веществ TSM (Total Suspended Matter) рассчитывается по двум компонентам IOP: рассеяние средними частицами (bpart) и рассеяние белыми частицами (bwit) [4].

При анализе данных второго уровня было обнаружено, что стандартный продукт TSM слабо согласуется с натурными замерами (коэффициент корреляции –0,33 для июля и 0,45 для сентября). По этой причине для дальнейших расчетов были использованы непосредственно компоненты IOP.

Множественный регрессионный анализ данных за июль 2018 г. показал наличие статистически значимой связи между натурными замерами КВВ и компонентами bpart и bwit (рис. 1а). Стандартная ошибка остатков (RSE) составила 1,021, *F*-критерий – 33,59, скорректированный коэффициент детерминации ($R^2$) – 0,93, *p*-значение – 0,009.




*а* *б*

Рис. 1. Графики концентрации взвешенных веществ, мг/л в Новосибирском водохранилище:
*а* – данные за июль 2018 г., *б* – данные за сентябрь 2018 г.

По найденным коэффициентам множественной регрессии рассчитывались теоретические значения КВВ за сентябрь и сравнивались с фактическими: средняя дельта составила 8,94 мг/л, а коэффициент корреляции – 0,56. Однако при детальном анализе натурных замеров за сентябрь был выявлен отчетливый «выброс» в районе села Быстровки. Сравнение с другими гидрохимическими показателями (цветность и прозрачность) также подтверждает гипотезу о недостоверности значения КВВ в указанном районе.

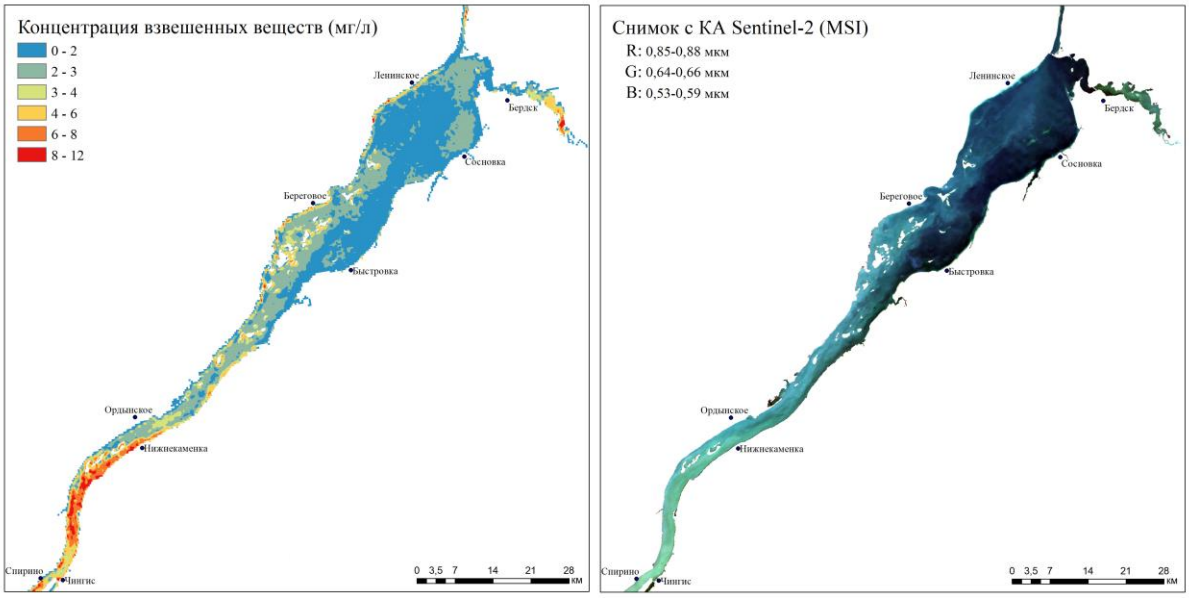
После исключения «выброса» из расчетов коэффициент корреляции стал равен 0,94, а средняя дельта – 10,8 мг/л. Таким образом, ошибка имела характер смещения, что наглядно отражено на графиках (рис.1, *б*).

После устранения ошибки смещения среднеквадратическое отклонение величины КВВ от натурных данных составило 1,12 мг/л.

**Результаты.** Итоговая карта КВВ в Новосибирском водохранилище рассчитывалась за 28 сентября 2018 г. по найденным коэффициентам регрессии с учетом ошибки смещения (рис. 2, а). На рис. 2, *б* представлен снимок водоема в естественных цветах с КА Sentinel-2 (MSI).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что продукты второго уровня обработки OLCI (Sentinel-3) могут применяться для мониторинга состояния водной среды внутренних пресных водоемов, в том числе и для получения карт КВВ.

Дальнейшее исследование будет направлено на проверку полученных результатов по более обширному набору данных.




*а* *б*

Рис. 2. Мониторинг состояния Новосибирского водохранилища 28 сентября 2018 г.:
(а) – карта концентрации взвешенных веществ (мг/л), (б) – снимок с КА Sentinel-2

**Список литературы**

1. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / В.М Савкин [и др.]; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т водн. и экол. проблем; отв. ред. О.Ф. Васильев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 383 с.

2. Сравнительные оценки качества воды в Новосибирском водохранилище на основе лимнологических MERIS-моделей и данных высокого разрешения Worldview-2 / Н.М. Ковалевская, В.В. Кириллов, Т.В. Кириллова, О.В. Ловцкая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 176–186.

3. Reconstructing turbidity in a glacially influenced lake using the Landsat TM and ETM+ surface reflectance climate data record archive, Lake Clark, Alaska / C.A. Baughman, B.M. Jones, K.K. Bartz [et al.] // Remote Sensing. 2015. № 7. P. 13692–13710.

4. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters / C. Brockmann, R., Doerffer M. Peters [et al.] // Living Planet Symposium. 2016. ESA-SP. Vol. 740. P. 54.

УДК 004.5+528.9

**А.С. Гаченко[1], А.Е. Хмельнов[2]**

[1] Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

[2] Кандидат технических наук, Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

e-mail: gachenko@icc.ru, hmelnov@icc.ru

# ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ОЗЕРА БАЙКАЛ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ

Для обеспечения научных и экологических проектов регулярно возникает необходимость в получении надводного и подводных рельефов, которые отсутствовали на заданные территории. Авторами была разработана оригинальная технология создания и совмещения надводного рельефа с подводным. Использованы механизмы морфинга и триангуляции Делоне. В результате проведённых работ была разработана архитектура и создана информационная система ГИС-мониторинга для поддержки исследований различного рода на экологию прибрежной зоны озера Байкал и регулирования различных режимов водности нижнего бьефа Иркутской ГЭС.

*Ключевые слова: ГИС, рельеф, загрязнение, экология, триангуляция Делоне, ГЭС.*

**Введение.** Целью данной работы является решение широкого круга проблем региона, связанных с экологией и другими проблемами озера Байкал и прилегающей территории. В данным момент разрабатываются отдельные виды цифрового мониторинга озера Байкал. Имеется опыт в обработке информации по отдельным видам наблюдений с использованием специализированных программных комплексов. Накоплена информация о различных процессах Байкальской природной территории, изучены формы этих процессов и механизмы формирования. Разработаны уникальные модели, методы и комплексы программ для обработки, анализа, прогноза, оптимизации и оценки влияния природно – климатических факторов и процессов жизнедеятельности на озере Байкал. В ходе выполнения комплексных работ предстоит реализовать разработанные подходы для комплексного мониторинга, создать уникальную сеть, дополнив существующую инфраструктуру новым оборудованием и новыми аппаратными мощностями для сбора, хранения и передачи данных, применяя новые способы обработки, интерпретации и прогноза.

В ИДСТУ СО РАН накоплен большой опыт обработки пространственных данных, включая данные ДЗЗ. Разработаны оригинальные форматы для представления, как растровых, так и векторных данных, программное обеспечение и алгоритмы для обработки информации. Предложены, реализованы и применены новые алгоритмы, позволяющие выполнять совмещение информации о подводном и наземном рельефе, несмотря на различия в точности карт.

**Цифровая модель рельефа поселка Листвянка.** В настоящее время побережье озера Байкал становится все более привлекательным местом развития туристической деятельности, и одновременно с этим остается одним из наиболее актуальных мест с точки зрения экологических требований и ограничений, так как непосредственно касается уникального природного объекта – озера Байкал.

Серьезную угрозу экологической безопасности [1] озера Байкал представляет сопутствующая хозяйственная деятельность, особенно при отсутствии инженерных сооружений (канализации). В связи с этим возникла задача улучшения экологической об-

© Гаченко А.С., Хмельнов А.Е., 2019

становки в прибрежной территории и выявления причин экологического бедствия на озере Байкал.

В 2016–2018 гг. были проведены комплексные исследования урезовой зоны пос. Листвянка, в частности были проведены: геофизические исследования, аналитическая оценка влияния поверхностных и грунтовых вод территории п. Листвянка на экологическое состояние прилегающей мелководной зоны оз. Байкал, водолазное обследование акватории пос. Листвянка на предмет определения подводных зон наиболее подверженных антропогенному воздействию и определению развития в на субаквальных склонах нехарактерной водной растительности, исследование элементного состава воды рек, интерстициальных и подземных вод береговой зоны оз. Байкал и его прибрежной акватории в районе пос. Листвянка, работы по определению химического микробиологического загрязнения поверхностных и придонных вод в районе п. Листвянка, работы по определению химического загрязнения поверхностности территории в районе пос. Листвянка по данным снегосъёмки, работы по оценке современного ландшафтного состояния территории п. Листвянка, состояния лесов и растительности в его окружении для возможного определения по их состоянию влияния признаков воздействия данных территорий на прибрежную часть оз. Байкал, изучение подземных вод в пади Крестовой по оценке влияния подземного стока потоков с данной территории на оз. Байкал с подготовкой первичной информации об объектах, потенциальных источниках антропогенного загрязнения.

Была впервые создана комплексная модель рельефа (надводный рельеф был совмещен с подводным) (рис. 1) на основе космоснимка высокого разрешения (10 м на пиксел) WorldDem (Airbus Defence and Space под общим названием GEO Elevation Services. Глобальная цифровая модель WorldDEM, создана по результатам интерферометрической обработки тандемных съемок с радарных спутников TerraSAR-X/TanDEM-X). Снимок приобретен у компании Airbus.

Подводный рельеф получен при помощи эхолокационной съёмки рельефа дна урезовой зоны залива Лиственичный, полевые промеры глубин были выполнены до 50-метровой отметки. Разработана оригинальная технология сопряжения надводного рельефа с подводным с использование механизмов морфинга и триангуляции Делоне.

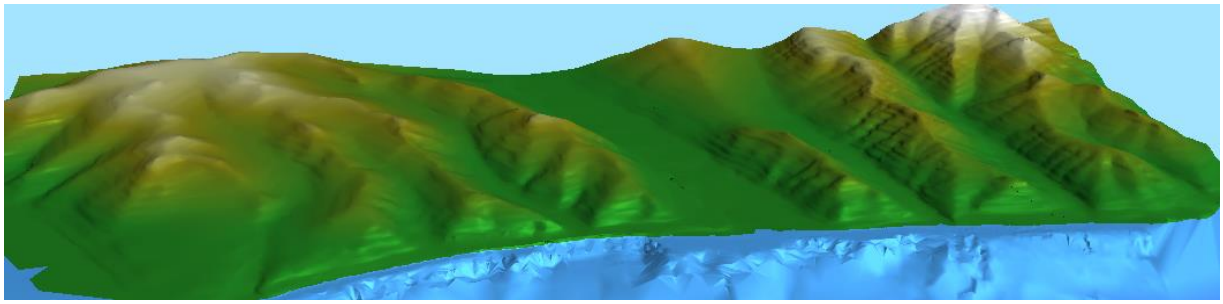


Рис. 1. Модель прибрежного рельефа пос. Листвянка

Данная работа подтвердила и позволила обосновать версию о зависимости сопутствующих отходов хозяйственной деятельности (в основном от гостиничного бизнеса) в выгребные ямы и местах скопления спирогиры на выходе грунтовых вод в прибрежной территории.

**Создание цифровой модели рельефа Ангары от г. Иркутск до г. Свирск.** В рамках исследований реки Ангара, связанных с режимами водности Иркутской ГЭС и определения зон затопления и обмеления нижнего бьефа проведена оцифровка и создана цифровая модель подводного рельефа реки Ангара. Были проведены работы по подготовке цифрового рельефа речного дна от Иркутской ГЭС до города Свирск (оцифровка береговой линии, линий батиметрии и точек глубин). Подготовлена цифровая

модель речного дна реки Ангара, проведена увязка подводного рельефа дна с рельефом прибрежной зоны. Работы проведены с использованием оригинальной технологии морфинга и алгоритмов построения триангуляции Делоне.

В связи с отсутствием цифровой модели (карты), была оцифрована бумажная карта при помощи программы векторизатора Easy Trace 7.99 (рис. 2). Далее подводный рельеф был совмещен с надводным при помощи оригинальных технологий морфинга. В результате этого комплекса работ получена согласованная модель рельефа по заданной территории.

Рис. 2. Итоговая цифровая модель реки Ангара (высота рельефа преувеличена для наглядности)

В рамках ряда исследований, проведены работы по созданию подводного рельефа фрагмента реки Ангара от Иркутской ГЭС на участке протяженностью 260 км. Получена комплексная цифровая модель (рис. 2) совмещенного подводного с надводным рельефа на территории от Иркутской ГЭС до города Свирск. Были реализованы атласы, которые позволяют видеть обстановку на исследуемой территории в зависимости от различных режимов водности на Иркутской ГЭС. **Цифровая модель совмещенного рельефа на данную территорию получена впервые и не имеет аналогов.**

**Заключение.** В данный момент по результатам работ получен набор материалов, на основании которых можно проводить анализ существующей экологической ситуации и делать различные вывод:

В статье рассмотрен инфраструктурный подход создания информационно-аналитических систем управления крупными интеграционными междисциплинарными проектами [2]. В результате проведённых работ была разработана архитектура и создана информационная система ГИС-мониторинга для поддержки исследований различного рода на экологию прибрежной зоны озера Байкал и реки Ангара. Данную технологию по совмещению надводного с подводным рельефа можно использовать по любым прибрежным территориям.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-47-380005) и блока интеграционной программы ИНЦ СО РАН 4.1.2.*

**Список литературы**

1. Информационно-аналитическая система мониторинга и оценки антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал / А.С. Гаченко, В.В. Минаев, А.А. Михайлов [и др.] // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 174–178.

2. Инфраструктура информационных ресурсов и технологий и создания информационно-аналитических систем территориального управления: монография / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016, 242 с.

УДК 551.579.5:553.94:528.88

**О.Л. Гиниятуллина[1], Л.С. Миков[2]**

[1] Кандидат технических наук, научный сотрудник, [2] Младший научный сотрудник
Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия
e-mail: skiporol@mail.ru, mikov@ict.sbras.ru

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Предложен подход к определению уровня влажности почв вблизи объектов угледобычи в результате комплексной обработки радиолокационных и оптических данных дистанционного зондирования. Обоснованы алгоритмы обработки космоснимков с целью выделения параметров влажности почв, как средства определения плодородности земель. Приведены результаты дистанционного мониторинга угледобывающего района Кузбасса, которые позволили установить резкое изменение значений влажности почвы при приближении к объектам угледобычи на расстояние менее 500 м.

*Ключевые слова: Влажность почв, радиолокационные снимки, оптические снимки, дистанционный мониторинг, горнопромышленный регион, комплексный подход к обработке данных.*

Влажность земли является не только важнейшим агротехническим параметром в сельском хозяйстве, но и оказывает серьезное воздействие на качественное функционирование экологической системы – биогеоценоза. В связи с этим пространственно-временной контроль влажности почвы выступает одним из важных этапов мониторинга окружающей среды, особенно в регионах с высокой степенью техногенного воздействия. Задача приобретает особую актуальность для угледобывающих регионов, где имеются большие территории нарушенных горными работами земель (включая шахтные терриконы, хвостохранилища и т.п.), которые необходимо рекультивировать. Поэтому именно влажность грунта и ее изменения во многом определяют фактор последующей плодородности земель.

Классические методы замеров уровня влажности почвы [1, 2] подразумевают исследование срезов почв в лабораториях либо использование дорогостоящих датчиков на довольно небольших площадях, как правило, сельскохозяйственных полей. В любом случае это точечные замеры, которые слабо подходят для интегральной оценки состояния почв. В то время как площади угольных предприятий могут занимать десятки и сотни квадратных километров, а площадь воздействия на окружающую среду за счет угледобычи может намного превышать их санитарные зоны, данный подход требует существенной корректировки, особенно учитывая современные методы дистанционного зондирования и использование геоинформационных технологий, позволяющих проводить крупномасштабную оценку влажности почв с высоким пространственно-временным охватом. В литературе дается довольно обширный анализ определения уровня влажности почв оптическим методом, в котором измеряется степень поглощения или отражения солнечной энергии, зависящая от влажности объекта исследования [3, 6]. Однако чаще всего параметр влажности связывают с объемом биомассы, исходя из предположения «чем больше объем зеленой массы, тем, выше влажность почвы». В этом случае применяю метод экологических шкал, который является эмпирическим и имеет широкие вариации в зависимости от региона обследования. Довольно точные па-

© Гиниятуллина О.Л., Миков Л.С., 2019

раметры оценки влажности дают радиолокационные данные, но только для голых почв (суходолов). Уровень ошибки при определении покрытых растительностью высокий, особенно лесных территорий [7]. Именно поэтому совместное применение данных оптического и радиолокационного диапазонов позволяет снять ограничения, присутствующие при оптической обработке космоснимков. Существующие физические, эмпирические и полуэмпирические модели преобразуют отраженный радарный сигнал в различные пространственные шкалы для оценки влажность почвы. При оценке богатых растительностью поверхностей интеграция радарных и оптических данных позволяет достаточно точно оценить поверхностную влажность почвы, добавляя физические параметры растительности посредством использования вегетационных индексов, например, Leaf Area Index (LAI) или Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Эти индексы дают возможность оценить вклад растительности для отраженного радарного сигнала, выделяя почвенную составляющую с последующим перерасчетом для оценки поверхностной влажности почвы. Чаще всего для этих целей используется полуэмпирическая модель Water Cloud Model (WCM) [8], в которой полный отраженный радиолокационный сигнал представляется как сумма отраженного рассеянного сигнала от почвы, умноженная на двойное затухание прямого отраженного сигнала от растительности. В большинстве исследований влияние растительности обычно представляется в виде одного интегрального параметра – индекса листовой поверхности растительности (LAI), учитывающего объемы биомассы, содержание воды и высоту растительности. Влияние почвы обычно определяется через влажность почвы и шероховатости поверхности (для инструментальных данных радиосигнала определяемых через угол падения, длину волны и тип поляризации). При этом используется модель для рассеивания сигнала физического радара (в частности, модель на основе интегрального уравнения (IEM) [9] или полуэмпирическая модель для отраженного рассеивания [10].

В Кемеровском филиале ИВТ СО РАН выполнена работа по исследованию возможности оценки влажности почв для территорий, прилегающих к объектам угледобычи, на основе обработки комбинации радиолокационных и оптических данных со спутника Sentinel 1a и 2a, основывающаяся на модели рассеивания отраженного радарного сигнала [6, 10]. В качестве исходных данных для получения карты влажности почв использовались два радарных и один мультиспектральный снимки, полученные в практически одном временном диапазоне (разница в датах должна быть не более двух недель для радарных снимков), и векторная карта почв. Обработка производилась в свободно распространяемом программном обеспечении QGIS.

**Описание материалов исследования.** В качестве объекта исследования выступала территория Бунгуро-Чумышского месторождения Кузбасса. За вегетационный период 2017 г. удалось получить три гиперспектральных и пять радиолокационных снимков в необходимом временном диапазоне: радарные (23.05.17, 28.05.17, 21.06.17, 28.06.17, 27.08.17), оптические (27.05.17, 16.06.17, 28.08.17) данные.

Используемые радарные изображения загружены с веб-сайта Google Earth Engine (https://earthengine.google.com). Каждое изображение представляет собой набор из трех полос: полоса 1 соответствует коэффициенту обратного рассеяния в поляризации VV (в децибельной (дБ) шкале), полоса 2 – коэффициенту обратного рассеяния в поляризации VH (в дБ), а полоса 3 содержит локальный угол падения к земному эллипсоиду (в градусах). Две полосы, соответствующие коэффициентам обратного рассеяния в поляризации VV и VH, были линейно преобразованы. Оптические изображения также получены с помощью этого сервиса. При проведении расчетов использованы следующие спектральные области оптического изображения: 2, 3, 4 (зеленая, синяя, красная) и 8 (ближняя инфракрасная) с пространственным разрешением 10 м/пикс. Карта растительного покрова представляла собой векторную карту, которая была преобразована в тематический растр с ценностями от 0 до 17, соответствующими определенному типу почвы.

**Методика исследования.** Поскольку почва исследуемого района в течение вегетационного периода (май – сентябрь) покрыта растительностью, то предлагаемый подход рассматривает эффекты влияния растительности в рассеиваемом отраженном сигнале радарного изображения через критерий оценки влажности почвы. Модель WCM определяет обратный рассеянный радиолокационный сигнал в линейном масштабе $(\sigma_{tot}^0)$ в виде суммы вклада от растительности $(\sigma_{veg}^0)$ и почвы $(\sigma_{soil}^0)$, ослабленного растительностью $(T^2\sigma_{soil}^0)$ и множественным почвенно-растительным рассеянием (которым часто пренебрегают):

$$(\sigma_{tot}^0) = (\sigma_{veg}^0) + (T^2\sigma_{soil}^0),$$

$$(\sigma_{veg}^0) = AV_1\cos\theta(1-T^2),$$

$$T^2 = e^{-2DV_2\sec\theta},$$

где $V_1$ и $V_2$ – индексы растительности, связанные с ее биомассой, содержанием влаги в листе, высотой растительности, индексы LAI и NDVI (в контексте данного исследования $V_1 = V_2 =$ NDVI); θ – угол падения радарного сигнала (в градусах); $A$ и $B$ соответствуют параметрам модели, которые зависят от индекса растительности и геометрических характеристик радара.

Вклад почвы $(\sigma_{soil}^0)$, который зависит от влажности почвы и шероховатости поверхности на снимке (в дополнение к инструментальным параметрам радара), определяется на основе интегральной физической модели IEM, предложенной в работе Н. Багдади [11]. Этот алгоритм позволяет осуществить калибровку WCM, используя данные апертуры радарного сигнала, NDVI (с оптического снимка) и полевые измерения с карты почв, что приводит к вычислению параметров $A$ и $B$ на основе нейронной сети. Используемая при этом нейронная сеть позволяет при помощи, калиброванной WCM и модели IEM выделить синтезированные данные из параметров отраженного рассеянного радарного сигнала в широком диапазоне спектров параметров влажности почвы, поверхностной шероховатости и индексов растительности NDVI, что в итоге позволяет достаточно точно определять общий уровень влажности почвы в зонах с высоким уровнем биомассы [6]. Таким образом, при применении данного алгоритма производится выделение пространственных объектов, определенных пикселями с однородными значениями NDVI с пороговым изменением ±0,1. Для этого необходимо определить однородные пространственные области в виде полигона, рассчитать по нему маску растительного покрова, разделить полученные объекты на сегменты, используя результаты вычисления NDVI. Для выполнения сегментации использовался метод оценки средних значений, входящий в модуль Orfeo ToolBox (OTB) пакета QGIS. В результате вычислений получен векторный слой, состоящий из нескольких многоугольников, каждый из которых очерчивает однородную по заданному показателю область. Показатели влажности определяются, главным образом, по средним значениям пикселей радарных снимков, ограниченных буферов в 10 м для каждого многоугольника, что позволило удалить краевые элементы изображения (преграды, дороги и т.п.). Кроме того, для получения надежного среднего значения, отраженного рассеиваемого радарного сигнала объекты с размером меньше 20 пикселей на изображении, объединяются. Выделение данных многоугольников в самостоятельные объекты неоднозначно из-за шума на радарных изображениях. Для удаления подобных элементов применяются статистические фильтры. Поэтому, для удовлетворительной работы алгоритма оценки влажности почв, рассмотренного выше, требуется файл статистики, содержащий средние статистические значения радарного (VV, HV и угол отражения) и оптического (NDVI) изображений.

**Описание результатов.** В ходе исследования оценивалось изменение влажности почвы при приближении к объектам угледобычи.

Общее количество пространственных единиц на исследуемой территории составило 334 объекта, представляющих 17 типов почв, общей площадью около 400 км$^2$. Суммарный вклад типов почв исследуемого региона представлен на рис.1. Доминирующие типы почв исследуемого региона представлены дерново-подзолистой (39,7 км$^2$), серой лесной в комплексе с луговой (22,5 км$^2$) и тёмно-серой лесной слабосмытой (14,4 км$^2$).

В ходе исследования, используя описанный выше подход к определению влажности почв, получены следующие тематические изображения, представленные на рис. 2.

Шкала оценки степени влажности представлена в некоторых эмпирических единицах. Путем проведения ряда оценочных расчетов установлено, что для климатической зоны Западной Сибири, максимально полученное значение порога влажности составляет 60 ед. (зона глухой тайги через несколько часов после обильных осадков виде сильного проливного дождя). В рамках данного исследования климатическая картина региона была следующей (табл. 1).

Таким образом, наиболее «сухой» датой было 28 мая 2017 г., при этом следует отметить, что другим датам, кроме 27 августа, предшествовали единичные выпадения осадков. Как видно на рис. 2, большая часть территории вокруг угледобывающих разрезов, представленная серо-лесной в комплексе с луговой почвами, которым соответствует довольно высокий уровень объема растительности, не испытывает значительных изменений в уровне влажности. Наибольшие отклонения фиксируются вблизи территорий угледобычи. Проанализированы изменения показателей влажности почв за весь летний период в зонах вблизи горных работ, на удалении 500–1 000 м и более 1 км

Как видно из графика, существенное почти в 2 раза снижение показателей влажности фиксируется в зонах до 500 метров от активной горной выработки. Именно здесь растительность испытывает активное угнетения, что приводит к снижению объёмов биомассы в целом. При удалении более 500 м от границ угледобывающих предприятий отклонения являются уже не такими существенными (кривая 2 и 3 рис. 3).

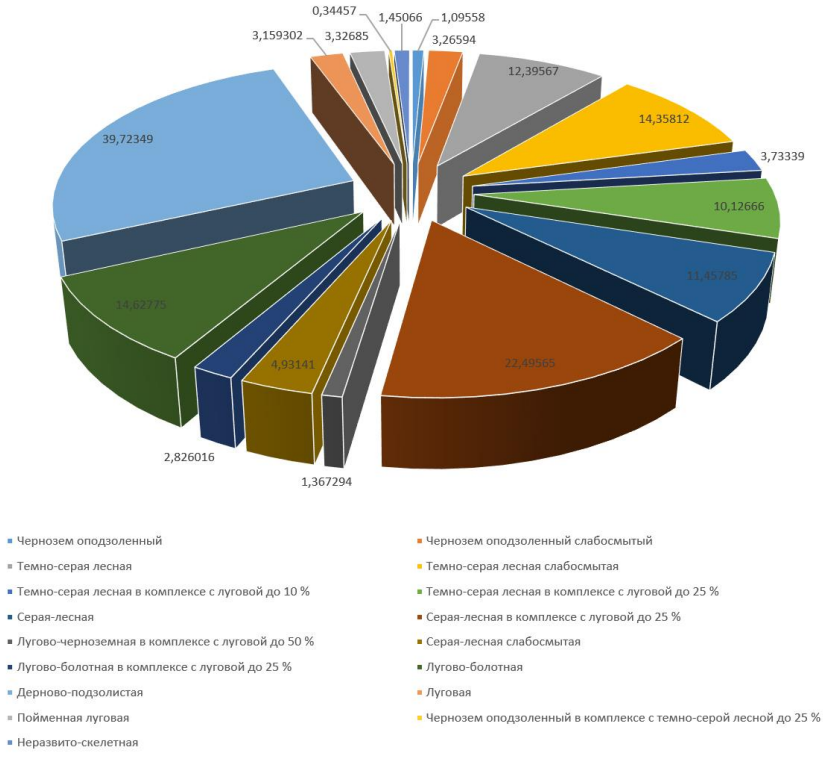



Рис. 1. Типовой состав почв исследуемого региона

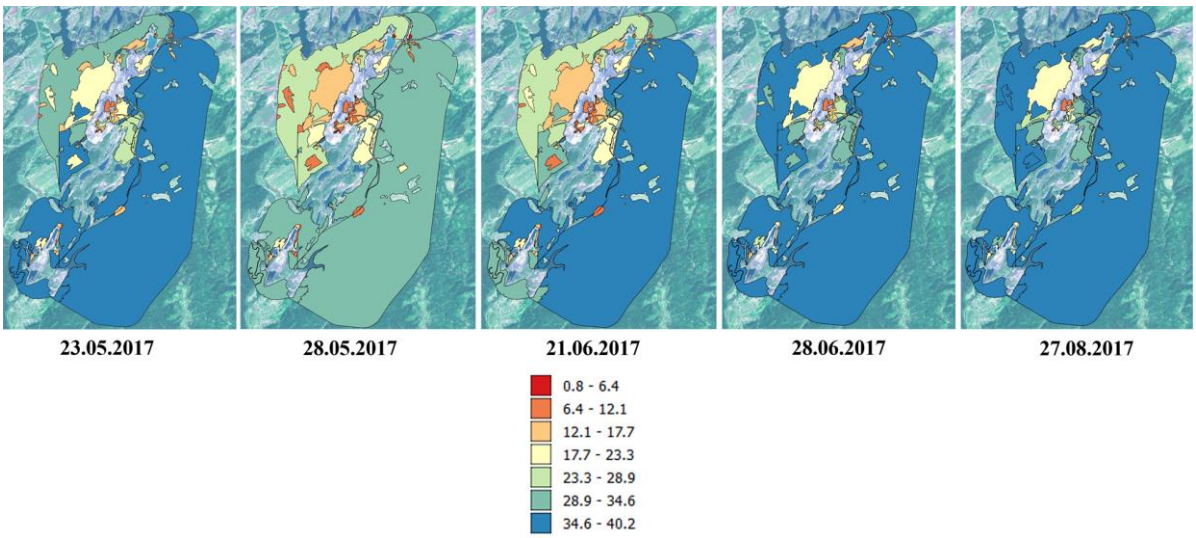



Рис. 2. Полученные карты оценки влажности почв исследуемого района

Таблица

Климатические показатели района пос. Костенково Кемеровской области

| Дата | Осадки | t° | Дата предыдущих осадков |
|---|---|---|---|
| 23.05.2017 | – | +30 +15 | 21.05.2017 |
| 28.05.2017 | – | +29 +5 | 21.05.2017 |
| 21.06.2017 | + | +27 +19 | 11.06.2017 |
| 28.06.2017 | + | +31 +13 | 23.06.2017 |
| 27.08.2017 | – | +21 +8 | 19.08-23.08.2017 |

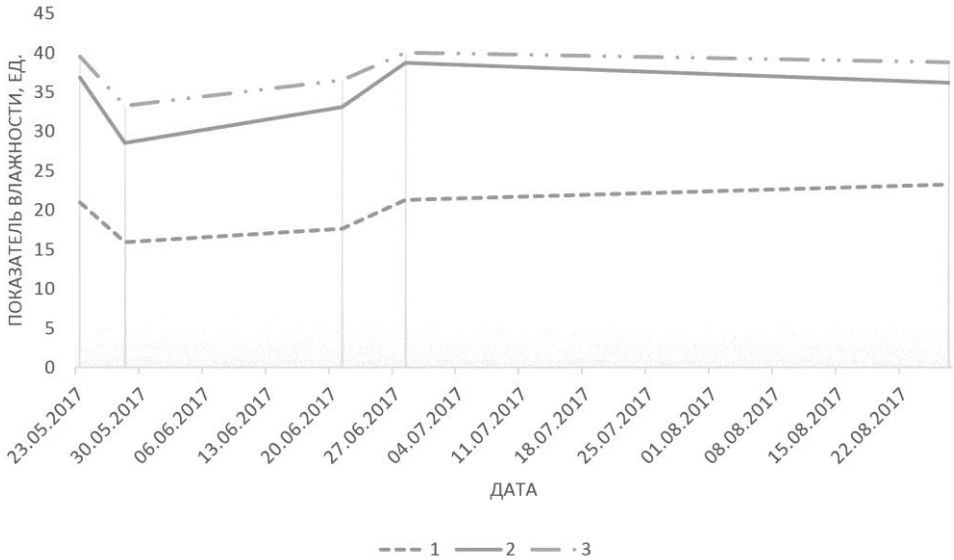



Рис. 3. График изменения показателей влажности различных почвенных зон в зависимости от расстояния от горной выработки: 1 – вблизи; 2 – 500–1 000 м; 3 – более 1 км

Определение коридора изменения значений влажности в радиусе 500 м и выше говорит о том, что область техногенного воздействия при ведении горных работ не превышает размеров санитарно-защитных зон угледобывающих предприятий. При этом наибольшая площадь изменений зафиксирована на северо-западе исследуемого района, где идут активные работы по добыче угля.

Таким образом, с помощью предложенного метода оценки влажности почвы на основе интеграции радарных и мультиспектральных снимков, в настоящее время полу-

чены актуальные тематические карты влажности почв отдельного угледобывающего района. Совместная обработка спутниковых данных оптического и радарного диапазона со спутника Sentinel алгоритмом с применение нейронных сетей позволила разработать принципиально новый подход к мониторингу почвенных ресурсов. Предложенная нами методика позволяет получать адекватные данные для оценки влажности почвы на основе данных дистанционного зондирования в областях с высокой техногенной нагрузкой, обеспечивая возможность регулярного повторения результатов и отслеживания изменений в общей экологической картине, в том числе для независимого экологического аудита.

**Список литературы**

1. ГОСТ 28268–89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200023556.

2. Полевые исследования свойств почв / М.А. Мазиров, Е.В. Шеин, А.А. Корчагин [и др.]. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. 72 с.

3. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М., 2005.

4. Gillies R.R., Carlson T.N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models // Journal of Applied Meteorology 1995. № 34. P. 745–756

5. Киселев Е.Н. Исследование влажности почвы по данным спутниковых снимков (на примере Краснодарского края) // Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. Краснодар, 2007. С. 122–135.

6. Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. QGIS and applications in agriculture and forest // GB. 2018. 345 p.

7. Baghdadi N., Zribi M. Land surface remote sensing in continental hydrology. London: Oxford, 2016. 502 p.

8. Atema E.P.W., Ulaby F.T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Science. 1978. Vol. 13. P. 357–364.

9. Fung A.K. Microwave scattering and emission models and their applications. Boston, 1994. 573 p.

10. Baghdadi N., Choker M., Zribi M. A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. P. 950

11. Baghdadi N., Holan N., Zribi M. Calibration of the integral equation model for SAR data in C-band and HH and MM polarization // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. P. 805–816.

УДК 504.05:528.94

**А.А. Гостева[1], С.П. Ильина[2]**
[1] Кандидат технических наук, [2] Аспирант
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: gissfu@gmail.com, sofya.ilina.1994@mail.ru

# ИНТЕГРАЦИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Представлен обзор ГИС-методов для мониторинга атмосферного воздуха города Красноярска. Приведены примеры визуализации статистических данных, примеры построения тематических карт.

*Ключевые слова: картографирование, географические информационные системы, трехмерное моделирование, статистические поверхности.*

С 70-х гг. XX в. в Канаде начинается разработка и интеграция систем для организации и хранения пространственных данных, получившая название «Географические информационные системы».

Среди всего многообразия традиционных областей использования геоинформационных систем заметно доминирует новая её отрасль – экологическая. Использование геоинформационных систем позволяет оперативно получать информацию по запросу и отображать её на картооснове, оценивать состояние экосистемы и прогнозировать её развитие. При комплексном подходе, характерном для экологии, обычно приходится опираться на обобщающие характеристики окружающей среды, вследствие чего объемы даже минимально достаточной исходной информации, несомненно, должны быть большими. В противном случае обоснованность действий и решений вряд ли может быть достигнута. Однако простого накопления данных тоже, к сожалению, недостаточно. Эти данные должны быть легкодоступны, систематизированы в соответствии с потребностями [1].

Состояние приземного слоя атмосферы имеет принципиальное значение для экосистемы и жизнедеятельности городского населения. Красноярск является одним из экологически неблагоприятных городов России, так как на территории города сосредоточены производства различного рода (химические, энергетические, металлургические и т.д. предприятия) [2].

Для изучения атмосферного воздуха города Красноярска целесообразно разработать географическую информационную систему, включающую в себя трехмерную модель города и тематические карты для эффективной визуализации городской инфраструктуры, включая природную и градостроительную составляющие. Для создания ГИС Красноярска используются открытые данные – «том ПДВ г. Красноярска», который был составлен на основе ведомственных томов предприятий-участников, данные тома ПДВ обработаны студентом Института космических информационных технологий Сибирского федерального университета А.А. Павловым в ходе выполнения бакалаврской работы [3]. Также топоосновой являются векторные данные проекта «Open street map». На рис. 1 приведена экспозиция на микрорайон Белые Росы и исторический центр города. Для исследования распространения загрязнений необходимо учитывать особенности рельефа территории, так как город находится на стыке трех геоморфологических стран, лежит в долине реки Енисей и на юге города расположился Торгашинский хребет. Рельеф очень удобно изображать при помощи трехмерной модели.

© Гостева А.А., Ильина С.П., 2019

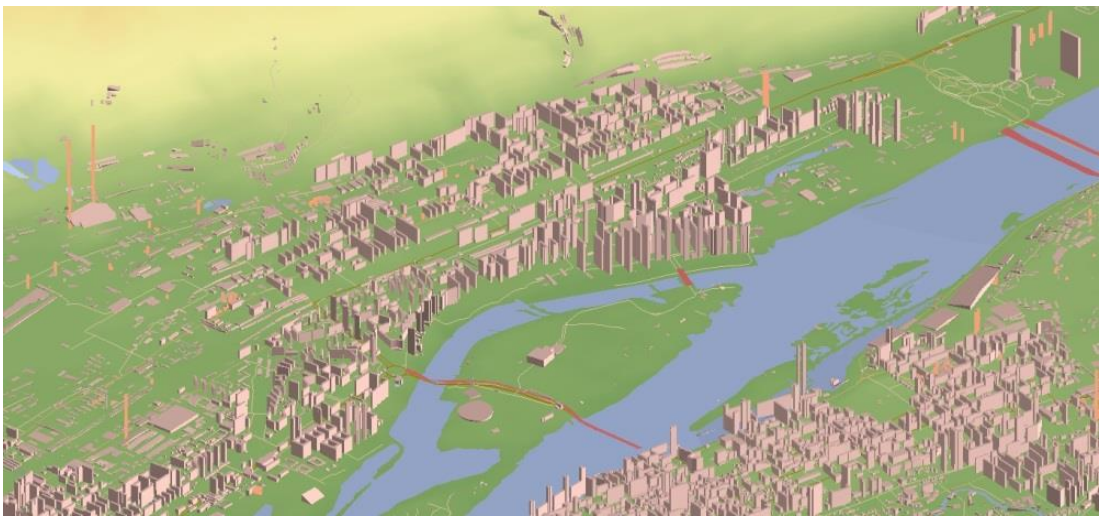


Рис. 1. 3D-модель города Красноярска, вид на микрорайон Белые Росы и исторический центр города

Для исследования антропогенной нагрузки на территорию города Красноярска построены статистические поверхности по загрязнителям с учетом рельефа. Разработанные статистические карты помогают наглядно иллюстрировать распространение примесей в атмосферном воздухе.

Статистические поверхности представляют явления, которые имеют определенные значения в каждой точке по всей области их простирания. Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений [4].

На рис. 2 приведен пример карты, отражающей распространение оксида углерода в атмосферном воздухе. Поверхность была получена с использованием метода обратно взвешенных расстояний и иллюстрирует распределение оксида углерода в атмосферном воздухе города Красноярска.

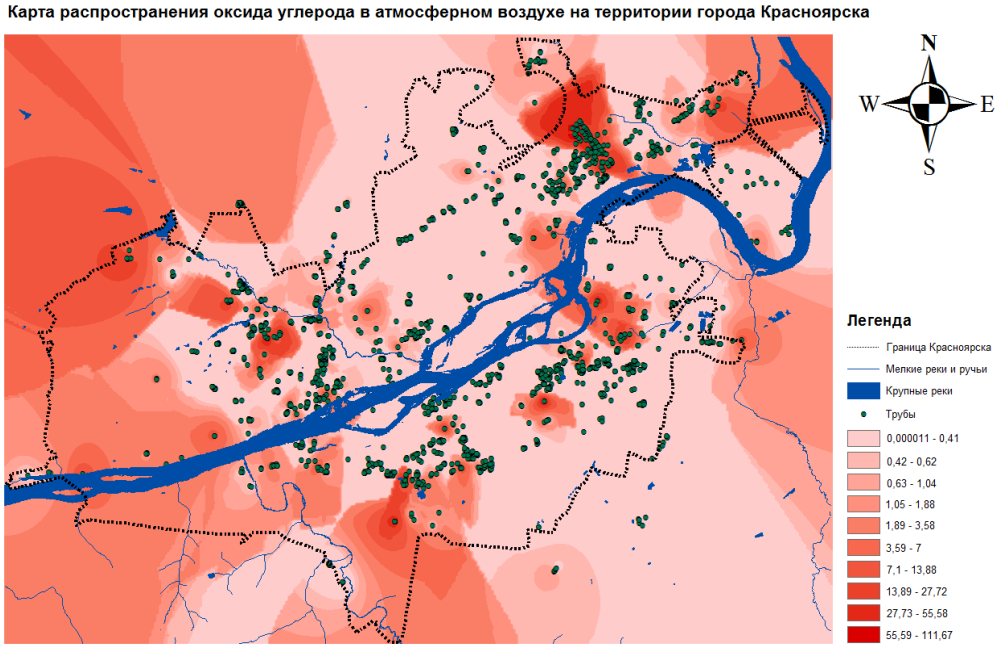



Рис. 2. Карта распространения оксида углерода в атмосферном воздухе на территории города Красноярска

Карта иллюстрирует, что наибольшая концентрация выбросов оксида углерода зафиксирована в районе Красноярского алюминиевого завода.

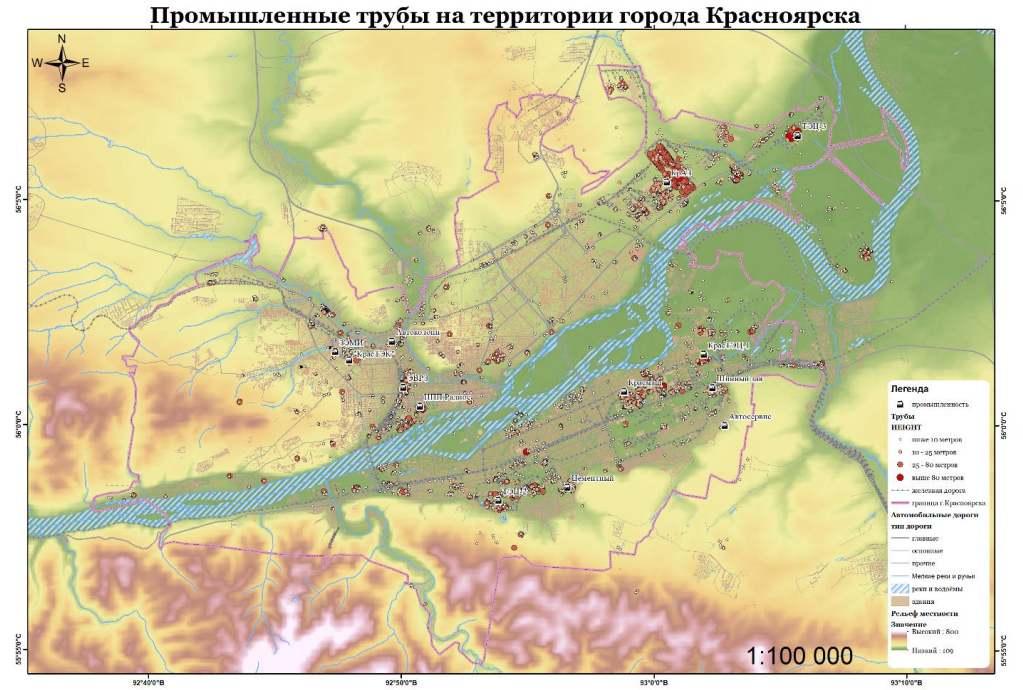



Рис. 3. Карта промышленных труб на территории города Красноясрка

На рис. 3 приведен пример картографирования расположения промышленных очистных сооружений на территории города Красноярска. Данная карта была разработана для наглядной визуализации плотности распространения очистных сооружений. Также карта иллюстрирует высотную классификацию труб. Далее данная классификация использовалась для изучения абсолютной высоты труб с учетом высоты местности.

Статья была написана в рамках большой исследовательской работы, посвященной атмосферному воздуху города Красноярска. В дальнейшем для мониторинга экологической обстановки будут использоваться данные дистанционного зондирования Земли.

## Список литературы

1. Солнцев Л.А. Геоинформационные системы как эффективный инструмент экологических исследований: учеб.-метод. пособие. – Н. Новгород, 2012

2. Красноярск. Экологические очерки / Р.Г. Хлебопрос, О.В. Тасейко, Ю.Д. Иванова, С.В. Михайлюта; по ред. В.Г. Суховольского. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 130 с.

3. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году: гос. докл. М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017. 760 с.

4. Интернет портал «ArcGIS for Desktop»: Создание и анализ поверхности. URL: http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/analyze/commonly-used-tools/surface-creation-and-analysis.htm.

УДК 528.88; 551.584.2

**М.Ю. Грищенко, М.И. Варенцов, П.Г. Михайлюкова**
Кандидат геологических наук, Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: m.gri@geogr.msu.ru, mvar91@gmail.com, polinam_20@mail.ru

# АНАЛИЗ ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ РАЗНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТОВ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлены результаты сопоставления данных четырех типов в контексте анализа острова тепла Москвы: данные контактных измерений; результаты мезоклиматического моделирования (модель COSMO-CLM); тепловые космические снимки низкого пространственного разрешения (съёмочная система MODIS); тепловые космические снимки высокого пространственного разрешения (снимки со спутников серии Landsat). Результаты показали хорошее согласование космических данных друг с другом при невысоких коэффициентах корреляции между космическими данными и результатами моделирования.

*Ключевые слова: городской остров тепла, Москва, Landsat, MODIS, мезоклиматическое моделирование.*

**Введение.** Москва является крупнейшим мегаполисом Европы. Для неё, как и для всех крупных городов, характерно формирование своеобразного городского местного климата и ярко выраженного эффекта городского острова тепла [1]. Далеко не все особенности городского климата Москвы хорошо изучены, несмотря на значительную актуальность этой проблемы. Тем не менее исследованию острова тепла Москвы и другим местным климатическим особенностям посвящено значительное число работ в отличие от большинства других российских городов. Это обстоятельство в сочетании с хорошей оснащенностью города гидрометеорологическими данными позволяет рассматривать Москву как базовый модельный город для отработки методов и закономерностей.

**Материалы и методы.** Уникальность Москвы в качестве объекта исследования городской климатологии заключается в наличии достаточно плотной сети пунктов метеорологических наблюдений. Многолетние наблюдения ведутся на метеостанциях ФГБУ «Центральное УГМС» и других ведомств. Несколько станций расположены в пределах города, включая станцию «Балчуг» в центре города, станцию «ВДНХ» и метеорологическую обсерваторию МГУ. Относительно недавно появились и продолжают расширятся сети автоматических метеостанций (АМС) ФГБУ «Центральное УГМС» и автоматических станций контроля качества загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг».

В качестве аэрокосмических данных использованы снимки съёмочных систем MODIS, ETM+ и TIRS. Съёмочная система MODIS работает на спутниках Terra и Aqua. Для изучения острова тепла важны данные каналов 31 и 32 (10,78–11,28 и 11,77–12,27 мкм соответственно). Пространственное разрешение этих снимков составляет 1 км. Съёмка территории Московского региона ведётся четыре раза в сутки. В то же время в открытом доступе имеются тепловые космические снимки существенно более высокого пространственного разрешения. На сегодняшний день максимальное пространственное разрешение тепловых снимков, имеющихся в открытом доступе, составляет

© Грищенко М.Ю., Варенцов М.И., Михайлюкова П.Г., 2019

60 м (съёмочная система ETM+) и 100 м (съёмочная система TIRS). Эти съёмочные системы работают на спутниках серии Landsat. Съёмка территории Московского региона осуществляется раз в 8 дней в спектральном диапазоне 10,4–12,5 мкм (съёмочная система ETM+) и в двух каналах в пределах диапазона 10,6–12,5 мкм: 10,6–11,2 и 11,2–12,5 мкм (съёмочная система TIRS).

Для моделирования метеорологического режима Московского региона использована региональная климатическая модель COSMO-CLM [2] – адаптированная для продолжительных расчетов версия модели атмосферы COSMO [3]. В модели осуществляется численное решение негидростатической системы уравнений гидротермодинамики для атмосферы при заданных начальных и граничных условиях. В рамках блока TERRA моделируется термический и влажностный режим деятельного слоя подстилающей поверхности с учётом процессов тепло- и влагообмена в почве, эвапотранспирация и других [4]. Модель COSMO используется в оперативном режиме для численного прогноза погоды во многих странах мира, в том числе в России [5].

**Результаты.** Произведено сравнение четырех видов данных для Московского региона с целью изучения взаимосвязей между ними и определения, какие типы местных климатических особенностей они иллюстрируют: сравнивались космические данные о температуре поверхности высокого разрешения (тепловые снимки со спутников серии Landsat) и низкого разрешения (тепловые снимки съёмочной системы MODIS), данные прямых наблюдений за температурой воздуха и результаты модельных расчетов с помощью модели COSMO-CLM.

Результаты сравнения показали достаточно хорошее согласие между данными Landsat и MODIS по абсолютным значениям температуры поверхности и её пространственному распределению. Однако между ними есть и различия: данные Landsat показывают значительно большую пространственную изменчивость температуры поверхности и более высокие значения температуры для «урбанизированных» ячеек. Максимальные различия наблюдаются для центральных районов города: для них разность температур между данными Landsat и MODIS достигает 5 °C. Данные коррелированы, но связь не идеальная ($R_2 \approx 0{,}75$), а коэффициенты наклона линии тренда значительно отличаются от единицы ($k \approx 1{,}25$). Важной особенностью космических данных высокого разрешения является возможность изучения микромасштабной изменчивости температуры поверхности. Значения стандартного отклонения температуры поверхности внутри ячеек сетки размером 1 × 1 км превышают 5 °C, т.е. микромасштабная изменчивость температуры поверхности соизмерима по порядку величины с интенсивностью поверхностного острова тепла. Наибольшая микромасштабная изменчивость характерна для границ урбанизированных территорий и лесопарковых зон, для отдельных районов города за пределами его центральной части, а также для отдельных «загородных» ячеек.

Мезомасштабная региональная климатическая модель COSMO-CLM в целом успешно воспроизводит поверхностный городской остров тепла, диагностируемый по космическими данными. Однако для загородных территорий модель существенно занижает наблюдаемую пространственную изменчивость температуры, а для города воспроизводит более высокие значения температуры поверхности по сравнению с данными Landsat и, тем более, по сравнению с данными MODIS. В результате корреляция между модельными и космическими данными не столь сильная, $R_2$ не превышает 0,66 по всей области сравнения, и не превышает 0,4 для урбанизированных модельных ячеек. Такие результаты могут указывать как на неточность задания теплофизических и морфометрических параметров городской среды в модели, так и на неточности заложенных в модель физических параметризаций городской поверхности. Более детальное определение причин имеющихся расхождений между моделью и космическими данными требует более обстоятельного и комплексного исследования.

**Выводы.** Космические данные низкого и высокого пространственного разрешения (MODIS и Landsat) хорошо согласуются друг с другом, однако данные Landsat показывают значительно более высокую пространственную изменчивость температуры поверхности, и более высокие её значения для городских условий. Космические данные высокого пространственного разрешения (тепловые снимки Landsat) характеризуют высокую пространственную изменчивость температуры на микромасштабе: стандартное отклонение температуры поверхности в пределах ячеек 1×1 км может превышать 5 °C, что соизмеримо по порядку величины с интенсивностью поверхностного острова тепла.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00715 А.*

**Список литературы**

1. Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова. М.: Изд-во Мос. ун-та, 2017. 288 с.

2. Rockel B., Will A., Hense A. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) // Meteorol. Zeitschrift. 2008. Vol. 17. № 4. P. 347–348.

3. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities / M. Baldauf, A. Seifert, J. Förstner [et al.] // Mon. Weather Rev. 2011. Vol. 139, № 12. P. 3887–3905.

4. A description of the nonhydrostatic regional COSMO model. Part II: Physical parameterization / G. Doms, J. Förstner, E. Heise [et al.]. 2011. 153 p.

5. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru мезомасштабного краткосрочного регионального прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 5–20.

УДК 528.88

**М.Ю. Грищенко[1], Е.Ю. Сарычев[2]**

[1] Кандидат геологических наук, [2] Магистрант

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: m.gri@geogr.msu.ru, evgen.sarychev.1@gmail.com

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО КОМФОРТА

Статья посвящена использованию космических снимков высокого пространственного разрешения для извлечения параметров городской среды с целью оценки биоклиматического комфорта. Рассмотрены параметры, необходимые для работы мезомасштабной климатической модели COSMO. На примере территорий Москвы, Нижнего Новгорода, Якутска произведено извлечение рассматриваемых параметров, основанное на контролируемой классификации космических снимков. В результате исследования выявлено, что наиболее достоверные результаты получены при использовании космических снимков со спутников Sentinel-2.

*Ключевые слова: городская среда, контролируемая классификация космических снимков, COSMO, Москва, Нижний Новгород, Якутск.*

**Введение.** Городской климат зависит от размера города, его структуры, физико-географических особенностей. Всё это в конечном итоге влияет на проживающих в городе людей. В рамках современных исследований городской среды всё чаще поднимаются вопросы, связанные с оценкой её биоклиматического комфорта. В таких работах специалисты-климатологи прибегают к данным дистанционного зондирования: информация, извлекаемая из ДДЗ, может использоваться для климатического моделирования и для изучения городской среды в целом. Особенно актуальным является использование снимков высокого пространственного разрешения, так как они позволяют детально изучить структуру городской застройки.

В климатических исследованиях городской среды чаще всего используется мезомасштабная климатическая модель COSMO. Для работы этой модели, помимо прочего, необходимы следующие параметры городской среды, рассчитываемые по модельным ячейкам размером 1 км × 1 км:

1) доля площади зданий (площадь всех зданий в пределах модельной ячейки, отнесённая к общей площади ячейки);

2) доля урбанизированной территории (суммарная площадь всех зданий, дорожного покрытия и растительности в пределах городской застройки, отнесённая к общей площади ячейки);

3) средняя этажность зданий (среднее арифметическое количества этажей зданий в пределах каждой модельной ячейки);

4) теплоёмкость объектов городской застройки.

Кроме того, полезно провести выделение локальных климатических зон (ЛКЗ) [1], на основе которых можно получить другие важные параметры.

В качестве исследуемых городских территорий в работе рассмотрены Москва, Нижний Новгород и Якутск как города, значительно различающиеся по характеру застройки, географическим условиям и хорошо обеспеченные наземными метеорологическими данными.

© Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю., 2019

**Исходные материалы и методика расчёта параметров.** Доля площади зданий и доля урбанизированной территории могут быть рассчитаны по космическим снимкам высокого пространственного разрешения. Для этой цели использованы космические снимки со спутников Spot-6/7 и Sentinel-2. Рассчитать среднюю этажность зданий по космическим снимкам не представляется возможным, поэтому для этой цели использованы векторные данные OpenStreetMap (OSM). Теплоёмкость объектов городской застройки может быть косвенно оценена по тепловой структуре [2], которую можно выделить по тепловым космическим снимкам со спутников серии Landsat (пространственное разрешение снимков со спутника Landsat-8, использовавшихся в работе, составляет 100 м). Локальные климатические зоны выделяют также по снимкам со спутника Landsat-8 [3].

Проведены тестовые испытания на трёх различных участках с разной застройкой в пределах Москвы: район Текстильщики с жилой многоэтажной застройкой, Тверской район с плотной исторической застройкой и посёлок Мещёрский с малоэтажной застройкой усадебного типа. Для каждого тестового участка подобраны эталоны следующих объектов: древесная растительность, луговая растительность, территории без растительности, водные поверхности, дороги и здания. Результаты показали, что часть пикселов, которые относятся к теням зданий, определяются как водные объекты. Решить эту проблему можно с помощью маскирования водных объектов по снимку в ближнем инфракрасном диапазоне, так как акватории в этом диапазоне имеет наименьшие значения спектральной яркости.

После маскирования водных объектов проведена контролируемая классификация космических снимков. Выделенные по итогам контролируемой классификации объекты использованы для расчёта доли площади зданий и доли урбанизированной территории. Для выделения растительности в пределах городской застройки вокруг зданий построены буферные зоны размером 20 м (размер буферной зоны оценён экспертным путём).

При расчёте средней этажности зданий для каждой модельной ячейки по данным OSM возникли сложности, связанные с тем, что для многих зданий этажность не указана. В частности, в Якутске она не указана для большинства зданий. В связи с этим, расчёт средней этажности проведён двумя методами: в первом случае, помимо средней этажности, рассчитаны доля площади зданий с известной этажностью и доля площади зданий с неизвестной этажностью; во втором случае для зданий, для которых этажность не задана, использованы эмпирические значения этажности: 2 этажа для сельский поселений, 5 этажей для городов и 7 этажей для крупных городов.

Для оценки тепловой структуры города необходимо создать многовременной тепловой снимок. Следует отобрать по одному тепловому снимку за каждый месяц, и они должны быть расположены в порядке смены сезонов без учёта года съемки. Из них формируется один многозональный файл. Проведена неконтролируемая классификация с помощью алгоритма ISODATA со следующими параметрами: минимальный размер кластера 50 пикселов, количество классов от 5 до 25. Для всех полученных результатов неконтролируемой классификации вычислен коэффициент различия графиков временных образов. Этот коэффициент рассчитывается как среднее значение разностей между ближайшими по интенсивности излучения классами для каждого снимка. Чтобы его рассчитать, следует упорядочить все средние значения в порядке увеличения, а затем из наибольшего значения вычесть наименьшее. В итоге выбраны следующие количества классов для каждого города: Москва – 15 классов, Нижний Новгород – 14 классов, Якутск – 11 классов.

Для определения локальных климатических зон следует провести передискретизацию, т.е. нужно изменить пространственное разрешение космических снимков с 30 метров на 100 метров. Требуется набрать эталоны для каждого типа ЛКЗ (17 типов), используя снимок высокого пространственного разрешения. После этого производится контролируемая классификация методом Random Forest Classification.

**Результаты.** Для Москвы рассчитаны параметры городской среды по сетке мезомасштабной модели COSMO по данным, полученным по снимку со спутника Spot-6 и по снимку со спутника Sentinel-2. Достоверность результатов расчётов доли площади зданий по космическим снимкам оценена сопоставлением их с результатами расчётов этих параметров по векторным данным OSM. Для оценки достоверности расчётов доли урбанизированной территории аналогичным образом использованы расчёты по векторным данным OSM, а также данные The Global Man-made Impervious Surface (GMIS) [4]. Для Нижнего Новгорода и Якутска расчёты по снимку со спутника Spot-6 не проводились, в остальном работа проведена аналогичным образом.

Для оценки результатов определения доли площади застройки и доли урбанизированной территории рассчитаны статистические характеристики (среднее арифметическое значение и дисперсия) для каждого параметра. Эти же характеристики рассчитаны для средней этажности, которая была определена двумя способами. Кроме этого, рассчитаны статистические характеристики средних значений разниц (по модулю) определяемых параметров для каждой модельной ячейки. Для пар значений, рассчитанных по разным данным, определены коэффициенты пространственной корреляции. Проведено сравнение доли урбанизированной территории, рассчитанной по данным, полученным по снимку со спутника Sentinel-2, и по данным Global Man-made Impervious Surface (GMIS). Для каждой ЛКЗ и для каждого элемента тепловой структуры рассчитана их площадь и проведена оценка пространственной дифференциации значений разниц рассматриваемых параметров городской среды, рассчитанных по разным исходным данным разными способами.

Наименьшая разница в определении параметров наблюдается у пары данных, полученных по векторным данным и по данным, полученным по снимку со спутника Sentinel-2. Для Москвы максимальная разница в определении доли площади зданий и доли урбанизированной территории характерна для данных, полученных по снимку со спутника SPOT-6, для следующих ЛКЗ: open mid-rise, open low-rise, large low-rise и heavy industry. Это связано с тем, что по результатам классификации в тех районах Москвы, для которых характерны типы ЛКЗ open mid-rise и heavy industry, часть пикселов была ложно отнесена к классу застройки. Для типов ЛКЗ open low-rise и large low-rise максимальные различия связаны с тем, что снимок со спутника Spot-6 имеет очень высокое пространственное разрешение, на котором отчетливо различимы отдельные малоэтажные здания.

**Выводы.** Предложенные методические приёмы позволяют достоверно определять параметры городской застройки. Для определения доли площади зданий и доли урбанизированной территории подходят данные, полученные по снимку со спутника Sentinel-2. Для всех городов характерна минимальная доля площади зданий у типа ЛКЗ open low-rise, максимальная доля урбанизированной территории у всех городов разная.

*Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-20070 «Оценка и прогноз биоклиматической комфортности городов России в условиях изменения климата в XXI веке»).*

**Список литературы**

1. Stewart I.D., Oke T.R. Local climate zones for urban temperature studies // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. P. 1879–1900.

2. Грищенко М.Ю., Балдина Е.А. Исследование возможностей применения снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для создания тематических карт // Вопросы географии. Т. 144. Картография в цифровую эпоху / под ред. В.М. Котлякова, И.К. Лурье, А.А. Медведева, Т.Е. Самсонова. М.: Кодекс, 2017. С. 358–375.

3. World Urban Database. URL: http://www.wudapt.org (дата обращения: 07.06.2019).

4. Global Man-made Impervious Surface (GMIS) Dataset From Landsat, v1 (2010). URL: https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/ulandsat-gmis-v1 (дата обращения: 07.06.2019).

УДК 629.786.2:632

**Р.Ю. Данилов[1], О.Ю. Кремнева[1], В.Я. Исмаилов[1], В.А. Третьяков[2], А.А. Ризванов[2], В.В. Кривошеин[2]**

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, Россия, e-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru

[2] Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев, Россия, e-mail: sportinz@mail.ru

# РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТОДОВ ФИТОСАНИТАРНОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АГРОЭКОСИСТЕМ

На тестовых участках Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений проведены испытания современной гиперспектральной аппаратуры, в результате которых получены оригинальные спектральные характеристики посевов основных сельскохозяйственных культур на фоне различной степени поражения вредными объектами. Осуществлена интерпретация и сопоставление спектральных данных, полученных в результате проведения наземных и дистанционных измерений. Проведена оценка информативности 15 общепринятых вегетационных индексов, характеризующих фитосанитарное состояние посевов сельскохозяйственных культур посредством корреляционного анализа с целью получения их линейной зависимости от фактически учтенных фитосанитарных параметров растительных объектов. По результатам проведенного анализа подтверждена возможность использования полученных спектральных характеристик для разработки прецизионных методов фитосанитарного мониторинга агроэкосистем.

*Ключевые слова: фитосанитарный мониторинг, спектрометр, тестовые участки, спектральные характеристики растений, вегетационные индексы.*

Современный уровень развития средств ДЗЗ ознаменовался появлением образцов гиперспектральной аппаратуры космического и авиационного базирования. В отличие от мультиспектральных съемочных систем, избирательно регистрирующих отдельные широкие области электромагнитного спектра, гиперспектрометры способны регистрировать сплошную спектральную сигнатуру излучения, отраженного от снимаемой местности, в виде совокупности относительно узких смежных спектральных каналов, охватывающих ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный электромагнитные диапазоны.

Согласно данным ряда исследователей [1, 2], изучение и оценка спектральных яркостей объекта в конкретных узкополосных спектральных каналах позволяет выделять скрытые аномальные изменения, которые невозможно заметить на местности без применения специальных методик или приборов.

Цель наших исследований – разработка прецизионных методов диагностики болезней и вредителей посевов основных сельскохозяйственных культур на основе анализа данных полученных в результате наземных и дистанционных гиперспектральных измерений агроэкосистем.

© Данилов Р.Ю., Кремнева О.Ю., Исмаилов В.Я., Третьяков В.А., Ризванов А.А., Кривошеин В.В., 2019

Методика проведенных исследований была основана на сравнительном анализе данных наземной спектрометрии с результатами воздушной спектральной съемки осуществленной с помощью беспилотного летательного аппарата, укомплектованного специальным оборудованием с целью оценки возможности дистанционной диагностики изменения параметров исследуемых объектов.

С целью организации испытания авиационных и наземных гиперспектральных приборов на экспериментальных полях Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений созданы и подобраны тестовые участки, занятые озимой пшеницей с искусственным инфекционным фоном бурой ржавчины (*Puccinia triticina* Rob.ex Desm. f. sp. tritici) и фоновой обработкой гербицидом сплошного действия; озимым ячменем с искусственным инфекционным фоном карликовой ржавчины (*Puccinia hordei* G.H. Otth.); яровым ячменем с различной численностью и степенью поврежденности личинками пьявицы красногрудой (*Lemma melanopus* L.).

В ходе исследований проводили регулярный фитосанитарный мониторинг посевов и опытных площадок, приуроченный к срокам наземных и дистанционных гиперспектральных измерений.

Приборная база наземных полевых исследований была представлена прокалиброванными по абсолютной интенсивности излучения, автоматизированными спектрометрами Ocean Optics Maya 2000-Pro и Ocean Optics SD2000, которые позволяют наблюдать за отраженным солнечным излучением в режиме on-line.

Для разработки многоцелевой технологии дистанционного фитосанитарного мониторинга сельскохозяйственных культур были проведены испытания беспилотного летательного аппарата GEOSCANAGRO-101, укомплектованного гиперспектральной камерой OXIVNIR-40.

В результате проведенных исследований получен массив (банк) данных количественных спектральных характеристик растительных объектов: спектральной плотности энергетической яркости и коэффициента спектральной яркости.

С целью выявления специфических спектральных диапазонов, свидетельствующих о проявлении изменений, вызванных воздействием вредных объектов, был проведен анализ изменения морфологии спектральных сигнатур энергетической яркости и коэффициента отражения растительных объектов в зависимости от их фактического состояния, учтенного во время полевых обследований на тестовых участках.

Результаты проведенного анализа, позволили выявить корреляционные зависимости спектральных характеристик сельскохозяйственных культур от степени их поражения (повреждения) вредными биообъектами [3, 4]. На рис. 1 в качестве примере представлены средние спектры отражения растений озимой пшеницы в разной степенью развития бурой ржавчины в диапазоне 350–1120 нм.

В качестве первого шага к освоению методологии вегетационной индексации, применительно к данным полученным на тестовых участках была проведена оценка информативности 15 общепринятых вегетационных индексов [5].

Рассчитанные значения индексов подвергались статистической обработке посредством корреляционного анализа с целью получения их линейной зависимости от фактически учтенных фитосанитарных параметров растительных объектов в виде уравнений связи с вычислением значений коэффициента корреляции. Выявление наиболее информативных вегетационных индексов в рамках отдельных групп, проводилось на анализе величин Критерия Фишера (F-критерия) (таблица).

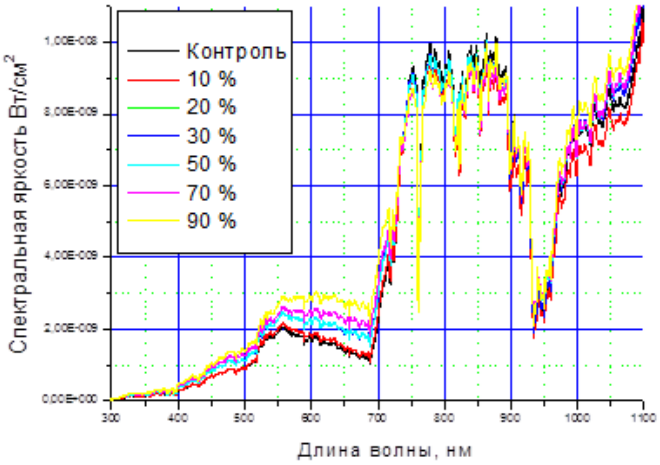



Рис. 1. Средние спектры отражения растений озимой пшеницы
с разной степенью развития бурой ржавчины

Таблица

Результаты расчета индексов «зелености» для растений озимой пшеницы
с различной степенью поражения бурой ржавчиной

| Индекс | Контроль | 10 % | 30 % | 60 % | 70 % | 90 % | Уравнение | $R^2$ | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $NDVI_{705}$ | 0,56 | 0,54 | 0,46 | 0,41 | 0,42 | 0,36 | $y = -0{,}032x + 0{,}58$ | 0,93 | 88,7 |
| $mSR_{705}$ | 4,58 | 4,22 | 3,38 | 2,94 | 3,07 | 2,56 | $y = -0{,}031x + 4{,}70$ | 0,89 | 83,7 |
| $mNDVI_{705}$ | 0,53 | 0,51 | 0,41 | 0,36 | 0,37 | 0,31 | $y = -0{,}035x + 0{,}55$ | 0,93 | 89,9 |
| VOG1 | 1,76 | 1,69 | 1,54 | 1,41 | 1,42 | 1,34 | $y = -0{,}067x + 1{,}88$ | 0,94 | 80,2 |
| VOG2 | –0,23 | –0,21 | –0,16 | –0,13 | –0,14 | –0,11 | $y = -0{,}019x + 0{,}24$ | 0,93 | 81,9 |
| VOG3 | –0,25 | –0,24 | –0,18 | –0,17 | –0,15 | –0,14 | $y = -0{,}022x + 0{,}26$ | 0,93 | 81,1 |
| REPI | 6,42 | 6,00 | 5,04 | 5,03 | 4,49 | 4,64 | $y = -0{,}371x + 6{,}58$ | 0,91 | 84,5 |

Проведенная оценка статистической значимости показала высокую степень надежности полученных уравнений регрессии, которые выражают зависимость величин вегетационных индексов от учтенных фитосанитарных параметров посевов пшеницы и ячменя.

Использование полученной информации открывает возможности для оперативного контроля за состоянием посевов сельскохозяйственных культур с целью обеспечения высокой эффективности защитных мероприятий, что в свою очередь будет способствовать оптимизации финансовых затрат при выращивании сельскохозяйственных культур и снижению пестицидной нагрузки на агроэкосистемы. Другое важное значение эти данные имеют для валидации дистанционных космических наблюдений с использованием многоспектральной и гиперспектральной аппаратуры.

*Работа была выполнена при поддержке гранта № 19-416-233025 р_мол_а РФФИ и администрации Краснодарского края.*

**Список литературы**

1. Кравцов С.Л., Голубцов Д.В., Лисова Е.Н. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям) // Исследование Земли из космоса. 2013. № 1. С. 79–91.

2. Применение авиационных гиперспектральных снимков и наземных данных для целей точного земледелия / А.А. Деркачева, О.В. Тутубалина, М.В. Зимин, Е.И. Голубева // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2015. Спецвыпуск. С. 43–46.

3. Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли / Р.Ю. Данилов, В.Я. Исмаилов, В.А. Третьяков [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32, № 10. С. 82–86.

4. Разработка методики расчета показателей состояния посевов сельскохозяйственных культур по гиперспектральным данным дистанционного зондирования Земли / Р.Ю. Данилов, В.Я. Исмаилов, В.А. Третьяков [и др.] // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: материалы докл. второй Всерос. науч. конф. с междунар. участием. 26–28 сентября. СПб. С. 327–333.

5. Разработка методов оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур на основе расчета гиперспектральных вегетационных индексов / Р.Ю. Данилов, В.Я. Исмаилов, Ю.В. Шумилов [и др.] // Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вып. 9. 2016. С. 36–40.

УДК 528.4

**Н.И. Добротворская[1], А.В. Чернов[2]**

[1] Доктор сельскохозяйственных наук, [2] Кандидат технических наук,
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: dobrotvorskaya@mail.ru, avch-1011@mail.ru

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЧВЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЗЗ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эффективность планирования и использования земельных ресурсов в значительной мере зависит от полноты и актуальности цифровых данных о соответствующей территории. Современным решением для получения таких данных является применение беспилотных авиационных систем с представлением результатов в виде цифровых моделей рельефа и 3D-моделей. Представлены практические результаты использования такой методики на примере части территории с неоднородным рельефом, показаны ее преимущества относительно использования традиционных аналоговых данных, рассмотрены основные направления и перспективы использования для рационального использования земель в землеустройстве и проектирования почво- и природоохранных систем земледелия.

*Ключевые слова: 3D-модель, цифровая модель рельефа, беспилотный летательный аппарат, фотограмметрическая обработка.*

**Введение.** В результате смены социально-экономических условий и перехода к рыночной экономике сельскохозяйственный товаропроизводитель оказался перед необходимостью самостоятельно планировать использование своих земель, исходя из их специфических особенностей. Природные особенности и ресурсный потенциал земель существенно различаются в зависимости от ландшафтных условий. Важнейшим фактором дифференциации является рельеф местности: различия высоты над уровнем моря, характер поверхности, крутизна, форма и экспозиция склонов, наличие форм микрорельефа и т.д. В зависимости от перечисленных факторов находятся такие важные агрономические характеристики как тепло- и влагообеспеченность почв и агроценозов, уровень почвенного плодородия, которые в свою очередь определяют весь технологический комплекс выращивания тех или иных культур.

В 60–80-е гг. XX в. информация о природных ресурсах местности обеспечивалась почвенной съемкой территории региональными институтами системы «Гипрозем». Методика полевого почвенного обследования этого периода опиралась в основном на использование в качестве топографической основы аэрофотоснимков, а также планов земле- и лесоустройства.

Традиционные почвенные карты и сейчас можно рассматривать как модель почвенного покрова [1], однако, учитывая постепенность накопления изменчивости признаков-свойств почв и неопределенность границ между элементарными почвенными ареалами, точность такой модели ограничивается субъективностью суждений почвоведа-картографа. Топопланы с линиями рельефа использовались в основном на территориях с сильно пересеченным рельефом, а также при проведении почвенной съемки крупного и детального масштаба для проектирования мелиоративных (осушительных и оросительных) систем.

© Добротворская Н.И., Чернов А.В., 2019

В настоящее время возросшие требования к почвенным картам реализуются на основе расширения состава картографируемых признаков и изучаемых зависимостей, с применением новых методических средств и приемов, в том числе ГИС-технологий, с привлечением информации из других разделов почвоведения и смежных дисциплин. Важным направлением развития методов отображения форм поверхности земли становится 3D-моделирование на основе обработки данных аэрофотосъемки, полученных с применением современных беспилотных авиационных систем самолетного и вертолетного типов, а также применения и последующей автоматизации процедуры обработки результатов лидарной съемки с использованием воздушных лазерных сканеров. Наибольшее внимание в развитии данной области отводится моделированию объектов недвижимости (в особенности, на городских территориях) [2–4], однако направление использования цифровых данных для проектирования почво- и природоохранных систем земледелия не получило широкого освещения в научной и технической литературе, что подтверждает актуальность выполнения исследования.

**Объектом** исследований выбрана часть территории ООО «Альтаир» Локтевского района Алтайского края. Участок «Самарка» расположен в предгорной равнине Алтая. Рельеф исследуемой территории характеризуется значительной расчлененностью с преобладанием поверхностей с углом наклона 1,5–3,0°. Площадь участка составляет 1 920 га. Координаты от 50,9 до 50,95° с.ш. и от 81,55 до 81,63° в.д. В качестве исходной информационной основы использовалась карта почвенного обследования 1975 г.

**Методика** исследовательской работы включала в себя обследование рельефа с использованием беспилотного летательного аппарата Supercam-250, оборудованного фотокамерой SONY Альфа 6000 24,3 мП, высокоточным бортовым приемником JAVAD TRE-G3TAJT и полевого почвенного обследования, изготовления карты рельефа, почвенной карты.

На основании полученного цифрового материала была сформирована цифровая модель рельефа, по данным которой создан фрагмент 3D-модели рельефа исследуемого участка. Для фотограмметрической обработки результатов использовался программный комплекс Agisoft Photoscan, в котором последовательно создан разряженный и плотный массивы точек и непосредственно 3D-модель. Для наглядности представления результатов выбран модельный участок, характеризующийся относительно большими перепадами высот (от 256 до 358 м.) площадью 52 Га.

**Результаты и обсуждение**. Точность почвенного обследования существенно возрастает при использовании цифровой модели рельефа (ЦМР). В данной работе ЦМР создавалась по материалам цифровой аэрофотосъемки с БПЛА с разрешением снимков 9 см на пиксель, с использованием маркированных опорных и контрольных точек. Точность ЦМР порядка 25 см по высоте, что соответствует требованиям к высоте сечения рельефа 1 м. Построение ЦМР и ЦТП (цифрового топографического плана) осуществлялось с использованием программ Photoscan (Agisoft, Россия) и ГИС Панорама. ЦМР была представлена в двух вариантах: 1) высотная часть ЦТП масштаба 1 : 2 000 в виде пикетов и горизонталей через 1 метр, наложенных на ортофотоплан. В этом варианте представлены те основные формы мезорельефа, которые должны быть отображены на ЦТП соответствующего масштаба; 2) матрица высот, в которой каждому пикселю соответствует квадрат на поверхности размером 0,5 × 0,5 м. Такой вариант ЦМР позволяет детализировать особенности поверхности, включая уровень микрорельефа – формы поверхности и элементы размером единицы и десятки метров даже с незначительными колебаниями высот.

В данной работе полученная цифровая картографическая модель позволила детализировать особенности поверхности, включая уровень микрорельефа – уклон поверхности в градусах, направления поверхностного стока и эрозии, формы поверхности и элементы размером единицы и десятки метров с колебаниями высот до 1,0 м (рис. 1).

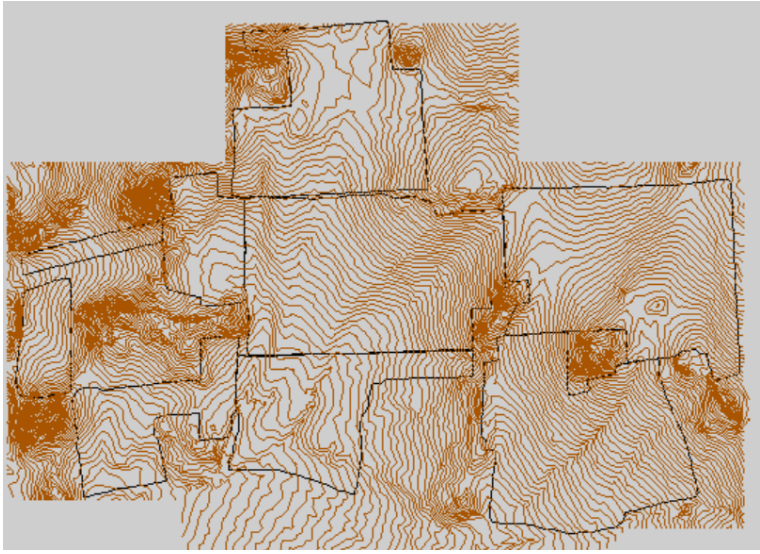


Рис. 1. Высотная часть ЦТП участка «Самарка». Изолинии проведены через 1 м.
Черные линии – границы сельскохозяйственных полей

Сгущение изолиний рельефа отражает расположение в изучаемом пространстве локальных возвышений – сопок, почвенный покров которых характеризуется малой мощностью гумусового горизонта (12–15 см) вследствие эрозионных процессов, или почти полным его отсутствием, выходом на поверхность щебнистых пород. Сельскохозяйственные поля расположены в межсопочных пространствах. Отчетливо проявляется особенность рельефа – склоны сложной формы, называемые гофрированными. Такой характер склонов особенно способствует развитию процессов линейной эрозии, формирующих в течение короткого времени глубокие ложбины и промоины.

В результате обработки данных аэрофотосъемки объекта исследования, были получены следующие результаты:

- цифровая модель рельефа, представленная в виде градиентного изображения (рис. 2);
- пространственные профили, позволяющие выявить участки территории, наиболее подверженные эрозионным процессам и соответственно спланировать различные рекультивационные мероприятия (рис. 3);
- автоматически генерируемый статистический анализ моделируемой территории, необходимый для расчета объема работ и экономической составляющей (рис. 4);
- 3D-модель территории с различной градиентной окраской, наглядно отображающая особенности и неоднородность рельефа территории (рис. 5).

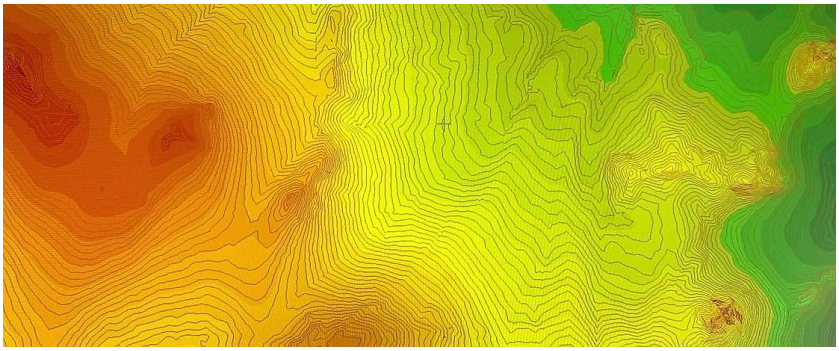


Рис. 2. Цифровая модель рельефа объекта исследования

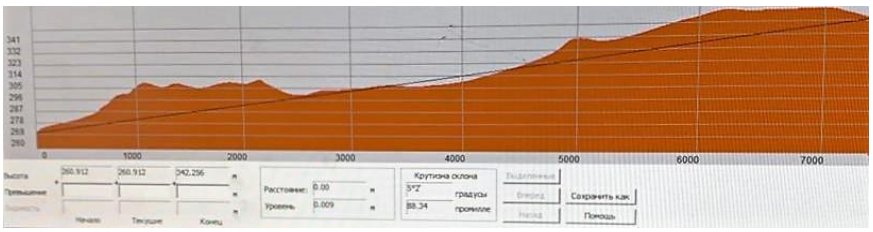



Рис. 3. Пространственный профиль моделируемой территории

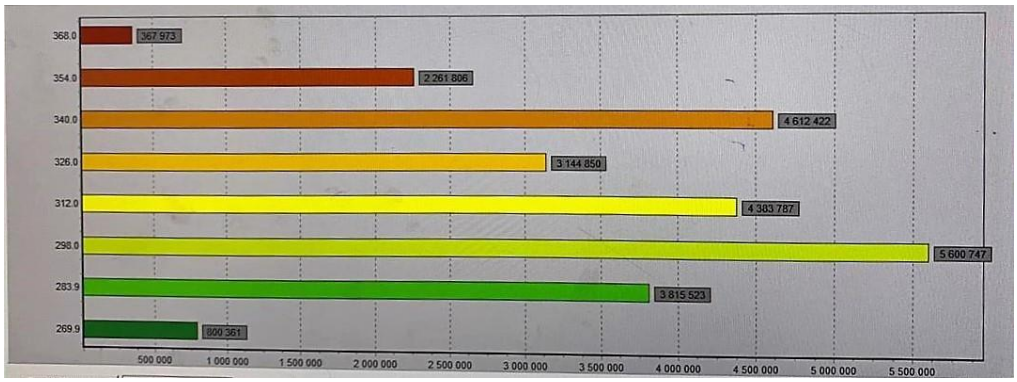



Рис. 4. Статистический анализ моделируемой территории

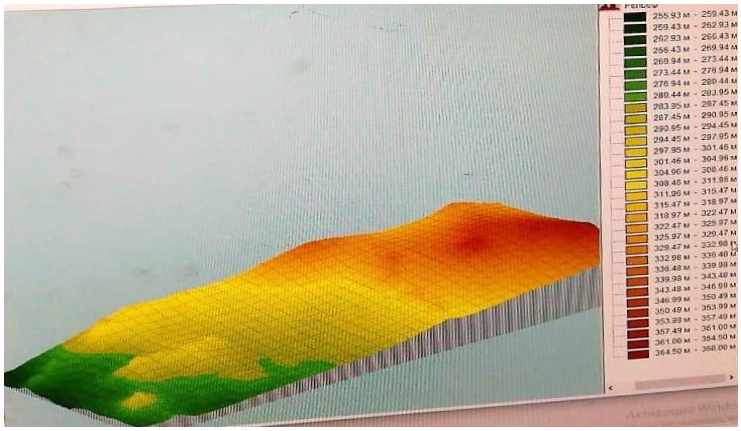


Рис. 5. 3D-модель исследуемой территории

Приведенные результаты позволяют выявить две характеристические черты. Во-первых, неоднородность поверхности склона и, как следствие, почвенного покрова. Она существенным образом осложнена элементами микрорельефа: микрозападинами и микробугорками, что является причиной значительной неоднородности в степени увлажненности почвы. Во-вторых, модель позволяет выделить как минимум три высотные зоны на поверхности исследуемого участка в целом: высокую (отметки в диапазоне от 340 до 368 м над у. м.), среднюю (от 284 до 340 м над у.м.) и низкую (от 260 до 284 м над у.м.). Границы между ними обеспечивают большую точность эктраполирования данных о почвах, полученных методом точечных почвенных разрезов. Кроме того, наличие подобной модели существенно сокращает объем наземной почвенной съемки, связанный с выявлением переходных зон от одной почвенной разности к другой.

**Заключение.** Современные технологии, использование цифровых данных, полученных в результате проведения аэрофотосъемки как основы для формирования единого геопространства территорий и широкий функционал существующих программных продуктов для фотограмметрической обработки результатов и формирования 3D-моделей позволил значительно оптимизировать процесс проектирования почво- и

природоохранных систем земледелия, организации рационального использования земель в землеустройстве и других сферах. Применение такого комплексного подхода, в совокупности с существующими материалами почвенных и геоботанических обследований позволяет формировать полную, всеобъемлющую и актуальную цифровую базу данных о территориях со значительным уменьшением использования человеческих ресурсов и автоматизации производства такого рода работ. Кроме того, получаемые данные являются основой для различных математических расчетов в режиме реального времени, в том числе, объемов земляных работ, землеустроительных мероприятий и пр. Полученные выводы продемонстрированы на примере исследуемой территории, подтверждают актуальность и научную значимость темы и являются основой для дальнейших исследований по данной тематике.

**Список литературы**

1. Кренке А.Н. Коррекция почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сб. ст. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 284–301.

2. Геопространственный дискурс опережающего и прорывного мышления / А.П. Карпик, Д.В. Лисицкий, К.С. Байков [и др.] // Вестн. СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 4. С. 53–67.

3. Гук А.П., Шляхова М.М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей поданным дистанционного зондирования / А.П. Гук, // Вестн. СГУГиТ. 2015. Вып. 4 (32). С. 51–60.

4. Опритова О. А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости // Вестн. СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 3. С. 248–258.

УДК 631.5:528.8

**Е.А. Дунаева**
Кандидат технических наук, ФГБУН «НИИСХ Крыма»,
Симферополь, Республика Крым
e-mail: crimea@hotmail.com

# ВОЗМОЖНОСТИ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Предметом исследования является динамика варьирования индекса NDVI для озимых культур, выращиваемых по традиционной и no-till технологиям. Цель работы заключалась в оценке возможности использования данных ДЗЗ для сравнения уровня различия в динамике биопродуктивности посевов. Методология работы основана на сравнении значений индекса, полученных по данным различных источников в сравнении с данными сопряженных наземных наблюдений (GreenSeaker). Результаты исследований показали широкий диапазон варьирования уровня сходимости данных ДЗЗ и наземных наблюдений с коэффициентами детерминации: для сервиса ВЕГА (ИКИ РАН) от 0,45 до 0,95; для сервиса OneSoil – от 0,31 до 0,92. Полученные величины отклонений свидетельствуют о необходимости более глубокого изучения причин варьирования и достаточно существенных расхождений в уровне оценок биопродуктивности, для их идентификации и минимизации.

*Ключевые слова: озимая пшеница, традиционная технология, no-till, ДЗЗ, NDVI.*

**Введение.** Использование различных методов оценки с использованием источников информации, основанных на разных принципах, позволяет получить более точную картину по развитию биомассы сельскохозяйственных культур и выявить факторы, оказавшие влияние.

Предмет исследования – динамика варьирования индекса NDVI для озимых культур, выращиваемых по традиционной и no-till технологиям. Цель работы – оценка возможности использования данных ДЗЗ для сравнения уровня различия в динамике биопродуктивности посевов, выращиваемых по различным технологиям.

**Материалы и методы.** Методология работы базируется на сравнении значений индекса NDVI, полученных по данным различных источников: ВЕГА-Science (MODIS) [1], OneSoil [2] – в сравнении с данными сопряженных наземных наблюдений (Trimble GreenSeeker Handheld).

Исследования проводились на пилот-участках посевов озимой пшеницы, выращиваемой по традиционной/классической (пахота, культивации) и технологии прямого посева (no-till) в степной части Крымского полуострова (Сакский, Красногвардейский и Джанкойский район). Для соблюдения условия репрезентативности по величине осадков для сравнения выбраны поля озимой пшеницы, выращиваемые по различной технологии, находящиеся на минимально возможном расстоянии или непосредственно граничащие друг с другом (рис. 1, 2).

**Результаты.** Анализ динамики биомассы по традиционной технологии земледелия и технологии нулевой обработки почвы с использованием данных ДЗЗ и наземных наблюдений приведен в таблице и на рис. 3.

Несмотря на то, что за зимний и весенний периоды 2019 г. сумма осадков по Сакскому району была на 20 % выше, чем по Джанкойскому, динамика развития биомассы, характеризуемая индексом NDVI, в течение вегетации была существенно выше по пи-

© Дунаева Е.А., 2019

лот-участку в Джанкойском районе (одной из причин может быть различие в сроках сева – по Джанкойскому району, несмотря на засушливую осень, на технологии nj-till он был ранним – 28.09.2018).

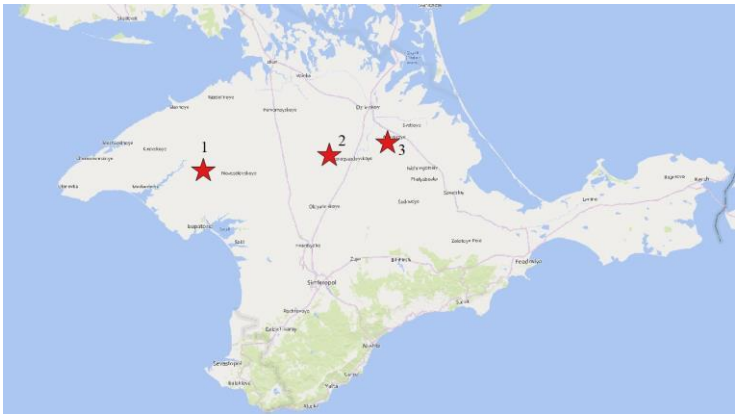



Рис. 1. Расположение полей на территории Крыма

*1* *2* *3*

Рис. 2. Расположение сравниваемых пилот-участков озимой пшеницы:
*1* – Сакский район; *2* – Красногвардейский район; *3* – Джанкойский район

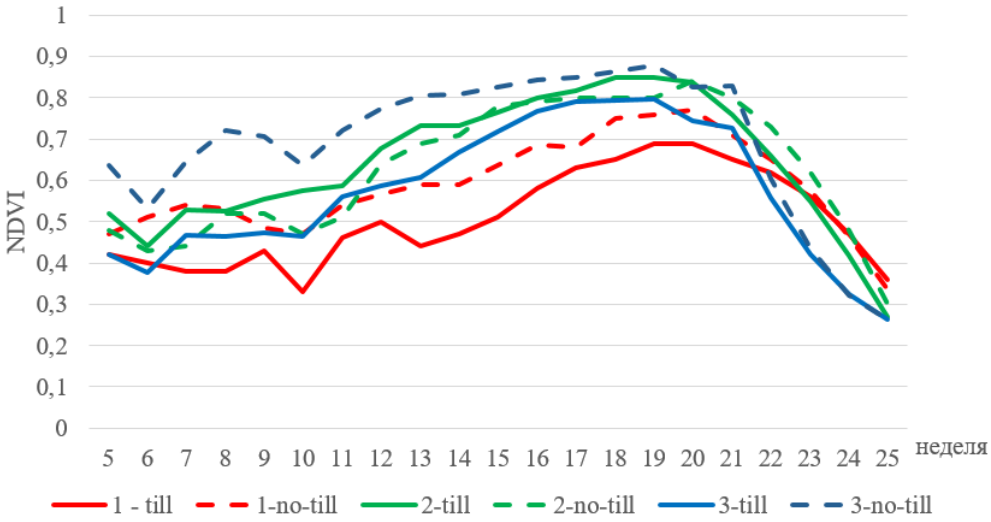



Рис. 3. Сравнение динамики NDVI по данным ВЕГА-Science:
*1, 2, 3* – для Сакского, Красногвардейского и Джанкойского районов соответственно

Значения индекса NDVI для территорий всех пилот-участков по данным сервиса OneSoil приведены в таблице.

Таблица

Значение индекса NDVI по данным ДЗЗ (данные OneSoil.ai)

| Даты | традиционная технология | | | no-till | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1* | 2* | 3* | 1* | 2* | 3* |
| 08.03.2019 | 0,15 | 0,4 | 0,40 | 0,30 | 0,40 | 0,65 |
| 18.03.2019 | 0,15 | 0,45 | 0,45 | 0,50 | 0,50 | 0,70 |
| 02.04.2019 | 0,20 | 0,60 | 0.45 | 0,55 | 0,45 | 0,60 |
| 20.04.2019 | 0,30 | - | 0,65 | 0,65 | 0,50 | 0,80 |
| 30.04.2019 | 0,35 | 0,75 | 0,60 | 0,50 | 0,75 | 0,75 |
| 20.05.2019 | 0,45 | 0,70 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,65 |
| 11.06.2019 | 0,35 | 0,35 | 0,20 | 0,27 | 0,40 | 0,20 |
| 16.06.2019 | 0,27 | 0,20 | 0,15 | 0,20 | 0,20 | 0,17 |

* 1, 2, 3 – для Сакского, Красногвардейского и Джанкойского районов соответственно

Из таблицы и рис. 3 видно, что развитие озимой пшеницы на традиционной технологии возделывания и no-till имеет схожие тренды, однако уровень развития биомассы на последней на пилот-участках Сакского и Джанкойского районов в условиях 2019 г. был существенно выше, чем на традиционной.

Индекс NDVI измерялся в полевых условиях с использованием портативного прибора GreenSeeker Handheld Crop Sensor HCS-100 одновременно с отбором влажности почвы на пилот-участках в среднем один раз в две недели.

Сравнение индекса NDVI, измеренного наземным способом, с данными ДЗЗ показало степень связи от слабой (коэффициент детерминации $r^2$ около 0,3) до высокой ($r^2 > 0,9$).

Примеры связи индекса NDVI по наземных данным и данным ДЗЗ приведены на рис. 4 (для традиционной технологии с данными сервиса OneSoil $r^2 = 0,93$; для технологии no-till с данными сервиса ВЕГА $r^2 = 0,46$).

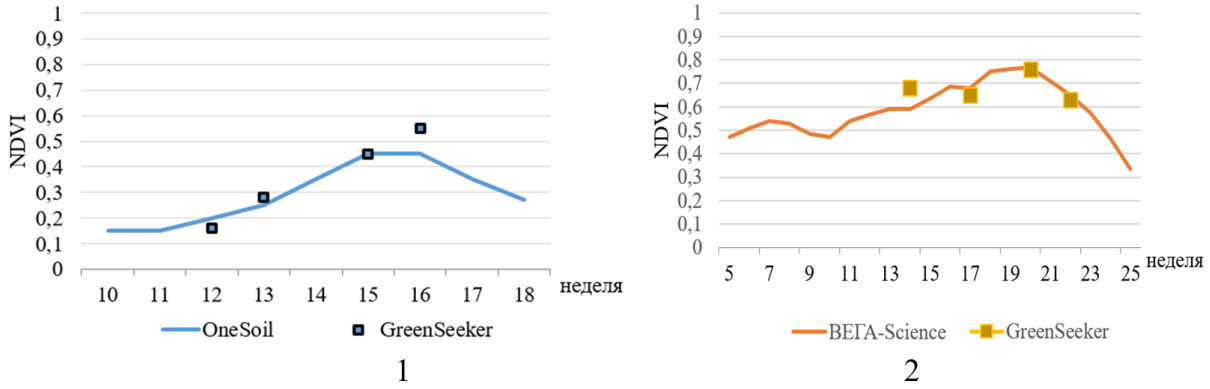



Рис. 4. Сравнение NDVI по данным ДЗЗ (ВЕГА) и OneSoil с измеренным GreenSeeker:
*1* – данные OneSoil, традиционная технология; *2* – данные ВЕГА-Science, no-till, Сакский район

Результаты исследований показали, что более высокий уровень сходимости наземных наблюдений с данными ДЗЗ при использовании сервиса OneSoil возможен и на сравнительно небольших участках (ширина поля пилот-участка озимой пшеницы, выращиваемой по традиционной технологии в Сакском районе – 150 м).

Следует отметить, что точность измерения параметра NDVI прибором GreenSeeker по площади зависит от выбора соответствующего маршрута движения (осреднения) оператором.

**Выводы**. Результаты исследований позволили получить предварительные оценки точности оценки индекса NDVI при сравнении двух различных технологий возделывания озимой пшеницы в богарных условиях степной части Крыма и задействовании для

этих целей как данных ДЗЗ, так и наземных наблюдений с использованием портативного прибора GreenSeeker. Уровень варьирования сходимости данных ДЗЗ и наземных наблюдений $r^2$: для сервиса ВЕГА – 0,45–0,95; для сервиса OneSoil – 0,31–0,92.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-016-00148 А.*

**Список литературы**

1. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263–284.
2. Официальный сайт Бесплатной платформы для точного земледелия. URL: https://onesoil.ai/ru/.

УДК 528.88

**Е.Ю. Жукова[1], Н.В. Кутькина[2], А.А. Жуков[1]**

[1] Хакасский государственный университет, Абакан, Россия

[2] Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии», село Зеленое, Россия

e-mail: biosara@mail.ru, cutcina19@mail.ru

# ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОЦЕНОЗОВ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ ХАКАСИИ ПО ДАННЫМ TERRA MODIS

Приведены результаты количественной оценки продуктивности агроценозов по данным Terra MODIS в пределах степной зоны Хакасии. Показатели валовой продукции различных агроценозов за вегетационный сезон находятся в пределах от 3,42 до 7,41 кг/м$^2$. Для культурных посевов пшеницы, овса и ячменя показатели первичной валовой продукции тесно связаны с суммой положительных температур (до 0,76) даже по линейной корреляции. На основе сезонной и многолетней динамики валовой продуктивности были определены наиболее урожайные посевы и плодородные территории.

*Ключевые слова: Terra MODIS, агроценозы, валовая первичная продукция, эвапотранспирация, продуктивность, Хакасия.*

В связи с неустойчивостью агроценозов Хакасии под действием природных и антропогенных факторов, очевидной необходимостью является осуществление регулярного мониторинга данных объектов. Средства дистанционного зондирования упрощают мониторинг посевов.

Целью исследования являлась оценка продуктивности агроценозов на тестовых участках в Бейском районе Хакасии (степная зона).

Работа базировалась на данных MODIS (https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/ appeears): 1) MOD17A2H (валовая первичная продуктивность – GPP, кг/м$^2$) [1]; 2) MOD16A2 (эвапотранспирация – ET) [2].

Метеоданные предоставлены сайтом https://rp5.ru/. Подсчет суммы положительных температур проводился за период, предшествующий дате съемки, следующим образом: подсчитывалась сумма температур выше 0 ºС 8 раз за сутки (суммы температур выше стандартных). Такой метод показал более высокие значения корреляции на выборке данных. Тестовые участки располагались в окрестностях с. Бея (Бейский район, Хакасия). Коды и типы агрофитоценозов представлены на рис. 1.

По данным Terra MODIS подсчитана общая валовая продуктивность за вегетационный сезон 2018 г. (табл. 1). Как видно из табл. 1, наиболее однородными по продуктивности являлись посевы пшеницы. Минимальное значение показателя у данных агроценозов наблюдали в 20 контуре (*20к*) – 3,57 кг/м$^2$. В большинстве случаев данные находились в пределах от 4,38 до 5,02 кг/м$^2$. Сходные показатели наблюдались для ячменя (4,22 и 4,82 кг/м$^2$) и овса (4,06 и 5,65 кг/м$^2$).

Согласно наземным данным в контурах *9Т* и *10Т* отмечена высокая урожайность, что связано с высоким плодородием. Ячмень имел большую продуктивность общей и генеративной массы (32,9 и 14,9 ц/га) по сравнению с пшеницей (30,1 и 6,1 ц/га). Участие сорняков (*Panicum miliaceum, Brassica napus, Elytrigia repens, Erodium stephanianum, Setaria viridis, Panicum dichotomiflorum, Nonea pulla, Oxybasis glauca, Thlaspi arvense*) невелико (4,7–7,4 ц/га). Ветошь составила 10,7–11,9 ц/га.

© Жукова Е.Ю., Кутькина Н.В., Жуков А.А., 2019

Рис. 1. Расположение и коды агроценозов в Бейском районе Хакасии: 1к – сенокос 1; 2к – овес 1; 3к – залежь 15; 4к – пар 15а; 5к – пар 1; 6к – залежь 16а; 7к – залежь 16; 8к – залежь 16б; 9к – залежь 16в; 10к – залежь 16д; 11к – пшеница 1; 12к – пшеница 2; 13к – ячмень 1; 14к – пшеница 3; 15к – пшеница 4; 16к – пшеница 5; 17к – ячмень 2; 18к – пшеница 6; 19к – пшеница 6 убранное поле; 20к – пшеница 7; 21к – сенокос 2, скошенный; 22к – сенокос 2, нескошенный; 23к – пар 2; 1Т – пар 3; 2Т – пар 4; 3Т – пар 5; 4Т – пар 6; 5Т – пар 7; 6Т – гречиха; 7Т – донник; 8Т – пырей + эспарцет; 9Т – овес 2; 10Т – пшеница 8

Таблица 1

Общая сезонная продуктивность и эвапотранспирация агроценозов на тестовых участках в степной зоне Хакасии

| Код | GPP* | ET** | Код | GPP | ET | Код | GPP | ET | Код | GPP | ET |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Сенокосы** | | | **Пшеница** | | | **Залежи** | | | **Пары** | | |
| *1к* | 4,82 | 2241 | *11к* | 4,38 | 1661 | *3к* | 4,56 | 1730 | *4к* | 4,56 | 2071 |
| *21к* | 4,43 | 1710 | *12к* | 4,22 | 1678 | *6к* | 4,09 | 1875 | *5к* | 4,87 | 2100 |
| *22к* | 5,32 | | *14к* | 4,66 | 1963 | *7к* | 4,26 | 2067 | *23к* | 3,42 | 1665 |
| **Овес** | | | *15к* | 4,66 | 1963 | *8к* | 4,10 | 1861 | *1Т* | 5,21 | 1892 |
| *2к* | 4,062 | 3611 | *16к* | 5,02 | 1987 | *9к* | 4,22 | 1678 | *2Т* | 5,16 | 2087 |
| *9Т* | 5,65 | 2505 | *18к* | 4,9 | 1820 | *10к* | 5,12 | 2050 | *3Т* | 4,26 | 1643 |
| **Ячмень** | | | *19к* | 4,28 | 1950 | **Пырей+эспарцет** | | | *4Т* | 5,65 | 2248 |
| *13к* | 4,22 | 1678 | *20к* | 3,57 | 1950 | *8Т* | 7,41 | 3011 | *5Т* | 6,77 | 2888 |
| *17к* | 4,82 | 1973 | *10Т* | 7,18 | 3007 | **Донник** | | | **Гречиха** | | |
| | | | | | | 7Т | 5,14 | 2072 | 6Т | 5,25 | 2326 |

* GPP – валовая продуктивность, кг/м$^2$; ** ET – эвапотранспирация, кг/м$^2$

Сенокосы имели близкие с пшеницей значения, их проективное покрытие не превышало 50 %. Продуктивными оказались посевы пырея с эспарцетом и донником (7,41 и 5,14 кг/м$^2$). Продуктивность залежей – от 4,09 до 5,12 кг/м$^2$. Для сравнения приведем

наземные данные 3 контура (*Elytrigia repens* + *Festuca valesiaca* – *Artemisia scoparia* + *Odontites vulgaris*) составила 23,5 ц/га сухой массы (включая ветошь 16,3 ц/га).

В течение сезона фитомасса интенсивно нарастала в конце мая, затем максимум развития сохранялся до начала июня. Далее масса снижалась кроме двух пиков в начале июля и августа, связанных с благоприятными метеоусловиями. Основной сезонный прирост GPP приходился на начало июня, конец первой декады июля, конец третьей декады июля.

Косвенным методом оценки влагосодержания в почве может служить эвапотранспирация (ET), причем показатель GPP тем выше, чем больше ET (табл. 1). На парах показатель больше из-за иссушения почвы. Связь между метеоданными и дистанционными параметрами позволяет выявить метеочувствительность культур, используется в прогнозировании урожая. Для пшеницы, овса и ячменя показатели GPP связаны с суммой положительных температур (до 0,76 по линейной корреляции). В меньшей степени зависят от GPP сенокосы, пары и залежи (около 0,50).

Средняя многолетняя продуктивность полей дана в табл. 2.

Таблица 2

Средние многолетние показатели валовой первичной продукции агроценозов Хакасии (Бейский район) за период с 2000 по 2018 г.

| Агроценозы | $\bar{X}$ и σ | Дов. интервал | | GPP в 2018 г., кг/м$^2$ | Min | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | нижний | верхний | | | |
| Пар 3 | 4,65±0,45 | 4,43 | 4,86 | 5,21 | 3,91 | 5,50 |
| Пар 4 | 4,58±0,47 | 4,35 | 4,81 | 5,16 | 3,87 | 5,55 |
| Пар 5 | 4,28±0,45 | 4,06 | 4,49 | 4,26 | 3,43 | 5,24 |
| Пар 6 | 4,83±0,71 | 4,49 | 5,18 | 5,65 | 3,27 | 5,92 |
| Пар 7 | 5,93±0,57 | 5,66 | 6,21 | 6,77 | 5,05 | 7,02 |
| Гречиха | 4,50±0,70 | 4,17 | 4,84 | 5,25 | 3,04 | 5,87 |
| Донник | 4,22±0,45 | 4,00 | 4,44 | 5,14 | 3,29 | 5,14 |
| Пырей + эспарцет | 5,24±1,14 | 4,69 | 5,79 | 7,41 | 3,63 | 7,41 |
| Овес 2 | 5,02±0,47 | 4,79 | 5,24 | 5,65 | 4,20 | 5,96 |
| Пшеница 8 | 6,04±0,55 | 5,77 | 6,30 | 7,18 | 5,07 | 7,18 |

Наиболее продуктивными оказались тестовые участки, где в 2018 г. располагались пар 7, пшеница 8, пырей + экспарцет, овес 2, пар 6. Остальные сообщества имели более низкие показатели. Наибольший положительный рост GPP среди обследованных участков наблюдали в 2003–2004 гг. и в 2015–2016 гг. В 2018 г. также отмечен более высокую продуктивности по сравнению с 2003–2004 гг. Интенсивно растет продуктивность участка с многолетними травами (пырей + эспарцет, донник).

**Заключение**. Таким образом, подсчитана валовая продуктивность агроценозов в районе исследования и определены различия между ними. Меньше всего фитомассы накапливали отдельные пары и низкопродуктивные посевы пшеницы (3,6 кг/м$^2$), а больше всего – многолетние травы и высокоурожайные пшеница и овес (до 5,02–7,41 кг/м$^2$). Это позволяет ранжировать фитоценозы по продуктивности и выбирать оптимальные культуры для выращивания на конкретном участке. Полученные данные могут применяться для мониторинга и оптимизации мелиорации сельскохозяйственных угодий Бейского района.

*Исследование выполнено при поддержке государственного контракта №Ф.2018.387388 от 13.08.2018.*

**Список литературы**

1. Running S., Mu Q., Zhao M. (2015). MOD17A2H. DOI: 10.5067/MODIS/MOD17A2H.006.
2. Running S., Mu Q., Zhao M. (2017). MOD16A2 MODIS / Terra Net Evapotranspiration. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.

УДК 528.88

**А.С. Заварзина[1], Е.Н. Кулик[2]**
[1]Аспирант, [2] Кандидат технических наук
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail:any220394@gmail.com, e.n.kulik@ssga.ru

# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРОСЪЕМКИ С БПЛА

Рассмотрены перспективы использования данных аэрофотосъёмки с беспилотных летательных аппаратов при анализе изменений характеристик сельскохозяйственных земель. Данные применяются для мониторинга состояния земель сельскохозяйственного назначения, они позволяют проводить анализ изменений на уровне отдельно взятого сельскохозяйственного предприятия. Использование результатов анализа помогает определить участки полей, например, предрасположенные к переизбытку или недостатку влаги, принять решение о необходимом типе обработки почвы, что в результате своевременного реагирования улучшает продуктивность сельскохозяйственных культур и, как следствие, увеличивает экономическую выгоду.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационные системы, рельеф, сельское хозяйство, агроландшафт, ЦМР.*

**Основная часть.** Целью активного внедрения в сельское хозяйство геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования для эффективного использования земельных ресурсов является создание информационно-аналитических систем мониторинга и управления, различных автоматизированных сервисов получения информации. Подобный подход должен опираться на комплексное представление о сельскохозяйственных угодьях как агроландшафте с привлечением информации о различных компонентах природной среды [1].

Проведение съемки территории с помощью БПЛА позволяет получить более детализированную информацию по сравнению со спутниковой съёмкой. Результаты обработки материалов съемки могут быть в виде: карт полей сельскохозяйственного предприятия, карт распределения температур почвы, цифровых моделей рельефа, индексных карт, карт динамики развития посевов, схем оценки применения удобрений и средств защиты от вредителей, схем оценки однородности посевов. Определенные типы БПЛА могут использоваться не только как источник информационной продукции, но и как средство точечного внесения удобрений на проблемные участки поля [2, 3].

В различных природных зонах, в зависимости от конкретных условий, формируются разные по внешнему виду и уровню плодородия почвы. Выделяют следующие экологические условия, способствующие и влияющие на почвообразовательный процесс в зависимости от их конкретного сочетания: минералогический состав и свойства материнской породы, климат, состав произрастающей растительности, животные организмы, рельеф, возраст страны (время) и другие [4].

Одним из важнейших факторов развития природных процессов и их влияния на агроландшафты является рельеф территории, он очень сильно определяет локальные особенности распределения воды и солнечной радиации, энергию склоновых процессов, эрозионные процессы (на склоновых формах рельефа возможно проявление водной эрозии почвы, на равнинах с засушливым климатом – ветровой эрозии) [4, 5]. Ори-

© Заварзина А.С., Кулик А.С., 2019, 2019

ентация склона оказывает влияние на микроклиматические условия и интенсивность смыва почвы. Экспозиция и крутизна склонов играют огромную роль в земледелии. Так, участки, расположенные на склонах различных экспозиций, отличаются по микроклиматическим условиям, а также по контрастности водного режима. Северные склоны, как более холодные, поспевают для весенней обработки в более поздние сроки по сравнению со склонами южной экспозиции. Важную роль рельеф играет в условиях обильного выпадения осадков: участки, лишенные естественного стока излишней влаги, очень часто подвергаются заболачиванию [5].

Основным из-за своей информативности источником данных для анализа изменений характеристик сельскохозяйственных земель на основе материалов аэрофотосъёмки является ЦМР. Среди множества возможных задач, решаемых с её использованием, отметим такие как:

- планирование размещения сельскохозяйственных угодий;
- изучение современного состояния естественной среды (направление стока, бассейновое моделирование, оценка зон потенциального затопления);
- моделирование экологических ситуаций и их воздействия на агроландшафты;
- прогнозирование развития ландшафтных процессов (водная и ветровая эрозии, суффозия и др.) и их воздействия на сельскохозяйственные угодья [5, 3].

Важными характеристиками сельскохозяйственных земель, за которыми необходимо частое наблюдение служат влажность почвы, линейная эрозия, динамика развития посевов и их состояние. Для оценки изменений выделенных параметров используются индексные карты, они создаются на основе информации, полученной с помощью специальной аппаратуры (мультиспектральная камера) установленной на БПЛА. В мультиспектральной камере возможное количество линз доходит до 12. Каждая из них воспринимает излучение в узкой области спектра, что позволяет получать более точные данные. При спектральной съемке формируются одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения. Так возможно получать больше изображений и точнее рассчитывать индексы, такие как NDVI, SAVI, WI, NDWI, WDRVI, ARI, TCARI, MSAVI и др. [6].

Особенное место занимает вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующийся для количественной оценки растительного покрова [7].

При анализе спектральных данных, составляются карты качества, температуры и влажности почв, в дальнейшем эти карты могут использоваться при организации работ по внесению удобрений. Также анализ спектральных данных помогает определить зараженные участки растений или же вредителей, что применяется для предотвращения их распространения [6].

**Заключение.** В данной статье была рассмотрена одна из тематических задач применения данных аэрофотосъёмки, в частности с беспилотных летательных аппаратов – анализ изменений характеристик сельскохозяйственных земель на основе анализа рельефа территории: выявление эрозионных процессов (водная и ветровая эрозии, суффозия), изменений границ сельскохозяйственных полей (перемещение полей), направления стока воды (смыв почв), зон потенциального затопления и др.

Применение материалов аэросъёмки с беспилотных летательных аппаратов при анализе сельскохозяйственных земель является развивающимся и актуальным для сельского хозяйства направлением деятельности. Например, современное техническое обеспечение, такое как мультиспектральные камеры, делают беспилотные технологии более информативными.

**Список литературы**

1. Глотов А.А. Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель [// Геопрофи. 2013. № 4. С. 20–22.

2. Опыт применения мультиспектральной съёмки в области сельского хозяйства // Сельское хозяйство. ПРОМаэро., 2014. URL: http://prom.aero/catalog/selskoehozyajstvo.

3. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования для эффективного решения задач сельского хозяйства / Е.Н. Кулик, Е.Ю. Сахарова, В.В. Дедкова, А.С. Заварзина // сб. материалов Нац. Науч.-практ. конф., 14–15 дек. 2017 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 15–20.

4. Евтефеев Ю.В., Казанцев Г.М. Основы агрономии: учеб. пособие. М., 2013. URL: http://www.easyschool.ru/books/biology/osnovi-agronomii-evteev-kazantsev/.

5. Почвенное картирование: учеб.-метод. пособие / Е.В. Абакумов [и др.]. СПб., 2012. URL: http://почвовед.рф/wp-content/uploads/2017/04/1167-Абакумов-Е.В.-и-др.-2012.pdf.

6. Виды и применение спектральной съёмки. 2019. https://bespilotnik.org/info/articles/2018/vidy_i_primenenie_spektralnoy_syemki/.

7. Получение вегетационного индекса NDVI с помощью беспилотников (БПЛА). 2019. URL: https://russiandrone.ru/publications/poluchenie-vegetatsionnogo-indeksa-ndvi-s-pomoshchyu-bespilotnikov-bpla/.

УДК 528.88

**В.В. Занозин[1], А.Н. Бармин[2]**

[1] Аспирант, [2] Доктор географических наук

Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия

e-mail: victorzan44@gmail.com, abarmin60@mail.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ОПТИЧЕСКОГО И РАДИОДИАПАЗОНА В ЦЕЛЯХ АНАЛИЗА АНТРОПОГЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

Антропогенная деятельность сопровождается такими негативными процессами, как обезлесение, эрозия и засоление почвы, изменение береговых линий и т.п. Все это, а также и попадающие в окружающую среду новое поколение загрязняющих веществ, как правило, ведет к появлению серьезных глобальных, региональных и локальных экологических изменений. Учитывая, что комплексная оценка современного состояния ландшафта дельты Волги на основе анализа ДЗЗ и ГИС не проводилась, работа носит актуальный характер. На основе листов топографической карты масштаба 1 : 100 000 дешифрирования снимков оптического и радиодиапазонов в симбиозе с методом распознавательного дешифрирования снимков высокого разрешения информационной системы Google Earth, а также многочисленных маршрутных исследований были проведены выявление, описание и типология модификаций природно-территориальных комплексов центральной части ландшафта дельты Волги. Результаты работы могут быть использованы для формирования управленческих решений в сфере сельского хозяйства, управления государственным имуществом, при организации мероприятий по охране окружающей среды.

*Ключевые слова: ландшафт, дельта Волги, ГИС, ДЗЗ, залежь, антропогенное преобразование.*

**Введение.** Изучение степени антропогенной нагрузки на природные территориальные комплексы (ПТК) до сих пор остается одним из перспективных направлений физико-географических исследований. Моделирование таких сложных систем, какими являются трансформированные человеком геосистемы, а также анализ степени их трансформации, до сих пор является сложной и до конца не решенной задачей. Это подтверждается поднятыми на последних ландшафтных конференциях вопросами теоретической и практической направленности (Тюмень – Тобольск, 2017; Воронеж, 2018; Симферополь, 2018). Исследователи рассматривали приоритетность в ландшафтных исследованиях, среди которых отметили такие темы, как применение ландшафтных индексов в изучении антропогенных воздействий, классификации антропогенных модификаций природных комплексов, ландшафтно-экологическая оценка территорий и др.

Существенная пространственная неоднородность природно-территориальных комплексов, их большая площадь и протяженность при оценке состояния ПТК зачастую не позволяют применять такие традиционные методы, как стационарные исследования, тематическое картирование на местности и т.п. Поэтому как альтернатива таким методам в настоящее время активно применяется дистанционный метод исследования. Следовательно, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время становятся основным источником информации при использовании данного метода.

**Объект исследования.** Объектом данного исследования выступает центральная часть ландшафта дельты Волги, трансформированная в ходе сельскохозяйственного использования. Проведенная ранее работа позволила выделить не только четкие грани-

© Занозин В.В., Бармин А.Н., 2019

цы центральной части дельты реки Волга, но также выявить особенности коренных ПТК и спроектировать ландшафтную карту данного региона масштаба 1 : 100 000 [1]. Общая площадь исследования составила 3 990,6 км$^2$.

**Используемые материалы и алгоритмы исследования.** В работе использовалась большое количество снимков от разных аппаратов: Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat-8, Ресурс-П1, покрывающих полностью или частично район исследования. Общая характеристика данных представлена в таблице. Как видно, основный массив информации представлен данными от аппаратов Sentinel.

Таблица

Общая характеристика данных дистанционного зондирования Земли, используемых в работе

| Аппарат | Даты снимков | Прочие характеристики |
|---|---|---|
| Sentinel 1 | 25.04.2018; 24.06.2018; 23.08.2018; 28.09.2018; 22.10.2018; 31.01.2018; 24.02.2018; 23.08.2018; 04.09.2018; 16.09.2018;27.03.2019; 08.04.2019 | Поляризация: VH и VV<br>Уровень обработки: GHRD |
| Sentinel 2A и 2B | Sentinel 2A: 04.05.2016; 16.06.2016; 25.08.2016; 04.09.2016; 04.10.2016; 29.05.2017; 30.08.2017; 09.10.2017; 16.06.2018; 25.08.2018; 21.09.2018; 11.10.2018;<br>Sentinel 2B: 26.07.2016; 29.04.2018; 29.05.2018; 28.06.2018; 31.07.2018; 08.03.2019; 27.04.2019 | Пространственное разрешение: 10–60 м |
| Landsat-8 | 26.03.2015; 18.07.2016; 28.05.2018; 31.07.2018; 01.09.2018 | Пространственное разрешение: 30 м |
| Ресурс-П1 | 22.08.2018; 10.09.2018 | Съемочное устройство СППИ «Сангур-1У» (панхром, RGB, ближний ИК); пространственное разрешение (панхром) – 0,8 м. |

Космические снимки аппаратов Sentinel-2A и 2B были получены от Европейского космического агентство посредством бесплатного доступа к архиву снимков на портале программы «Коперник» (Open Access Hub. URL: https://scihub.copernicus.eu). Полный цикл предварительной обработки данных Sentinel осуществлялся в свободно распространяемом программном комплексе SNAP. Снимки, полученные со спутников Landsat, были взяты из архива Геологической службы США (USGS, https://earthexplorer.usgs.gov). Использование архивные данные, полученных съемочной аппаратурой высокого разрешения СППИ «Сангур-1У» стало возможным благодаря Разрешению Роскосмоса № 58-9047 от 22.04.2019 г. Полный цикл обработки данных осуществляется в программном комплексе Image Media Center, разрабатываемым ООО «Центр инновационных технологий».

На основе анализа работ, посвященных вопросам оценки нагрузки на ПТК, можно сделать вывод о том, что единой методики расчета и оценки степени антропогенной преобразованности ПТК пока не существует. Однако основными факторами, на которые опираются авторы в своих работах по исследованию антропогенной трансформации геосистем, являются следующие: уровень застройки, площади инфраструктуры, характер использования земли, антропогенное воздействие на гидрологический режим, состояние сельскохозяйственных угодий и т.д. [2-12]. Такие критерии послужили основой для получения исходных тематических данных.

**Результаты и их обсуждение.** Для создания материалов, показывающих характер современного использования сельскохозяйственных угодий возраста залежей в дельте Волги, использовался симбиоз из доступных для работы данных дистанционного зондирования Земли: разновременные снимки аппаратов Sentinel 1, 2A и 2B. Для нагляд-

ности и удобства визуального восприятия данных радиодиапазона были сформированы псевдоцветные RGB-композиты, где красному каналу соответствует изображение в поляризации VV, зеленому каналу — изображение в поляризации VH, синему каналу – частное от деления изображений в поляризации VV и VH. Главный принцип использования оптических снимков – генерация цветового RGB-синтеза разносезонных изображений (R – полученных в начале, G – середине и B – конце вегетационного периода), позволяющий определить характер использования земель. Подсчитано, что на территории центральной части дельты Волги к залежным землям относится 962,85 км$^2$ и лишь 92,5 км$^2$ можно отнести к возделываемым.

Результаты анализа данных радио и оптического диапазона позволили зафиксировать ареалы крупной и мелкой застройки. Их общая площадь (без учета дорог) составила ≈190 км$^2$.

Контроль естественных открытых водных пространств и искусственных водоемов проводился с помощью расчета нормализованного разностного водного индекса, а также модифицированного нормализованного разностного водного индекса на основе данных оптического диапазона.

Анализ объектов добычи полезных ископаемых проводится на основе данных, полученных с российского аппарата «Ресурс-П1». Анализируются преимущественно бэровские бугры по показателям площадей карьеров, образованных в ходе добычи песка и глины.

**Выводы.** Анализ антропогенной преобразованности геосистем, на наш взгляд, должен проводиться сопряженно, с учетом взаимосвязей между компонентами ПТК и факторов трансформации. Комбинированный подход в оценке трансформации геосистем, основанный на синтезе отечественных и западных исследований, может быть применен к ПТК различного иерархического ранга. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время становятся основным источником информации о состоянии антропогенно трансформированных ПТК различного ранга.

**Список литературы**

1. Занозин В.В., Бармин А.Н. Особенности районирования дельтовых ландшафтов // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 3(70). С. 134–142.

2. Экология лесопарковой зоны города / С.А. Двинских, Н.Г. Максимович, К.И. Малеев, О.В. Ларченко; под общ. ред. С.А. Двинских. СПб.: Наука, 2011. 154 с.

3. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. М.; Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.

4. Кулик К.Н., Ткаченко Н.А., Кошелев А.В. Использование ГИС-технологий при оценке антропогенной нагрузки на агроландшафты волгоградского Заволжья // Изв. ОГАУ. 2015. № 2 (52). С. 161–163.

5. Шищенко П.Г., Романчук С.П., Щур Ю.В. Освоение и преобразованность ландшафтов среднего Приднепровья // Антропогенные ландшафты: структура, методы и прикладные аспекты изучения: сб. науч. тр. / под ред. Ф.Н. Милькова. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. С. 42–47.

6. Baiamonte, Giuseppe & Bazan, Giuseppe & M Raimondo, Francesco Land mosaic naturalness evaluation: a proposal for European Landscapes European IALE Conference, Salzburg (Austria), 2009, 07/2009 DOI:10.13140/2.1.1236.4489.

7. Braun A., Hochschild V. A SAR-Based Index for Landscape Changes in African Savannas. Remote Sens. 2017. № 9. 359 p.

8. Carr N.B., Leinwand I.F., Wood D.J.A. A multiscale index of landscape intactness for management of public lands. Ch. 5. P. 55–74 in Carter, S.K., Carr, N.B., Miller, K.H., and Wood, D.J.A., eds., Multiscale guidance and tools for implementing a landscape approach to resource management in the Bureau of Land Management: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1207. 2017. 79 p. URL: https://doi.org/10.3133/ofr20161207.

9. Land use/cover and naturalness changes for watershed environmental management (South-eastern Brazil) / R.T. Costa, C.F. Gonçalves, A.T. Fushita and J.E. dos Santos // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2017. № 5. P. 1–14. URL: https://doi.org/10.4236/gep.2017.511001.

10. Ferrari, Carlo & Pezzi, Giovanna & Diani, L & Corazza, Marcello Evaluating landscape quality with vegetation naturalness maps: An index and some inferences. Applied Vegetation Science, 2009. № 11. P. 243–250. 10.3170/2008-7-18400.

11. Rüdisser, Johannes & Tasser, Erich & Tappeiner, Ulrike Distance to nature–A new biodiversity relevant environmental indicator set at the landscape level. Ecological Indicators. 2012. № 15. P. 208–216. 10.1016/j.ecolind.2011.09.027.

12. Walz Ulrich & Stein Christian Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany. Journal for Nature Conservation. 2014. № 22. P. 279–289. 10.1016/j.jnc.2014.01.007.

УДК 528.88, 630

**С.Т. Им[1, 3], В.И. Харук[2, 3], В.Г. Ли[4]**

[1] Кандидат технических наук, Институт леса им. В.Н. Сукачева
СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Доктор биологических наук, Институт леса им. В.Н. Сукачева
СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[3] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[4] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

# ДИНАМИКА ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СРЕДНЕЙ СИБИРИ В XXI В. И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ

На территорию средней части Сибири проведен анализ динамики сомкнутости хвойных лесов по временной серии карт MOD44B, составленных на основе съемки MODIS за 2000–2016 гг. Рассчитаны карты трендов сомкнутости в темнохвойных и лиственничных древостоях, которые сопоставлены с топографией местности и эколого-климатическими переменными. В целом в начале XXI в. в средней части Сибири наблюдалось падение сомкнутости темнохвойных лесов; в лиственничных древостоях тренд незначим. Уменьшение сомкнутости характерно для сомкнутых древостоев, а рост – для менее сомкнутых лесов. Сомкнутость возросла в темнохвойных древостоях в южной части Сибири (50–56° с.ш.), а уменьшилась в средней части (56–62° с.ш.). Относительно высоты над уровнем моря изменение сомкнутости неоднородно: падала в темнохвойных лесах на высотах ниже 1 600 м над у.м., в лиственничных – ниже 300 м; на других высотах – возрастала. На ~5 % территории лиственничных древостоев и ~7 % темнохвойных динамика сомкнутости связана с эколого-климатическими переменными. В лиственничных древостоях преобладала отрицательная связь ($p < 0{,}05$) с параметрами влажности (количество осадков, индекс сухости SPEI, влажность корнеобитаемого слоя) и положительная – с температурой, а для темнохвойных – наоборот.

*Ключевые слова: Сибирь, MODIS, хвойные древостои, сомкнутость.*

В таежных лесах Сибири наблюдается рост сомкнутости хвойных вечнозеленых лесов [1]. Отмечается распространение темнохвойных древостоев в зону доминирования лиственницы [2], продвижение хвойных на север и вверх по градиенту высоты [3]. Кроме того, в XXI в. в южной части Сибири наблюдается значительный рост площади усохших темнохвойных древостоев в результате деятельности насекомых вредителей, заболеваний и климатических изменений. В связи с этим требуется проведение комплексного анализа наблюдаемых явлений на основе пространственных данных, охватывающих большие территории. Целью данной работы являлся пространственный анализ динамики хвойных лесов средней Сибири в XXI в. в связи с климатическими трендами и орографией местности на основе данных дистанционного зондирования и ГИС.

Объект исследования расположен в Средней Сибири и покрывает территорию более 5,4 млн км$^2$ (80–115° в.д., 48–75° с.ш.). Высота рельефа варьируется от 0 до 270 м над у.м. на равнинных участках левобережья Енисея, до 1 580 м на правобережье и до 4 435 м в горах Алтая. Средние летние температуры варьируются в широких пределах и составляют 8–10 °С на севере до 20 °С на юге, среднегодовые – от –8 до –40 °С, зимние– от –20 до –45 °С. Количество выпадающих за год осадков составляет 200–1 200 мм: летом – 80–250 мм, зимой – 70–120 мм. Хвойные древостои представлены кедром (*Pinus sibirica*), сосной (*Pinus silvestris*), пихтой (*Abies sibirica*), елью (*Picea obovata*) и лиственницей (*Larix gmelinii*). Темнохвойные древостои покрывают 8,7 % (472 тыс. км$^2$), лиственничные – 27,2 % (1 471 тыс. км$^2$).

© Им С.Т., Харук В.И., Ли В.Г., 2019

**Материалы и методы.** В анализе использовались карты проективного покрытия деревьями – продукт MODIS MOD44B (пространственное разрешение ~250 м; 2000–2016 гг.). Из анализа устранены территории гарей в соответствии с продуктом MODIS MCD64A1 (http://modis-fire.umd.edu). Темнохвойные и лиственничные древостои выделились по картам наземного покрова Russia Land Cover 2010 [http://pro-vega.ru] и GLC2000 (https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/ glc2000.php). Производился расчет карт трендов сомкнутости древостоев и карт корреляций между сомкнутостью и климатическими переменными. Эколого-климатические данные извлекались из наборов данных CRU TS 4.02 (https://crudata.uea.ac.uk), SPEI (https://spei.csic.es) и MERRA2 (https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2). Использовалась ЦМР GMTED2010 (http://www.usgs.gov/land-resources/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010). Геообработка производилась в программном пакете ESRI ArcGIS (https://www.arcgis.com).

**Результаты.** Сомкнутость в темнохвойных лесах преимущественно падала, а в лиственничных – возрастала (рис. 1). На 3,2 % территории лиственничных древостоев наблюдались отрицательные тренды сомкнутости ($p < 0{,}05$) и на 15,8% – положительные ($p < 0{,}05$). На 11,4 % площади темнохвойных – отрицательные тренды ($p < 0{,}05$) и на 2,4 % – положительные. Положительные тренды сомкнутости темнохвойных древостоев характерны для южной части анализируемой территории (50–56° с.ш.), а отрицательные – для средней части (56–62° с.ш.) (рисунок).

В целом с 2000 по 2005 г. в темнохвойных лесах сомкнутость возрастала, а после 2005 г. – уменьшалась. В лиственничных лесах общий тренд недостоверен. Возрастание сомкнутости (на ~0,7–0,8 %/год) происходило в древостоях с относительно низкой сомкнутостью, а падение (на ~1,0–1,2 %/год) – в более сомкнутых древостоях. Значительное сокращение площадей темнохвойных древостоев связано со вспышкой массового размножения сибирского шелкопряда в южной части Сибири, начавшейся в 2014 г. Также, это связано с вырубкой лесов, например, в Иркутской области. В Алтае-Саянском регионе гибель темнохвойных лесов инициировано водным стрессом, приведшим к ослаблению древостоев и их последующему усыханию из-за воздействия насекомых вредителей и болезней [5]. Рост сомкнутости в лиственничных древостоях, преимущественно, соответствовал старым гарям, появившемся до 1990 г.

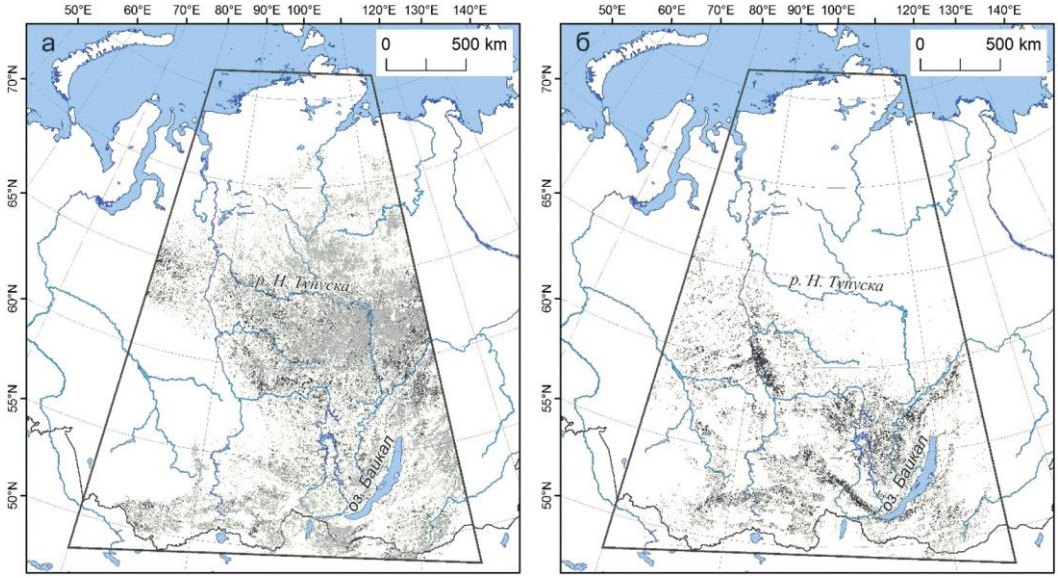



Рисунок. Значимые ($p < 0{,}05$) положительные (серый цвет) и отрицательные (черный цвет) тренды сомкнутости в лиственничных (*а*) и темнохвойных (*б*) древостоях за 2000–2016 гг. по данным MODIS MOD44B VCF. Трапецией показана анализируемая территория

Характер изменения сомкнутости древостоев связан с высотой над уровнем моря. Сомкнутость темнохвойных древостоев уменьшалась на высотах ниже 1 600 м над у.м., а выше – возрастала. Ранее похожая закономерность отмечалась для Алтае-Саянского

региона [5]. Для лиственницы переходной высотой служила отметка высоты в 300 м, выше которой наблюдался рост сомкнутости.

Статистически значимая ($p < 0,05$) корреляция динамики сомкнутости с эколого-климатическими параметрами за летний период наблюдалась для ~5 % лиственничных древостоев и ~7 % темнохвойных. В лиственничных древостоях преобладала отрицательная связь с параметрами влажности (количество осадков, индекс сухости SPEI, влажность корнеобитаемого слоя) и положительная – с температурой, которая характерна для северных территорий (>60° с.ш.). А для темнохвойных – наоборот.

**Заключение.** Анализ данных MODIS MOD44B VCF показал, что в начале XXI в. в средней Сибири в темнохвойных лесах преимущественно наблюдалось падение сомкнутости, а в лиственничных – общий тренд незначим. Рост сомкнутости в темнохвойных древостоях наблюдался в южной части Сибири (50-56° с.ш.), а падение в средней части (56-62° с.ш.). В темнохвойных лесах сомкнутость падала на высотах ниже 1600 м над у.м., в лиственничных – ниже 300 м; на других высотах – возрастала. Выявленная динамика сомкнутости на ~5 % площади лиственничных древостоев и ~7 % темнохвойных вызвана вариацией эколого-климатических переменных за летний период. В лиственничных древостоях преобладала отрицательная связь ($p < 0,05$) с параметрами влажности и положительная – с температурой, а в темнохвойных – наоборот.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-05-00432 и 18-01-00251).*

**Список литературы**

1. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus / Y. He, J. Huang, H.H. Shugart, X. Guan // Journal of Climate. 2017. Vol. 30 (13). P. 5021–5039.

2. Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // Eurasian Journal of Forest Research. 2007. Vol. 10. P. 163–171.

3. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S.G. Shiyatov, M.M. Terent'ev, V.V. Fomin, N.E. Zimmermann // Russian Journal of Ecology. 2007. Vol. 38, № 4. P. 223–227.

4. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A. Warming hiatus and evergreen conifers in Altay-Sayan Region, Siberia // Journal of Mountain Science. 2018. Vol. 15 (12). P. 2579–2589.

УДК 504.3.054

**Е.В. Карнаухова[1], Ю.Я. Симкин[2]**
[1] Студент, [2] Кандидат технических наук
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Россия
e-mail: karnaukhova-elizaveta@mail.ru, simkinyurii51@mail.ru

# СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРОД САЯНОГОРСК

В муниципальном образовании город Саяногорск Республики Хакасия сосредоточены крупнейшие промышленные объекты России, такие как Саяно-Шушенская ГЭС, Саяногорский и Хакасский алюминиевые заводы. Из расположенной вблизи города Саяногорска промышленной зоны в атмосферу поступают выбросы алюминиевых заводов и других предприятий. В самом городе доля проб атмосферного воздуха с превышением $ПДК_{с.с}$ по канцерогенному веществу – бенз(а)пирену, составляет более 45 %. Задачу исследования – изучить влияние газовых выбросов промышленных предприятий на воздушную обстановку муниципального образования, выявить динамику загрязнения воздуха; предложить мероприятия по улучшению экологии воздушного бассейна.

*Ключевые слова: воздушная среда, загрязнения, выбросы, бенз(а)пирен.*

**Введение.** Одним из лидеров экономики Республики Хакасия является муниципальное образование город Саяногорск (далее – МО город Саяногорск). После МО город Черногорск и МО город Абакан это третье в республике по численности населения муниципальное образование. В составе территории находятся: город Саяногорск – 47 358 жителей, посёлок городского типа Черемушки – 8 113 жителей, посёлок городского типа Майна – 4 846 жителей, деревня Богословка – 0 жителей; всего – 60 317 человек [1;2]. Доля МО город Саяногорск в общем объёме отгруженных товаров, выполненных работ и услуг в Республике Хакасия стабильно превышает 50 % [3]. Число действующих хозяйствующих субъектов этого муниципального образования по состоянию на 01.01.2019 составляет 2 364, среди которых находятся такие гиганты индустрии как крупнейшая гидроэлектростанция России Саяно-Шушенская ГЭС, а также Саяногорский и Хакасский алюминиевые заводы, «Холдинг МКК-Саянмрамор, ООО». На реке Енисей действует совместно с Саяно-Шушенской ГЭС низконапорная русловая гидроэлектростанция Майнская ГЭС. Выбросы загрязнений в атмосферу на территории МО город Саяногорск в 2018 г. составили 63 363 т [4].

Учитывая величину и мощности промышленных объектов, сосредоточенных на достаточно ограниченной площади муниципального образования, целью работы было изучить влияние этих объектов на состояние атмосферного воздуха его территории, выявить источники загрязнений, оценить экологический уровень загрязнения атмосферы, разработать предложения по улучшению экологии воздушного бассейна города.

Основными источниками загрязнений атмосферы в населённых пунктах являются алюминиевые заводы, котельные и транспортные средства.

В посёлке Черемушки действуют две электрокотельные без выбросов в атмосферу. В посёлке Майна поступают выбросы в атмосферу от небольшой котельной, работающей на каменном угле. Поскольку поблизости этих посёлков нет крупных промышленных источников выбросов, количество транспортных средств невелико и там проживает немногочисленное население (в деревне Богословка его нет), постоянный мониторинг за состоянием воздушной среды на этих территориях не проводится.

© Карнаухова Е.В., Симкин Ю.Я., 2019

Наибольшему влиянию загрязняющих веществ подвержен город Саяногорск, в 14 км от которого находится промплощадка. На её территории размещены ОАО «РУСАЛ Саяногорский алюминиевый завод», ООО «Хакасский алюминиевый завод», ООО «Саяногорский вагоноремонтный завод», филиал ООО «РУС-Инжиниринг» в г. Саяногорске, ОАО «РУСАЛ САЯНАЛ». Размер промплощадки составляет около 840 га.

Наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в жилом районе города Саяногорска проводятся ФГБУ «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» на одном стационарном посту шесть раз в неделю.

Наибольшего влияния на состояние атмосферного воздуха в городе можно было ожидать от деятельности крупных источников выбросов в атмосферу Саяногорского и Хакасского алюминиевых заводов. Вместе с тем, алюминий на этих заводах получают в электролизерах с обожженными анодами, практически не выделяющими при эксплуатации паров смоляных веществ. Выделяющиеся в процессе электролиза газообразные вредные вещества, улавливаются укрытиями электролизёров с эффективностью 98 %. В производстве электродов на установках «сухой» очистки удаляются вредные вещества, в том числе смолы, содержащие бенз(а)пирен, с эффективностью 98,5–99,5 % [6]. В технологии алюминия используется чистая возобновляемая электроэнергия, вырабатываемая Саяно-Шушенской ГЭС. Все эти мероприятия, а также постоянное усовершенствование систем очистки отходящих газов электролиза позволяют на минимизировать содержание в них вредных примесей. Так, анализы проб атмосферного воздуха на территории этих предприятий на содержание бенз(а)пирена (чрезвычайно опасного вещества первого класса опасности), не обнаруживают превышений средне суточного ПДК с.с.

Максимально-разовые концентрации в атмосферном воздухе города Саяногорска пыли, диоксида серы, диоксида азота, оксида азота, сероводорода, фенола, формальдегида обычно не превышают ПДК м.р. [7]. Максимально – разовые концентрации твердых фторидов близки к фоновым и составляют 0,05 ПДК м.р., фторида водорода 0,3–0,5 ПДК м.р., что свидетельствует о достаточно умеренном влиянии выбросов алюминиевых заводов на экологическую обстановку города.

Вместе с тем, в городе, доля проб атмосферного воздуха с превышением ПДК с.с. по бенз(а)пирену после резкого снижения в 2015 г. в последние четыре года увеличилась до 45,5 % [4, 8, 9] (рисунок).

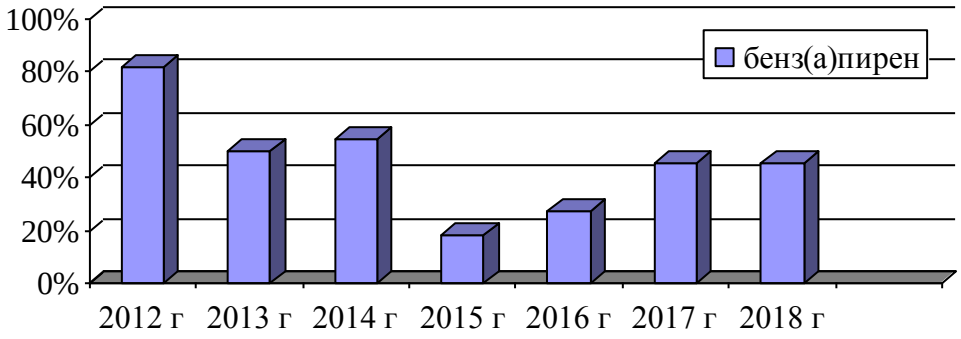



Рисунок. Динамика изменений доли проб бенз(а)пирена в атмосферном воздухе в города Саяногорска в 2012–2018 гг.

Также в 2012–2018 гг. отмечаются отдельные превышения ПДК с.с. по оксиду углерода с долей проб менее 1,2 %. Изменения стандартного индекса (СИ) по бенз(а)пирену в последние три года: в 2016 г. – 2,6; в 2017 г. – 6,9, в 2018 г. – 7,1, выявляют рост максимальных значений отдельных выбросов по превышению ПДК м.р.

Необходимо отметить, что повышенные концентрации бенз(а)пирена и оксида углерода в отходящих газах котельных и в выхлопных газах автомобилей появляются при неполном сгорании топлива. В городе действуют 443 стационарных источников выбросов в атмосферу, в числе которых 15 предприятий и две городские котельные, работающие на каменном угле, а также зарегистрировано 15 532 передвижных источников выбросов (автотранспорт, строительная техника и др.) [4].

Изменения показателей загрязнения воздуха в городе за последние три – четыре года свидетельствуют о тенденции к ухудшению экологической обстановки в атмосфере города. В связи с этим комплексный показатель уровня загрязнения атмосферы ИЗА5, рассчитанный для города по пяти приоритетным загрязняющим веществам, из «низкого» – при ИЗА5 <4 в 2017 г., перешёл в разряд «повышенный» – при ИЗА5 > 5 в 2018 г. [4].

**Заключение.** Промышленные предприятия промплощадки оказывают умеренное влияние на состояние воздушной среды города Саяногорска.

В атмосферном воздухе города растёт частота превышений ПДК с.с. по бенз(а)пирену, увеличивается величина превышений ПДК м.р. отдельных проб.

Для поддержания в городе удовлетворительного состояния атмосферного воздуха необходимо:

- выполнить ревизию всех городских стационарных источников вредных выбросов;
- организовать на котельных города устойчивый процесс полного сжигания топлива, снабдить их эффективными системами газоочистки;
- ввести постоянный контроль за состоянием отходящих газов котельных и выхлопных газов передвижных транспортных средств.

**Список литературы**

1. Общая информация. Официальный сайт муниципального образования город Саяногорск. URL: / http://sayan-adm.ru/2/o-gorode/obshhaya-informaciya.html (дата обращения: 27.06.2019).

2. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2018 года. Федеральная служба государственной статистики. URL: http://www.gks.ru.

3. Сведения об основных социально-экономических показателях муниципального образования город Саяногорск за 1 квартал 2019 года / Администрация муниципального образования г. Саяногорск [Электронный ресурс]. URL: http://sayan-adm.ru/assets/files/economy/inf-2019/sved-19.docx (дата обращения: 27.06.2019).

4. О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2018 году: гос. докл. Абакан, 2019. 216 с.

6. На Саяногорском алюминиевом заводе запущено новое газоочистное оборудование. URL: http://www.infogeo.ru/metalls/news/?act=show&news=4869 (дата обращения: 27.06.2019).

7. Состояние загрязнения атмосферного воздуха. URL: http://sayan-adm.ru/14/obshhestvennyj-ekologicheskij-sovet/ekologicheskie-pokazateli/sostoyanie-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduha.html.

8. О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2017 году: гос. Докл. Абакан, 2018. 242 с.

9. О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2014 году: гос. докл. Абакан, 2015. 214 с.

УДК 528.28, 550.34, 551.51

**В.Б. Кашкин[1], Р.В. Одинцов[1], Т.В. Рублева[1,a], К.В. Симонов[2,b], Ю.А. Цуп[1]**

[1] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: [a] tvrubleva@mail.ru, [b] simonovkv@icm.krasn.ru

# РЕАКЦИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СУЛАВЕССКОГО ФЕНОМЕНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

По спутниковым данным ATOVS (КА NOAA/POES) изучались атмосферные возмущения, возникшие в экваториальной зоне Индонезии осенью 2018 г. как реакция на геофизические проявления геодинамической активности сильного землетрясения с магнитудой $M$ = 7,5. Сформирован архив спутниковой информации. Разработана методика анализа температуры профилей во время сильной сейсмической активности Сулавесского феномена. Изучены атмосферные эффекты над сейсмоактивным районом этого землетрясения. Обнаружено, что в тропосфере в исследуемый период над эпицентральной областью Индонезийского землетрясения наблюдаются аномалии с пониженными температурами, в нижней стратосфере образуются тепловые аномалии с повышенными температурами.

*Ключевые слова: космический мониторинг, спутниковые данные, сейсмические процессы, землетрясения, атмосфера, температурные аномалии.*

**Введение.** За последние годы с помощью космического мониторинга были получены новые данные, позволяющие анализировать аномальные атмосферные явления, наблюдающиеся в возмущенных условиях на различных этапах сейсмических процессов [1, 2]. Это атмосферные эффекты в виде возмущений параметров метеорологических полей и температурных аномалий над зонами разломов земной коры [3, 4]. В [5] показано, что в этих зонах под воздействием экзогенных или эндогенных факторов возникают добавочные напряжения, нарушается сплошность геосреды, и происходят существенные изменения геофизических полей. В [4] указывается, что подвижки земной коры возбуждают внутренние гравитационные волны в атмосфере. В связи с этим актуальным становится исследование взаимосвязи сильных землетрясений и атмосферной динамики в различных сейсмически активных регионах.

В качестве объекта исследования выбран сейсмоактивный район в Юго-Восточной Азии, который находится в зоне взаимодействия четырех тектонических плит: **Австралийской**, **Тихоокеанской**, **Филиппинской** и **Зондской** [6]. 28 сентября 2018 г. на о. Сулавеси (Индонезия) произошло семь сейсмособытий с магнитудами $5{,}8 \le M \le 7{,}5$ и глубинами очагов 10–20 км. Наиболее сильное из них с $M$ = 7,5, зарегистрированное в 10:02:45 UTC, возникло на глубине 10 км и вызвано подвижками земной коры вдоль разлома Палу-Коро (Palu-Koro Fault) [7]. Координаты эпицентра этого землетрясения составили 0,256° ю.ш и 119,846° в.д. Размеры очаговой области – 200 × 20 км. С учетом данных USGS [6] в данной работе получены оценки показателей сейсмического процесса для афтершокового поля этого сильного землетрясения, где зафиксировано с 21 сентября по 4 октября более 50 сейсмособытий с магнитудами $4{,}3 \le M \le 7{,}5$.

Хронология геофизических событий 28 сентября показывает, что через 7–12 мин после землетрясения с $M$ = 7,5 на побережье о. Сулавеси обрушились первые волны

© Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Симонов К.В., 2019

цунами [7]. Было зарегистрировано две волны с интервалами 5 и 10 мин. Вдоль побережья острова высота волны варьировалась от 1,5 до 2 м. В заливе Палу, ставшим «воронкой» для волн, их высота заплеска изменялась от 6 до 10 м.

Спустя 4 дня, 2 октября в 22:46 UTC, зарегистрирован рост амплитуд сейсмосигналов в северо-восточной части о. Сулавеси в районе стратовулкана Сопутан с координатами 1°108' с.ш. и 124°73' в.д. [8]. Извержение данного вулкана произошло 3 октября в 08:44 UTC. Индекс его вулканической активности VEI (Volcanic Explosivity Index), используемый для оценки воздействия извержений на атмосферу, равен 3. По сейсмической информации данное геофизическое событие длилось 6 мин. В результате извержения образовался пепловый шлейф, поднявшийся до высоты 5,8 км (над уровнем моря) и смещающийся в направлении на запад и северо-запад. На спутниковых изображениях в районе стратовулкана Сопутан наблюдалась тепловая аномалия.

Взаимосвязанность вышерассмотренных природных катаклизмов позволила ввести для характеристики этих геофизических событий термин Сулавесский феномен. В результате анализа развития сейсмических процессов, проведенного по данным каталога USGS [6], был определен временной интервал активного существования Сулавесского феномена (с 21сентября по 4 октября).

В настоящей работе детально изучались данные космического мониторинга, полученные с помощью комплекса приборов ATOVS, о реакции атмосферы в экваториальной зоне Индонезии осенью 2018 г. на геофизические проявления геодинамической активности сильного землетрясения с $M = 7{,}5$.

**Спутниковые данные и методика исследований.** Аппаратура ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, КА NOAA/POES) предназначена для восстановления полей метеопараметров атмосферы на разных высотах [9]. Комплекс приборов ATOVS измеряет интенсивность собственного излучения Земли в отдельных полосах поглощения газов в ИК и радиодиапазонах. Полоса обзора аппаратуры ATOVS составляет 2 250 км. Пространственное разрешение по горизонтали 20–50 км и по вертикали 2–3 км. Стандартное отклонение температурных данных ATOVS от показаний радиозондов составляет 1,3 К.

Сформирован архив спутниковой информации, который содержал значения температуры на изобарических поверхностях $1\,000 \le p \le 100$ гПа. На основе методики анализа вертикальных температурных профилей, описанной в [10], нами исследовались над районом исследования вариации температуры и давления в возмущенной атмосфере от приземного слоя (~0,5 км) до нижней стратосферы (~16 км). При стандартной обработке спутниковой информации ATOVS получены вертикальные профили температуры, которые отражают равномерный температурный режим экваториальной зоны Индонезии.

С помощью корреляционного анализа, позволяющего оценить над эпицентральной областью сильнейшего землетрясения согласованные изменения температуры на определенных изобарических поверхностях, рассчитывался коэффициент корреляции $R$ между этими температурными рядами. Анализ полученных результатов показал, что в возмущенной атмосфере на изобарических уровнях от 1 000 до 100 гПа значения R варьировались в диапазоне от 0,89 до –0,80.

Обнаружено, что во время сейсмической активности в экваториальной зоне Индонезии коэффициент корреляции между температурными рядами на уровнях 1 000–250 гПа положительный, т.е. вариации температуры в тропосфере (реакции на воздействие геофизических факторов) происходят согласованно. Значения коэффициента $R$ между температурными рядами в верхней тропосфере и нижней стратосфере отрицательные, данный результат согласуется с выводами из работы [10].

Ранее были выполнены исследования [1, 11] по изучению тепловых аномалий, сопровождающих сейсмические процессы. Для их обнаружения по данным дистанцион-

ного зондирования используется метод определения индекса аномальности температуры, рассмотренный в работе [12].

**Атмосферные возмущения во время сильного землетрясения с *M* = 7,5.** В нашей работе выявлялись возмущения в температурном поле над исследуемым сейсмоактивным районом и рассчитывался модифицированный индекс аномальности $\delta T$ для температурных рядов на наиболее информативных изобарических уровнях с учетом момента возникновения сильнейшего землетрясения и исследуемого временного интервала.

Эти уровни выбирались по максимальному коэффициенту корреляции $R_{max}$. Между температурными рядами $T_{950}$ на уровне 950 гПа и $T_{350}$ на уровне 350 гПа $R'_{max} = 0{,}56$. Между температурными рядами $T_{250}$ на уровне 250 гПа и $T_{100}$ на уровне 100 гПа $R'_{max} = -0{,}8$. В качестве фоновых значений были выбраны профили температуры над эпицентральной областью землетрясения с $M = 7{,}5$ для 9 ч, времени наиболее близкому к моменту основного подземного толчка, и за период с 21 сентября по 4 октября в 2017 г.

График изменения рассчитанного индекса $\delta T$ для временного интервала активного существования Сулавесского феномена на изобарических поверхностях 950 и 350 гПа приведен на рис. 1. Стрелкой обозначена дата Индонезийского землетрясения.

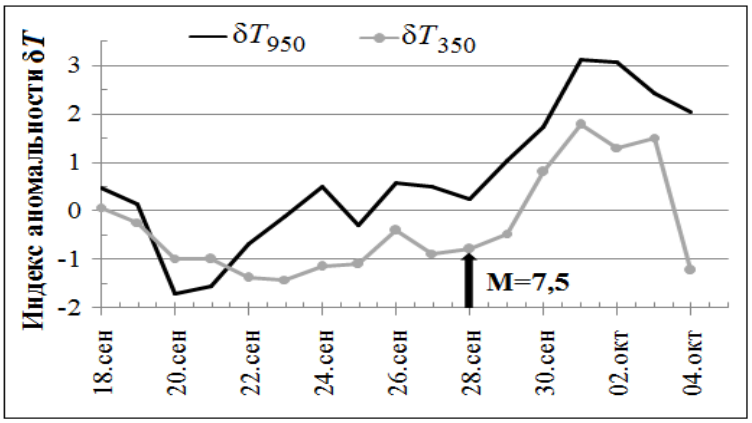



Рис. 1. Вариации индекса $\delta T$ на изобарических поверхностях 950 и 350 гПа

Как видно на рис. 1, понижение индекса $\delta T$ на уровне 950 гПа ($\delta T_{950}$) в приземном слое атмосферы на высоте ~0,5 км произошло 20 сентября, за 8 дней до основного толчка сильнейшего Индонезийского землетрясения. Индекс $\delta T$ на уровне 350 гПа ($\delta T_{350}$), в атмосферном слое на высоте ~8 км, уменьшился через 2 суток, 22 сентября. Согласованное повышение индексов $\delta T_{950}$ и $\delta T_{350}$ наблюдается после землетрясения с $M = 7{,}5$. Параметры $\delta T_{950}$ и $\delta T_{350}$ достигают своих максимальных значений только к 1 октября. Коэффициент корреляции между рядами $\delta T_{950}$ и $\delta T_{350}$ равен 0,78.

На рис. 2 показан график изменения рассчитанного индекса аномальности $\delta T$ для исследуемого временного интервала на изобарических уровнях 250 и 100 гПа. Стрелкой показана дата землетрясения с $M = 7{,}5$.

Из рис. 2 видно, что индекс $\delta T$ на уровне 250 гПа ($\delta T_{250}$) в слое атмосферы на высоте ~10 км снизился после 20 сентября, за 8 дней до основного момента сильнейшего землетрясения. Индекс $\delta T$ на уровне 100 гПа ($\delta T_{100}$), в атмосферном слое на высоте ~16 км, увеличился также после 20 сентября. Уменьшение индекса $\delta T_{100}$ наблюдается 27 сентября, за сутки до землетрясения с $M = 7{,}5$. Повышение индекса $\delta T_{250}$ происходит к 1 октября. Коэффициент корреляции между рядами $\delta T_{250}$ и $\delta T_{100}$ равен –0,67.

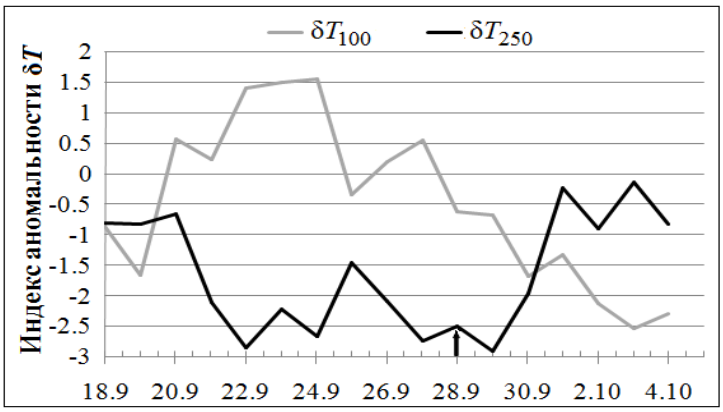


Рис. 2. Вариации индекса $\delta T$ на изобарических поверхностях 250 и 100 гПа

**Заключение.** Полученные результаты показали, что применение разработанной методики анализа атмосферных возмущений во время сейсмической активности позволяют выявить температурные аномалии в экваториальной зоне. Обнаружено, что в тропосфере над эпицентральной областью Индонезийского землетрясения с $M = 7{,}5$ наблюдаются аномалии с пониженными значениями температуры, в нижней стратосфере в исследуемый период образуются тепловые аномалии с повышенными значениями температуры.

**Список литературы**

1. Molchanov O.A., Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results. Tokyo: TERRAPUB, 2008. 189 p.

2. Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). М.: ИФЗ РАН, 2018. 390 с.

3. Единая концепция обнаружения признаков подготовки сильного землетрясения в комплексной системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера-Магнитосфера / С.А. Пулинец, Д.П. Узунов, А.В. Карелин [и др.] // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 6. С. 81–90.

4. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 908–916.

5. Спивак А.А. Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. 2010. № 4. С. 55−66.

6. USGS. URL: https://earthquake.usgs.gov.

7. The Palu-Koro fault ruptures in a $M = 7.5$ quake in Sulawesi, Indonesia, triggering a tsunami and likely more shocks / J.R. Patton, S. Toda, R. Stein, V. Sevilgen. URL: http: //temblor.net/earthquake-insights/the-palu-koro-fault-ruptures-in-a-m7-5-quake-in-sulawesi-in.

8. Global Volcanism Program. Smithsonian Institution. URL: http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=266030.

9. Goodrum G., Kidwell K., Winston W. NOAA KLM user's guide. National Ocean and Atmosphere Administration. URL: http://www2. ncdc.noaa.gov/docs/klm/.

10. Kashkin V.B., Rubleva T.V., Odintsov R.V. Abnormal Geophysical Events in the Northern Hemisphere in 2010 and 2011 // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2018. Vol. 11, № 8. P. 982–988.

11. Anomalous land surface temperature and outgoing long-wave radiation observations prior earthquakes in India and Romania / V. Rawat, A.K. Saraf, K. Sharma, Y. Shujat // Nat. Hazards. 2011. Vol. 59. P. 33–46.

12. Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды / Ю.И. Шокин, Н.Н. Добрецов, Е.А. Мамаш [и др.] // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 5. С. 157–174.

УДК 556.131.11

**В.Г. Коновалов[1], В.А. Рудаков[2], О.Ю. Калашникова[3], A. Gafurov[4], W. Hagg[5]**

[1] Доктор географических наук, Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: vladgeo@gmail.com

[2] Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: rudakov45@yandex.ru

[3] Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Киргизия, e-mail: o.kalashnikova@caiag .kg

[4] PhD, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, e-mail: abror.gafurov@gfz-potsdam.de

[5] PhD, Department of Geography, Ludwig-Maximilians-University, Munich, Germany, e-mail: hagg@lmu.de

# РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ СТОКА РЕК СНЕГОВО-ЛЕДНИКОВОГО ТИПА ПИТАНИЯ

На примере бассейнов рек снегово-ледникового типа формирования стока, расположенных на Северном Кавказе, Алтае, Тянь-Шане и Памире рассмотрены: а) вопросы расчета суммарного таяния совокупностей ледников; б) дистанционное определение площади заснеженности речных бассейнов и использование данных, полученных со спутника MODIS для сезонных прогнозов стока. Методы исследования: сравнительный анализ данных в каталогах ледников, корреляционный и регрессионный анализ, применение компонентов ГИС. Результаты: региональные оценки изменения составляющих водного баланса.

*Ключевые слова: спутниковый мониторинг, сокращение оледенение, заснеженность, расчет и прогноз стока.*

**Постановка задачи, исходные данные.** В континентальных бассейнах рек Евразии с развитым современным оледенением многолетняя динамика сезонных и месячных водных ресурсов в течение апреля – сентября определяется в основном двумя независимыми процессами в области формирования стока: выпадением и таянием снега, таянием многолетнего льда и фирна на площади оледенения и суммарных результатов этих процессов в виде объемов $W_{sn}$ – снегового и $W_{gl}$ – ледникового стока. В общем виде каждый из объемов равен определенному интегралу произведения двух произвольных положительных функций $f(x)$ и $g(x)$, где $f(x)$ – интенсивность процесса $x$ в пункте $g$. Пределы интегрирования соответствуют минимальному и максимальному значениям $g(x)$, т.е.

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c)\int_a^b g(x)dx, \qquad (1)$$

где $c$ содержится в $[a, b]$. В одномерном случае $f(x)$ символизирует пространственное распределение слоя заданной переменной в виде функции высоты $Z$, $f(c)$ – значение этой переменной на некоторой высоте в интервале $[a, b]$ или между минимальной и максимальной высотами $Z_{max} - Z_{min}$, а определенный интеграл функции $g(x)$ соответствует площади, на которой вычисляется объемы снегового и ледникового стока. В качестве распространенного первого приближения $f(c)$ в гляциологических расчетах применяется средняя взвешенная $\check{Z}_{gl}$ или медианная $\dot{Z}_{gl}$ высоты ледников, т.е. $f(c) \sim f(\check{Z}_{gl})$ или $f(c) \sim (\dot{Z}_{gl})$. Первая задача работы направлена на совершенствование методов определения функции $f(c)$. Другие две задачи посвящены оценкам многолетнего изменения

© Коновалов В.Г., Рудаков В.А., Калашникова О.Ю., Gafurov A., Hagg W., 2019

морфометрических параметров оледенения и определениям внутригодового хода доли заснеженности речного бассейна для прогнозов сезонных и месячных прогнозов стока.

В нашем исследовании принято, что высотно-площадные параметры совокупностей ледников в отдельных речных бассейнах Северного Кавказа, Алтая и Центрального Тянь-Шаня в Каталогах [1–3] обобщенно относятся к середине 1946–1975 гг., а в справочнике [4] для тех же речных бассейнов к середине 1976–2005 гг.

Основной источник гидрометеорологических данных – база данных ВНИИГМИ МЦД Росгидромета [5–6] и публикации [7–9].

Ежедневные изображения заснеженности речных бассейнов, получаемые со спутников MODIS Terra и Aqua (MOD10A и MYD10A, версия V005) с пространственным разрешением 500 м, находятся на сайте Центра данных NSIDC (National Snow and Ice Data Center, USA). Снежный покров на снимках MODIS доступен в формате HDF и располагается на сайте в градусной сетке размером 100 на 100. Градусная сетка h22v04, h22v05, h23v04 и h23v05 полностью охватывают водосборы верховьев Амударьи и Сырдарьи в Центральной Азии.

**Вопросы методики расчетов ледникового стока.** Для расчетов $M$ – интенсивности таяния льда/снега в условиях ограниченности климатической информации – часто используется формула $M = M(T)$ с параметрами, изменяющимися в пространстве и времени. Здесь $T$ – средняя температура воздуха за характерные интервалы времени (сутки, декада, месяц, сезон). Новые эмпирические формулы вида $M = a / (b + T)$ на основе репрезентативных выборок $M$ и $T$ были получены и успешно использованы при моделировании ледникового стока в бассейнах рек Алтая, Тянь-Шаня и на северном склоне Заилийского Алатау. Параметры $a$ и $b$ определены отдельно для каждого региона. Результаты расчета многолетних изменений объема ледникового стока в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая, помимо качества морфометрических параметров в [1–3], в немалой степени зависят от надежности сведений о ледниках в справочнике [4]. При обновлении каталога ледников Большого Нарына [10] по изображениям со спутников LANDSAT и SPOT относительная ошибка определения площади находилась в пределах от –6 до 8 %.

Путем сравнения площади $F_{gl}$, числа $N_{gl}$ и параметров распределения (асимметрия, эксцесс, среднее, среднеквадратичное отклонение, минимум, максимум, медиана) высотных характеристик ледников для их совокупностей в 1946–1975 гг. и 1976–2005 гг. получены оценки динамики оледенения бассейнах рек Северного Кавказа, Памира и Алтая

Снеговая граница и площадь заснеженности. В бассейнах рек снегово-ледникового типа формирования стока пространственно-временное изменение площади заснеженности $F_{snow}$ и минимальной высоты $Z_{ssb}$ нулевого баланса аккумуляции $Ac$ и абляции $Ab$ снега $B(Z) = Ac(Z) - Ab(Z) = 0$ связаны однозначно интегральной функцией одномерного распределения «площадь – высота» $F_{bas} = f(Z)$. Так, если вместо $Z$ подставить $Z_{ssb}$, получим $F_{snow}$. Площадь $F_{snow}$ необходима при определении сезонных запасов снега по общей формуле (1). В одном случае путем применения эмпирических формул $P = P(Z)$, $M = M(T)$ или $M = M(B_s,T)$, находим $F(1)_{snow}$ как диапазон высоты, в котором, начиная с $Z_{ssb}$, выполняется условие $B(Z) > 0$. При этом предполагается, что выше $Z_{ssb}$ бассейн полностью покрыт снегом. В другом – $F(2)_{snow}$ определяется в результате обработки дистанционных изображений заснеженности речных бассейнов [11]. Очевидно, что $F(1)_{snow} \neq F(2)_{snow}$.

Определение площади снежного покрова. Для расчета площади снежного покрова в речных бассейнах использованы снимки со спутника MODIS, обработанные в программе MODSNOW-Tool, позволяющей удалять облачный покров в заданном районе [12, 11]. Программа имеет несколько модулей, которые в автоматическом режиме скачивают данные MODIS с сервера NSIDC (National Snow and Ice Data Center), соединяют

и преобразуют оригинальные данные в формат GeoTIFF, выделяют водосбор и создают для него карты снежного покрова на текущую дату после удаления облачности. Точность удаления облаков в программе MODSNOW-Tool составляет 94% [11,13], точность данных о снежном покрове со спутниковых снимков MODIS в сравнении с наземными данными наблюдений за высотой снега составляют 93% для Центральной Азии [11, 13].

В программе MODSNOW-Tool реализован алгоритм удаления облачного покрова, предложенный в работах [12, 11, 13] с включением дополнительных новых процедур по использованию данных наблюдений за снежным покровом на метеостанциях. В итоге с помощью снимков со спутника MODIS и программы MODSNOW-Tool, были получены за 2000–2015 гг. ежедневные данные о площади снежного покрова в бассейне реки Нарын до створа плотины Токтогульской ГЭС. На рисунке представлен внутригодовой ход площади заснеженности Нарына в многоводный, маловодный и средний по водности годы (см. рисунок).

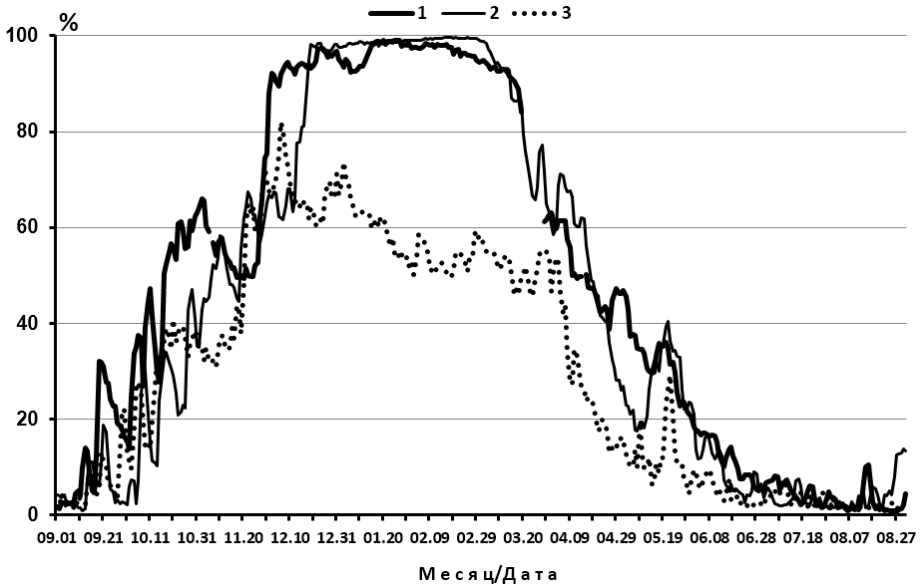



Рисунок. Относительная площадь снежного покрова в бассейне Нарына
в различные по водности годы: *1* – многоводный; *2* – средний по водности; *3* – маловодный

Определение относительной площади заснеженности по снимкам со спутника MODIS систематически применяется [14] на территории ряда речных бассейнов Сибири при прогнозировании уровней и расходов воды в реках. При этом используется отличающийся от описанного выше способ устранения влияния облачности.

**Прогноз стока Нарына с использованием спутниковой информации.** Для прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище и стока рек в бассейне Нарына на вегетационный период и на период май – сентябрь использована ежедневная информация о площади снежного покрова, рассчитанная в программе MODSNOW-Tool (см. рисунок) и средние расходы воды на гидропостах за предшествующий месяц. Сводный коэффициент корреляции уравнений множественной линейной регрессии составил 0,73–0,92 (для периода май – сентябрь) и 0,60 – 0,76 (для периода апрель – сентябрь), критерий качества прогнозов $S/\sigma$ находится в интервале 0,39–0,68 (для периода май – сентябрь) и 0,65–0,80 (для периода апрель – сентябрь). Оправдываемость прогнозов

за 2000–2015 гг. составила для периода май – сентябрь 75–88 %. Надежность прогноза стока на май-сентябрь оказалась больше, чем на апрель – сентябрь, что связано с большим таянием сезонного снежного покрова начиная с мая, тогда как в апреле в горах Тянь-Шаня часто еще продолжается накопление снежного покрова.

**Выводы**

1. Сокращение площади оледенения в 1946–2005 гг., которое привело к уменьшению объема ледникового стока, вполне согласуется с однообразной тенденцией роста средних взвешенных максимальной $\hat{Z}_{max}$, минимальной $\hat{Z}_{min}$, и средней $\hat{Z}_{mean}$ высот ледников в бассейнах рек Северного Кавказа, Катунь и Гунт.

2. Надежными, отвечающими тенденции сокращения площади оледенения на Памире, Алтае и Северном Кавказе, и пригодными для гидрологических расчетов, служат средние взвешенные высоты $\hat{Z}_{max}$, $\hat{Z}_{min}$, $\hat{Z}_{mean}$ совокупностей ледников. Для интервала времени 1946–1975 гг. они были получены из [1–3], а для 1976–2005 гг. в результате мониторинга колебаний размеров ледников со спутников TERRA И LANDSAT+ [4]. Эксцесс, асимметрия, среднее и медиана распределений $F_{gl}$ в [1–3] и [4] указывают на преобладание числа ледников с площадью <0,5 км$^2$.

3. Результаты применения новой технология определения площади заснеженности по данным спутника MODIS оказались приемлемыми для использования в прогнозах сезонного стока рек на территории Евразии.

**Список литературы**

1. Каталог ледников СССР. Т. 14, вып. 1, ч. 4–5. Л.: Гидрометеоиздат, 1973,1978.

2. Каталог ледников СССР. Т. 15, вып. 1, ч. 4–7. Л.: Гидрометеоиздат, 1978.

3. Каталог ледников СССР. Т. 8, ч. 3, 5–7, 11. Л.: Гидрометеоиздат, 1967, 1970, 1973, 1977.

4. RGI Consortium, 2017, Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. Digital Media. DOI: https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60.

5. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе на метеостанциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. http://meteo.ru/data.

6. Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia temperature and precipitation data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. URL: http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/index.html.

7. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for Russia. URL:http://www.R-Arctic NET.sr.unh.edu.

8. Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July, 2000.

9. Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis // Environ. Res. Letter, 2009. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045015

10. Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan, Glob. Planet. Change / W. Hagg, C. Mayer, A. Lambrecht [et al.] 2012. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.010.

11. Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia / A. Gafurov, D. Kriegel, S. Vorogushyn, B. Merz // Hydrology Research, 2013. № 44. P. 506–522. DOI: 10.2166/nh.2012.094.

12. Gafurov A., Bárdossy A. Cloud removal methodology from MODIS snow cover products // Hydrology and Earth System Sciences, 2009. P. 1361–1373.

13. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data / A. Gafurov, S. Lüdtke, K. Unger-Shayesteh [et al.] // Environmental Earth Science. 2016. № 75. P. 1078.

14. Ромасько В.Ю. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

УДК 550.384.3

**В.А. Кочнев**

Доктор технических наук, Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: kochnev@icm.krasn.ru

# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

В настоящее время вопрос изменения глобального магнитного поля Земли остается без однозначно принятого решения. Данная работа рассматривает движение ядра Земли, обладающего асимметрией магнитного поля, относительно ее поверхности как возможный источник этих изменений. На основании наблюдений и моделирования изменений магнитного поля Земли сделан вывод о существовании периода локальных инверсий приблизительно в 2000 лет, соответствующий периоду вращения ядра относительно литосферы Земли.

*Ключевые слова: магнитное поле Земли, инверсия магнитного поля, генерация магнитного поля.*

В настоящее время вопрос изменения глобального магнитного поля (МП) Земли остается без однозначно принятого решения. Данная работа рассматривает возможность обусловленности изменения МП Земли за счет вращения ядра Земли относительно ее поверхности.

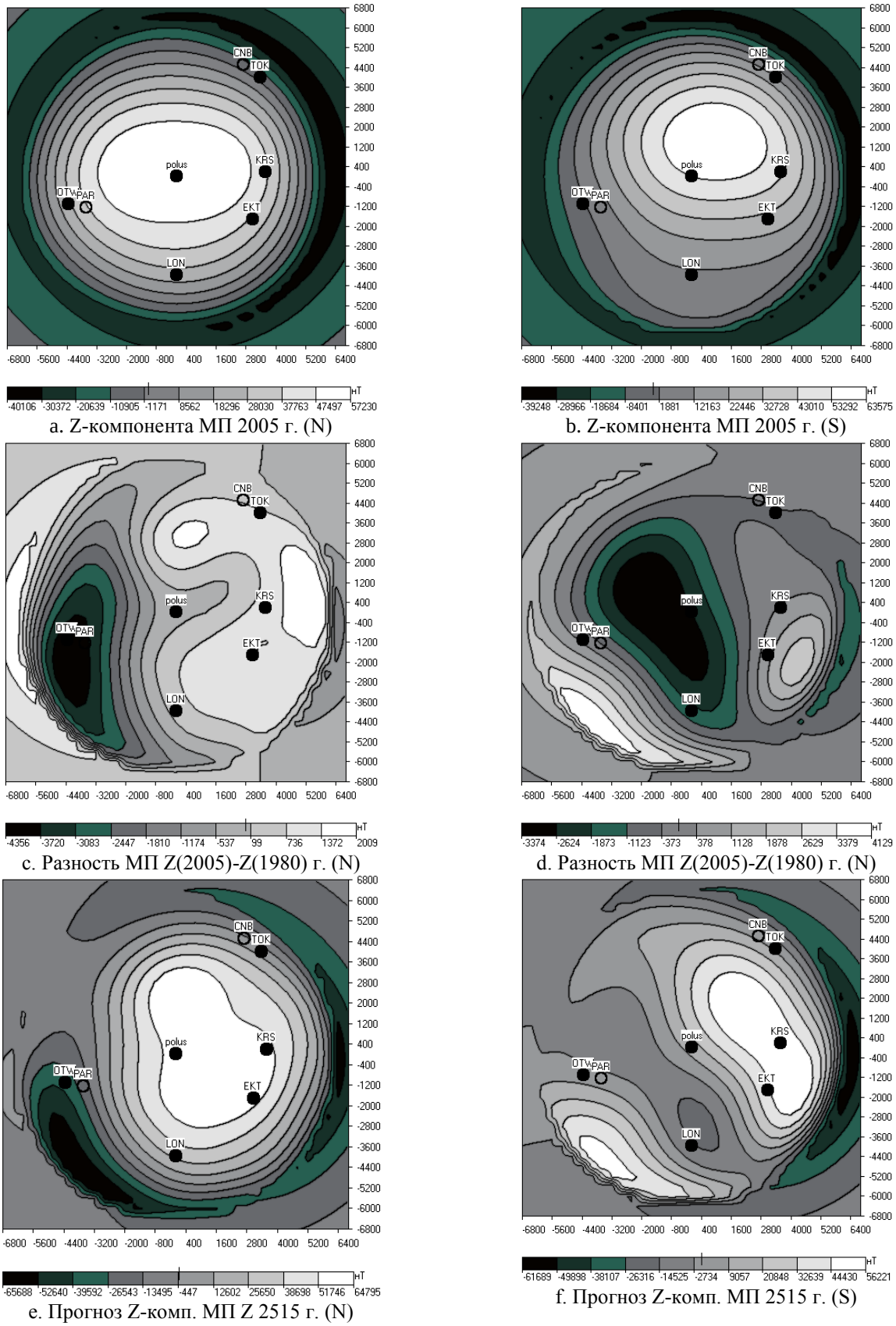
В работах [1, 2] было показано, что в восточной части планеты Z-компонента (в геоцентрической системе координат) МПЗ постепенно растет со скоростью около 60 нТл/год в области Сибирско-Азиатской глобальной аномалии и около 120 нТл/год. В западном полушарии планеты идет интенсивные уменьшение МПЗ от –100 –120 нТл/год. Наиболее интенсивно МП убывает в области Канадской и Южно-Атлантической аномалии.

В работах было сделано предположение: если темп убывания в областях этих аномалий будет продолжаться с той же скоростью, то через 500 лет на их месте появятся отрицательные аномалии. Учитывая квазилинейность изменения поля в период 1980–2015 гг. сделан прогноз поля на 2515 г. На рис.1 приведены для сравнения Z-компонента МП в северном и южном полушарии (вид со стороны северного полюса). Для ориентации на рисунке приведены проекции полюса (POL) и городов с символами TOK – Токио, KRS – Красноярск, EKT – Екатеринбург, LON – Лондон, OTV – Оттава. Светлыми кружками отмечены два пункта в южном полушарии: CNB – Канберра (Австралия), PAR – Пунта-Аренас (южная оконечность Южной Америки).

В среднем ряду рисунка приведено изменение Z-компоненты в северном и южном полушарии за период 1980–2015 гг., а в нижнем ряду приведен прогноз Z-компоненты для эпохи 2515 г.

Сравнивая картинки верхнего и нижнего ряда видим существенное отличие конфигураций. В эпоху 2000 г. оси эллипсов, создаваемых максимальными изолиниями, направлены примерно по долготам –270º 90º, а квазиэллипсы эпохи 2515 г. повернуты примерно на 80º по часовой стрелке. То есть годичная скорость составляет примерно 0.18º (период около 2000 лет) и направленность аномалий МП примерно соответствует западному дрейфу [3].

© Кочнев В.А., 2019




a. Z-компонента МП 2005 г. (N)

b. Z-компонента МП 2005 г. (S)

c. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)

d. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)

e. Прогноз Z-комп. МП Z 2515 г. (N)

f. Прогноз Z-комп. МП 2515 г. (S)

Рис. 1. Компонента магнитного поля в геоцентрической системе. Вид со стороны северного полюса.

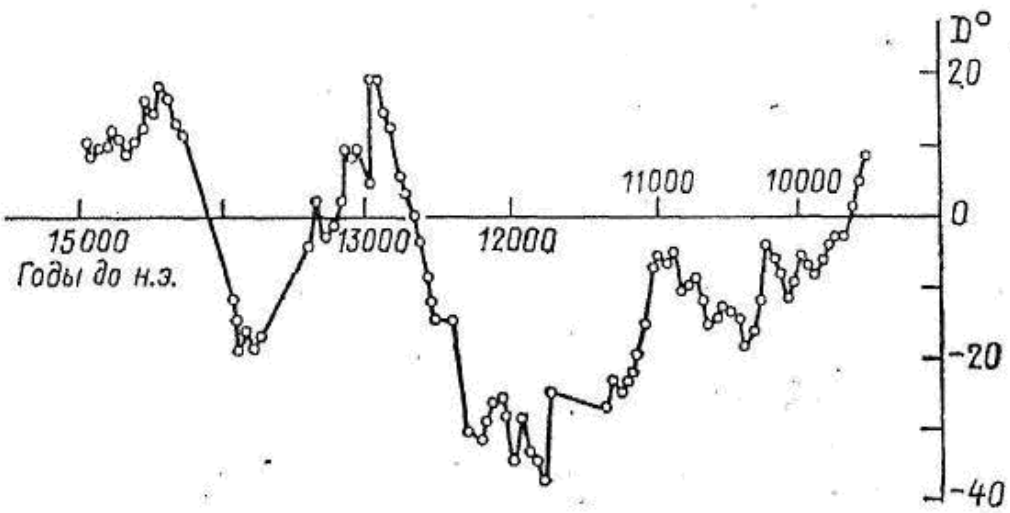



Рис. 2. Вековые вариации склонения по данным изучения ленточных глин новой Англии

Экспериментальное изучение долгосрочных изменений магнитного поля является значительной технической проблемой, однако некоторые примеры [4] (рис. 2) позволяют выделить отчетливые периодические изменения с периодом около 2000 лет. Относительное движение ядра относительно поверхности обусловлено тормозящими эффектами приливных сил Луны и Солнца [5].

**Список литературы**

1. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980–2005 гг. // Междунар. конф. MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». М., 2014.

2. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980–2005 г. // 41-я сессия Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург, 2014. С. 121–124.

3. Yukutake T. The westward drift of the magnetic field of the Earth // Bull. Earthq. Res. Inst., 1962. Vol. 40. P. 1–65.

4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

5. Kochnev V.A. Kinematic-gravitational ion model of planetary dynamo // J. Phys.: Conf. Ser.1103 012009, 2014.

УДК 528.88; 551.34

**К.В. Краснощеков[1], А.В. Дергунов[1],**
**Е.И. Пономарев[2], Е.Г. Швецов[2]**

[1] Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия
[2] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: krasko@icm.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

# НАРУШЕННОСТЬ ЛЕСНОГО ПОКРОВА СИБИРИ И ПОСЛЕПОЖАРНЫЕ АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

Представлен геопространственный анализ нарушенности лесов Сибири, выполненный на основе дистанционного мониторинга пожаров растительности в 1996–2018 гг. Получены прогностические оценки пожарного воздействия с привязкой к основным древостоям Сибири. На основе обработки данных съемки Terra/MODIS в тепловом ИК-диапазоне выявлены степень вариации температуры подстилающей поверхности в условиях накопительного послепожарного эффекта в отдельно взятых таксонах. Установлена связь коэффициента вариации помесячных усреднений температуры по территории таксона с уровнем горимости предшествующего сезона.

*Ключевые слова: многоспектральная съемка, Сибирь, нарушенность, горимость, геопространственный анализ, температурные аномалии.*

В современных условиях стабильность и устойчивость функционирования экосистем Сибири во многом зависят от воздействия природных пожаров, как одного из наиболее значимых факторов нарушения растительных покровов. В XX – начале XXI в. в бореальных лесах Сибири констатируется положительный тренд числа и площадей пожаров растительности [1, 2], в том числе – в наиболее уязвимых лесах криолитозоны [3]. Послепожарные территории характеризуются долговременными температурными аномалиями, вызванными снижением показателей альбедо и, соответственно, избыточным прогревом в течение весеннее-летнего периода. Такие аномалии могут быть триггером существенных изменений в сезонно-талом слое, что несет потенциальную опасность как для техногенных объектов в условиях криолитозоны, так и для экосистем в целом.

Мониторинг с привлечением спутниковых средств контроля позволяет детально оценить масштабы послепожарных процессов на всей территории Сибири [2, 3]. Одной из прикладных задач, решаемой в системе спутникового мониторинга пожаров, является моделирование и прогноз динамики нарушенности лесов [4].

Решение таких комплексных задач требует, наряду с развитием системы наземного обследования, привлечения широких возможностей многоспектральных спутниковых съемок. Не вызывает сомнений эффективность работы со спутниковыми данными как для мониторинга растительности и пожаров [5], так и для оценки послепожарного состояния лесов [2]. Однако многообразие спутниковых методов, применимых для мониторинга масштабных комплексных постпирогенных эффектов в криолитозоне обсуждаются недостаточно широко. Как правило, основное внимание уделяется анализу различного рода вегетационных индексов – наиболее известного показателя, характеризующего состояние растительного покрова [2]. Однако, если учесть скорость восстановления дешифровочных признаков на основе вегетационных индексов, становится очевидным необходимость привлечения более широкого спектра данных, обеспечива-

© Краснощеков К.В., Дергунов А.В., Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., 2019

ющих анализ динамики восстановительных процессов на более длительный период. В нашей работе был использован подход, дополнительно оперирующий интегральными измерениями температурных аномалий в инфракрасной (λ = 10,780–11,280 мкм) области спектра. Предложенный подход позволил изучить динамику накопительного послепожарного эффекта в лесах Сибири, а также оценить вариацию уровня температурной аномалии на участках, пройденных пожарами, скорость восстановления которых, как показывают первые результаты [6], значительно ниже, чем скорость восстановления вегетационных индексов к допожарным значениям.

**Степень нарушенности лесов Сибири.** Пространственная оценка нарушенности лесов выполнялась в масштабе речных бассейнов. Векторные слои бассейнов рек Сибири доступны в каталогах SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS, http://www.hydrosheds.org) [7]. Обработанные средствами ГИС покрытия бассейнов рек (уровни вложенности 4–9 в классификации HydroSHEDS) были применены при вычислениях горимости и нарушенности растительности в границах природно-обусловленных таксонов с близкими физико-географическими, метеорологическими характеристиками и условиями лесопроизрастания.

Использовалась база данных пожаров, сформированная по результатам спутникового мониторинга в 1996–2018 гг. [8]. Средствами геопространственного анализа (ГИС) выполнялись оценки многолетней вариации пожарного воздействия на растительные покровы. В процедуре пересечения векторных слоев учитывалась привязка пожаров к преобладающим типам древостоев Сибири, градациям мерзлотных зон и бассейнами рек 9 уровня (классификации HydroSHEDS). Стандартными методами вычисляли показатель горимости (γ, %) как отношение суммарной площади пожаров за сезон к площади рассматриваемого таксона. Фактический размер ячейки интерполяции ~25 тыс. га. Результат геопространственной интерполяции интегрального многолетнего эффекта от пожаров представлен в формате векторной карты нарушенности лесов масштаба 1 : 750 000 (рис. 1).

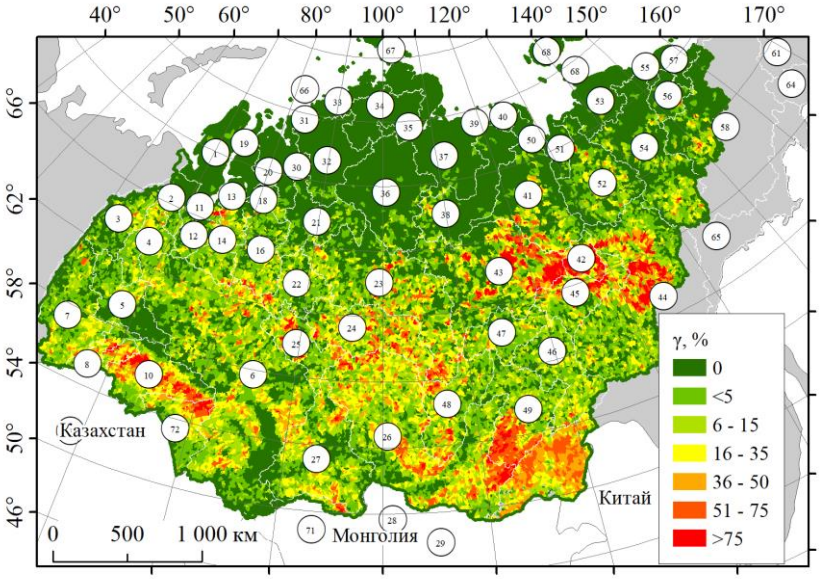



Рис. 1. Нарушенность лесов по отношению к площади таксона (γ, %) как интегральный эффект воздействия пожаров за период 1996–2018 гг. Цифры – бассейны 4-го уровня (по HydroSHEDS)

Многолетний тренд горимости с привязкой к основным лесообразующим породам древостоев описывается логарифмической функцией (достоверность аппроксимации $R^2$>0,92) и соответствующими коэффициентами, определяющими скорость приращения пройденных огнем территорий (рис. 2). Прогностические оценки в условиях сохранения современных пожарных режимов в Сибири представлены до 2030 г. (рис. 2).

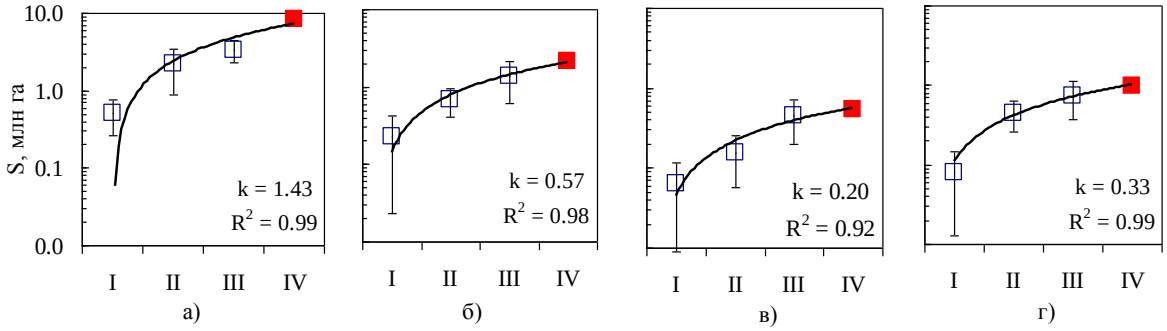



Рис. 2. Оценки пожарного воздействия в лиственничниках (*а*), сосняках (*б*), темнохвойных (*в*), лиственных и смешанных лесах (*г*). 1996–2018 гг. (I – III), прогноз до 2030 г. (IV)

**Послепожарные температурные аномалии подстилающей поверхности.** При анализе спутниковых съемок Terra/MODIS в ИК-диапазоне зафиксировано наличие долговременных температурных аномалий на послепожарных участках, связанных с избыточным прогревом подстилающего покрова в условиях снижения альбедо поверхности [6]. В связи с накопительным эффектом от пожаров, выражающемся в приращении нарушенных территорий в отдельно взятых таксонах, было предложено анализировать коэффициент вариации ($C_v$) температурного поля в пределах рассматриваемых территорий с предварительным помесячным усреднением данных. Были рассмотрены бассейны рек Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска (см. № 23, 24 на рис. 1, рис. 3, *а*), выделенные в связи с существенной степенью нарушенности лиственничников региона пожарами в условиях криолитозоны [3].

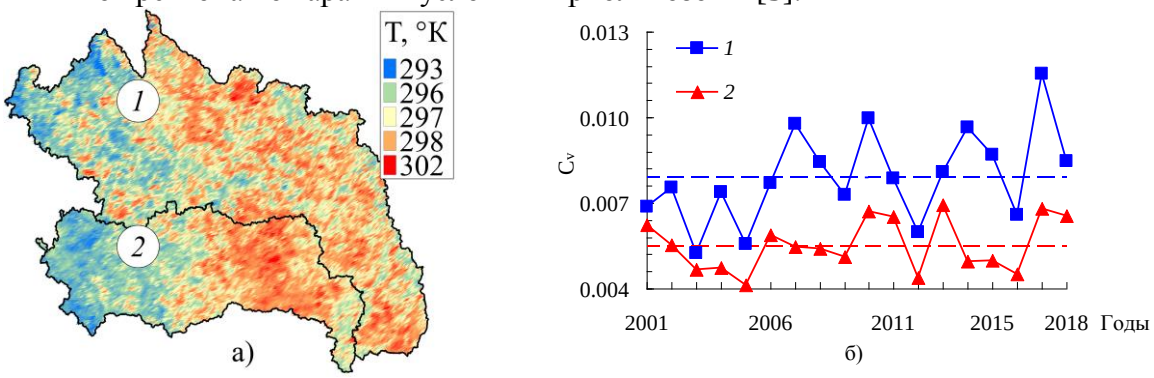



Рис. 3. Температурное поле (*а*) и средне-летние значения коэффициента вариации температуры ($C_v$) (*б*). Бассейны: *1* – Нижняя Тунгуска; *2* – Подкаменная Тунгуска

Установлено, что динамика значений коэффициента вариации $C_v$ (рис. 3, *б*) определяется интегральным накопительным эффектом от тепловых послепожарных аномалий и имеет высокую корреляцию с площадями пожаров предыдущего сезона ($r$ ~0,7). Так, для территории бассейна реки Нижняя Тунгуска ряд $C_v$ имел максимумы, превышающие стандартное отклонение, – через год после экстремальных пожарных сезонов 2006, 2010, 2012, 2016 гг. Амплитуда вариации $C_v$ на территории бассейна Подкаменной Тунгуски значительно ниже, но максимумы $C_v$ также определяются горимостью предыдущего пожароопасного сезона (2007, 2010, 2012 и 2016 гг.).

Восстановительные процессы в лиственничниках в первые 10 лет не компенсируют температурные аномалии в связи со значительными изменениями теплоизолирующих свойств поврежденной лесной подстилки после пожаров. С учетом ежегодного приращения послепожарных участков существенная часть мерзлотной зоны Сибири (по современным оценкам это 10–15% [6]) будет испытывать влияние тепловых послепожарных аномалий.

*Анализ температурных аномалий выполнен при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (№ 18-41-242003 «Моделирование и спутниковый мониторинг эффектов от тепловых аномалий подстилающей поверхности в сезонно-талом слое почв криолитозоны Сибири»).*

**Список литературы**

1. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

2. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Барталев, Ф.В. Стыценко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83 – 94.

3. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413 – 419.

4. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 / A. Krylov, J.L. McCarty, P. Potapov [et al.] // Environ. Res. Lett. 2014. № 9. P. 1–8.

5. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в XX веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 158–175.

6. Пономарев Е.И., Пономарева Т.В. Дистанционный мониторинг послепожарных эффектов в криолитозоне Средней Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 5. С. 85–95.

7. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems // Hydrological Processes. 2013. № 27 (15). P. 2171–2186.

8. Пономарев Е.И., Харук В.И., Якимов Н.Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сиб. лесн. журн. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503.

УДК 630*182

**Х.Б. Куулар**

Кандидат биологических наук, Тувинский институт
комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия
e-mail: k-k-188@list.ru

# ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ХРЕБТА ЗАПАДНЫЙ ТАННУ-ОЛА ПО ДАННЫМ LANDSAT

Рассмотрены основные показатели разнообразия растительности ключевого участка хребта Западный Танну-Ола по данным Landsat за 25.06.1992, 18.06.1998 и 24.06.2015. Оценка степени лесистости и фрагментации растительности проведены в программе QGIS 2.18 с использованием модуля Landscape Ecology. Результаты показали, что с нарастанием потепления климата и при сохранении такой тенденции доля темнохвойного леса низкогорья и высокогорья будут увеличиваться. Выявлена тенденция снижения фрагментации растительного покрова со временем по космоснимкам. Индекс Симпсона показывает увеличение разнообразия на всех высотных уровнях.

*Ключевые слова: хребет Западный Танну-Ола, южные бореальные леса, снимки Landsat, фрагментация лесов, разнообразие.*

В рамках программы «Сохранение биоразнообразия» рекомендуется оценить разнообразие экосистем. Для оценки экосистемного разнообразия предлагается использовать соотношение площадей, занятых различными типами леса, относительно общей площади, а также фрагментацию лесов [1].

В настоящее время заметно проявляется влияния изменения климата на территории Центральной Азии. Наиболее серьезные среди них – процессы изменения южных бореальных лесов. Для Центральной Азии характерно достаточное разнообразие и растительных и климатических условий. Учет и оценка разнообразия лесных сообществ республики остается проблемой. Используя данные дистанционного зондирования можно оценить значения показателей разнообразия труднодоступных горных территорий.

В данной работе рассматривается лесистость и фрагментация ключевого участка хребта Западный Танну-Ола по данным Landsat.

Хребет Западный Танну-Ола расположен на юго-западной части республики и выполняет важную роль в обеспечении устойчивости лесов гор Южной Сибири. Он является последним барьером на пути влажных северо-западных воздушных течений, достигших гор Южной Сибири и один из крупных климатических рубежей. Климат резко континентальный, среднегодовые осадки 229,8 ± 65,1 мм и среднегодовая температура –1,0 ± 0,8 °С (1988–2018 гг.). Аномалия среднегодовой температуры в период 1988–2018 гг. по сравнению с базовым периодом (1961–1990 гг.) составила 1,4 ± 0,1°С [2]. Горный ландшафт создает разнообразные растительные условия, на территории хребта переплетены уникальное сочетание разнообразных ландшафтов – от степных до горно-тундровых [3]. Такое разнообразие растительности способствует поддержанию стабильности растительности хребта.

Данные о растительности хребта получены по данным спутников Landsat за даты 25.06.1992, 18.06.1998 и 24.06.2015. Проведена классификация растительного покрова с помощью контролируемой классификации с использованием модуля Zdetsaka. Информация для классификации была получена из картосхемы лесов Республики Тыва

© Куулар Х.Б., 2019

(м-б 1 : 300 000). Обработка космоснимков, расчет фрагментации и биоразнообразия выполнены в геоинформационной системе Quantum GIS 2.18.

Основным показателям разнообразия лесов относятся лесистость и фрагментация леса. Лесистость (доля леса) описывается по формуле

$$EP = \frac{Sa}{S}100,$$

где $S$ – общая площадь исследуемого участка; $Sa$ – общая площадь всех лесов.

Оценка степени лесистости на основе доли лесопокрытой площади ключевого участка по высотным уровням показана в табл. 1. На территории ключевого участка, по данным Landsat за период исследования, общая лесистость по высотным уровням увеличилась от 9,5 до 19,5 %. Но доля светлохвойных лесов среднегорья и высокогорья уменьшились из-за уничтожения пожарами от 1,3 до 4,6 %.

Таблица 1

Доля лесопокрытой площади ключевого участка хребта Западный Танну-Ола

| Высотные уровни | Общая лесистость, % | | | Темнохвойные леса, % | | | Светлохвойные леса, % | | | Мелколиственные леса, % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Низкогорье | 60,3 | 60,3 | 69,8 | 26,1 | 29,9 | 29,6 | 7,2 | 5 | 8,6 | 24,3 | 23,6 | 26,6 |
| Среднегорье | 59,8 | 59,8 | 79,3 | 36,9 | 27,9 | 50,7 | 6,3 | 5 | 3,2 | 14,4 | 23,6 | 19,9 |
| Высокогорье | 55,1 | 55,1 | 68,6 | 21,4 | 27,4 | 31,5 | 6,5 | 1,2 | 1,9 | 20,4 | 23,6 | 27 |

Обозначения: I – за 25.06.1992, II – 18.06.1998, III – 24.06.2015.

Фрагментация ландшафтов – существенный фактор снижения биоразнообразия [4–6]. Фрагментация лесного покрова – разбиение целых лесных массивов на изолированные фрагменты. В табл. 2 представлена фрагментация ключевого участка хребта Западный Танну-Ола. Общая фрагментация по трем высотным уровням уменьшилась в 1,9–2,1 раза, фрагментация темнохвойных лесов – в 1,6–2,1 раза, фрагментация светлохвойных лесов – в 2,9–7,8 раза. Фрагментация мелколиственных лесов происходит неравномерно, но по сравнению с первым снимком фрагментация также уменьшилась в 1,2–1,6 раза. В целом уменьшение фрагментации лесов связано с зарастанием лесов хребта с установлением благоприятных условий при потеплении климата.

Таблица 2

Фрагментация лесов ключевого участка хребта Западный Танну-Ола

| Высотные уровни | Общая фрагментация | | | Темнохвойные леса | | | Светлохвойные леса | | | Мелколиственные леса | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Низкогорье | 15 260 | 15 527 | 7 846 | 5 485 | 6 069 | 3 332 | 5 540 | 3 827 | 1 939 | 4 235 | 5 631 | 2 575 |
| Среднегорье | 15 215 | 15 883 | 7 298 | 6 196 | 6 986 | 3 003 | 5 155 | 2 037 | 1 190 | 3 864 | 6 860 | 3 202 |
| Высокогорье | 17 121 | 13 735 | 8 094 | 7 500 | 7 087 | 4 332 | 5 583 | 1 505 | 727 | 4 038 | 5 143 | 3 035 |

Обозначения: I – за 25.06.1992, II – 18.06.1998, III – 24.06.2015.

Значения индекса Симпсона для каждого высотного уровня представлена в табл. 3. Индекс разнообразия индекс Симпсона [7], который учитывает как богатство, так и равномерность при измерении разнообразия. Индекс разнообразия Симпсона описывается по формуле:

$$C = \sum \frac{n_i}{N},$$

где $n_i$ – оценка значимости каждого вида (численность или биомасса); $N$ – сумма оценок значимостей.

По таблице 3 видно, уменьшается значения индекса Симпсона, который показывает рост разнообразия растительности ключевого участка хребта Западный Танну-Ола.

Таблица 3

Индекс разнообразия ключевого участка хр. Западный Танну-Ола

| Индекс Симпсона | 25.06.1992 | 18.06.1998 | 24.06.2015 |
|---|---|---|---|
| Низкогорье | 0,84 | 0,82 | 0,81 |
| Среднегорье | 0,87 | 0,86 | 0,81 |
| Высокогорье | 0,87 | 0,67 | 0,81 |

Таким образом, для оценки разнообразия растительности рассчитаны лесистость, число фрагментов и индекс разнообразия Симпсона ключевого участка хребта Западный Танну-Ола. Фрагментация лесов исследуемого участка уменьшилась в течение последних лет. Уменьшение мозаичности лесов привело к увеличению общей лесистости исследуемого участка по всем высотным уровням, т.е. от 9,5 до 19,5 %, хотя доля светлохвойных лесов среднегорья и высокогорья уменьшились из-за уничтожения пожарами от 1,3 до 4,6 %.

**Список литературы**

1. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / отв. ред. А.С. Исаев; Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. М.: Наука, 2008. 453 с.

2. Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В.Н. Смагина, С.А. Ильинской, Д.И. Назимовой [и др.]. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.

3. Куулар Х.Б. Температура ландшафтной поверхности Республики Тыва по данным спутника Landsat-8 в зимний период 2014–2017 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 67–77.

4. Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity // Annual review of ecology, evolution and systematic. 2003. Vol. 34. P. 487–515.

5. Fischer J., Lindenmayer D.B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis // Global Ecology and Biogeography. 2007. Vol. 16 (3). P. 265–280.

6. Wu J. Ecological dynamics in fragmented landscapes: Princeton guide to ecology. Princeton: Princeton University Press, 2009. P. 438–444.

7. Simpson E/H. Measurement of diversity. Nature. 1949. Vol. 163. P. 688.

УДК 528.873

**Н.О. Мальчиков, А.С. Шушпанов**
Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: show.mno@mail.ru

# АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДИ ШЕЛЬФОВОГО ЛЕДНИКА ФИМБУЛ НА ФОНЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Рассмотрена проблема глобального изменения климата, повышение средних температур воздуха на планете Земля, его влияние на изменение площадей ледников Антарктиды, на примере шельфового ледника Фимбул. Приведены результаты обработки данных дистанционного зондирования со спутников серии Landsat с помощью программ ERDAS Imagine и ArcGIS. Установлено, что влияние изменения температуры на площадь ледников носит характер обратной зависимости. Изменение среднегодовой температуры на 1 °С приводит к изменению общей площади шельфового ледника ~200 км$^2$. Это исследование создает основу для дальнейшего изучения влияния глобального изменения климата на состояние ледников.

*Ключевые слова: спутниковые данные, ДЗЗ, дешифрирование, неконтролируемая классификация, картографирование, Landsat.*

**Введение.** В современном мире актуален вопрос глобального изменения климата. Согласно последним данным отчета по изменению климата IPCC 2018 температуры неуклонно растут, уже в ближайшие сотни лет планета Земля может измениться до неузнаваемости [1]. Но в чем же причина такой тенденции? Земля существует уже не один миллион лет, а повышение температур началось только в последние 100–150 лет [2]. Одной из основных причин глобальных климатических изменений считается антропогенное воздействие, выраженное развитием легкой и тяжелой промышленности. Каждый день в атмосферу планеты выбрасываются миллионы парниковых газов – выхлопные газы автомобилей, выбросы с промышленных предприятий, которые зависают в верхних слоях атмосферы и создают так называемый парниковый эффект.

Парниковый эффект оказывает катастрофическое влияние на климат планеты, в частности это затрагивает «ледяные щиты планеты» – Северный и Южный полюса. Постоянный рост температур ведет к таянию огромных масс льда, что влечет за собой постоянный рост уровня мирового океана. В свою очередь, тенденция роста уровня мирового океана может привести к таким глобальным проблемам, как полное изменение привычного ландшафта Земли, затопление огромных территорий. Именно поэтому анализ изменения площадей, границ ледников является актуальной проблемой.

**Материалы и методы.** Исследование изменений границ ледников проводилось на примере шельфового ледника Фимбул. Шельфовый ледник Фимбул является одним из самых крупных ледников Антрактиды, его площадь составляет 41 060 км$^2$ [3].

Для анализа границ ледника за 1997–2016 гг. применялась временная серия спутниковых снимков со спутников Landsat. При анализе использованы снимки, отвечающие следующим требованиям:

- съемка выполнена в один и тот же период;
- отсутствие облачности над обрабатываемой территорией;
- отсутствие неустранимых шумов, мешающих обработке снимка.

Учитывая указанные требования, отобраны снимки за следующие месяца: январь 1996 и 2002 гг. и февраль 2008, 2012 и 2016 гг.

© Мальчиков Н.О., Шушпанов А.С., 2019

На следующем этапе с целью выделения обрабатываемой территории ледника и вычисления его площади выполнена классификация всех пяти изображений методом *ISODATA*, созданы ГИС-слои. Вычисленные площади приведены в таблице.

Таблица

Вычисленные площади ледника Фимбул

| № | Год | Площадь, км$^2$ |
|---|---|---|
| 1 | 1996 | 515,5 |
| 2 | 2002 | 525,4 |
| 3 | 2008 | 731,7 |
| 4 | 2012 | 909,4 |
| 5 | 2016 | 686,5 |

Далее, для более наглядной оценки изменения ледника составлен композит из ГИС-слоев, включающий изображение границ ледника за весь период исследования. Данная информация представлена на рис. 1.

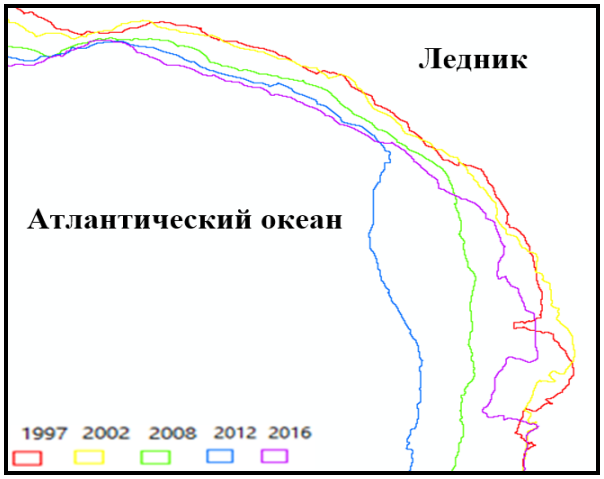



Рис. 1. Изменение границ ледника Фимбул

Проведенный анализ показал, что уменьшение площади шельфовых ледников происходит быстрее, чем его восстановление. Так, в период с 2002 по 2008 г. при понижении температуры на 1,5 °С площадь ледника увеличилась на 186,3 км$^2$, а в период с 2012 по 2016 г. при повышении температуры на 1,3 °С ледник потерял 222,9 км$^2$.

Оценивая полученные данные, видно, что последние 8 лет наблюдаются значительные изменения прибрежной границы ледника, тенденции в изменение площади ледников связаны с годовыми флуктуациями температуры.

Так как данное исследование предполагает, что тенденция изменения ледника связана с глобальным изменением температур, на следующем этапе были определены средние температуры. Использованы средние температуры воздуха с метеостанции Ноймайер за три месяца, предшествующих дате выполнения снимков [4].

Зависимость изменения площадей ледника от повышения и понижения представлена на рис. 2. Полученная информация о температурном режиме подтверждает тот факт, что изменение границ и площади ледника напрямую связано с изменением температур.

**Заключение.** Анализируя полученные результаты, можно сказать, что влияние изменения температуры на площадь ледников носит характер обратной зависимости. Изменение среднегодовой температуры на 1 °С приводит к изменению общей площади шельфового ледника ~ 200 км$^2$. Исходя из этого, можно сказать о том, что разрушение

шельфовых ледников нуждается в дальнейшем изучении, так как они имеют важное значение для всей планеты в целом, выступают в роли регулятора температур. Также стоит отметить, что в дополнение к изучению влияния температуры воздуха в дальнейшем стоит рассмотреть и другие факторы, например, колебания температур океана, который так же, напрямую, может влиять на разрушение ледника.

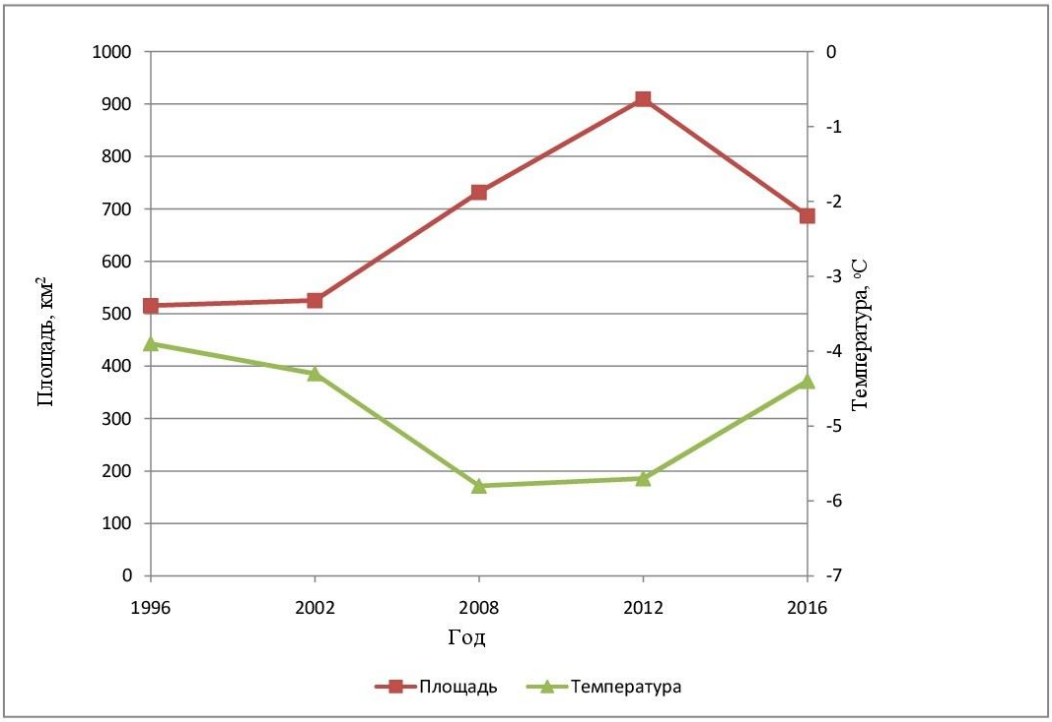



Рис. 2. График зависимости изменения площадей ледника от повышения и понижения температур

**Список литературы**


1. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: http://www.ipcc.ch/.
2. Арутюнов В.С. Парниковый эффект: проблема выбора стратегии // Рос. хим. журн. 2001. Т. 45, № 1. С. 55–63.
3. Арктика – Антарктида. URL: http://arktika-antarktida.ru/.
4. Погода в мире. URL: http://rp5.ru/.

УДК 528.8

**В.Г. Маргарян[1], А.С. Кочарян[2]**

[1] Ереванский государственный университет, Ереван, Армения
[2] ГНКО «Служба по гидрометеорологии и активным воздействиям на атмосферные явления», Ереван, Армения
e-mail: vmargaryan@ysu.am, hasmikq@mail.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В МОНИТОРИНГЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

Обсуждены некоторые вопросы, связанные с нынешними и ожидаемыми возможностями применения спутниковой информации в мониторинге погодных условий, в частности в прогнозах и мониторинге погоды Армении.

*Ключевые слова: спутниковая информация, EUMETSAT, прогноз погоды, мониторинг, Армения.*

Информация о погоде, особенно прогнозы погоды, всегда имели большой спрос, и этот спрос растет вместе с развитием и расширением экономики. В 2018 и 2019 гг. во время Всемирного экономического форума были названы четыре главных вызовов для экономики и населения нашей планеты: это погодные экстремумы, стихийные бедствия, неудачи в проведении адаптации и смягчения изменений климата и водный кризис. Негативные социально-экономические последствия этих явлений со временем увеличиваются [1]. В этом смысле очень важно повысить уровень качества гидрометеорологического обслуживания населения.

С середины прошлого века в систему глобальных метеорологических наблюдений стали использовать искусственные спутники Земли (ИСЗ). Это имело революционное значение, поскольку спутники произвели наблюдения всей Земли, значительно быстрее и дешевле. К тому же, с помощью ИСЗ стало возможно произвести наблюдения в отдаленных местах, таких как Арктика, Антарктика, океаны. Начались исследования по глобальным движением воздушных масс. В настоящее время приблизительно 15 метеорологических и 50 исследовательских спутников производят наблюдения за погодой и климатом Земли [5].

В этой работе мы обсудим некоторые вопросы, связанные с нынешними и ожидаемыми возможностями применения спутниковой информации в мониторинге погодных условий, в частности в прогнозах и мониторинге погоды Армении.

В Армении метеорологические исследования и прогнозирование производятся гидрометеорологической службой. Данные поступают с 46 метеорологических станций с персоналом, трех автоматических метеостанций, двух радиолокационных станций, а также спутниковые данные – из европейской организации EUMETSAT. В настоящее время в армянской гидрометеорологической службе спутниковые данные используются:

- для среднесрочных прогнозов погоды, прогнозов с расширенным сроком, климатических прогнозов,
- наблюдений за растительностью.

Главные направления развития с применением спутниковой информации – внедрение прогнозов текущей погоды и системы раннего оповещения об опасных гидрометеорологических явлениях, сезонное прогнозирование, мониторинг за растительностью и прогноз урожайности.

© Маргарян В.Г., Кочарян А.С., 2019

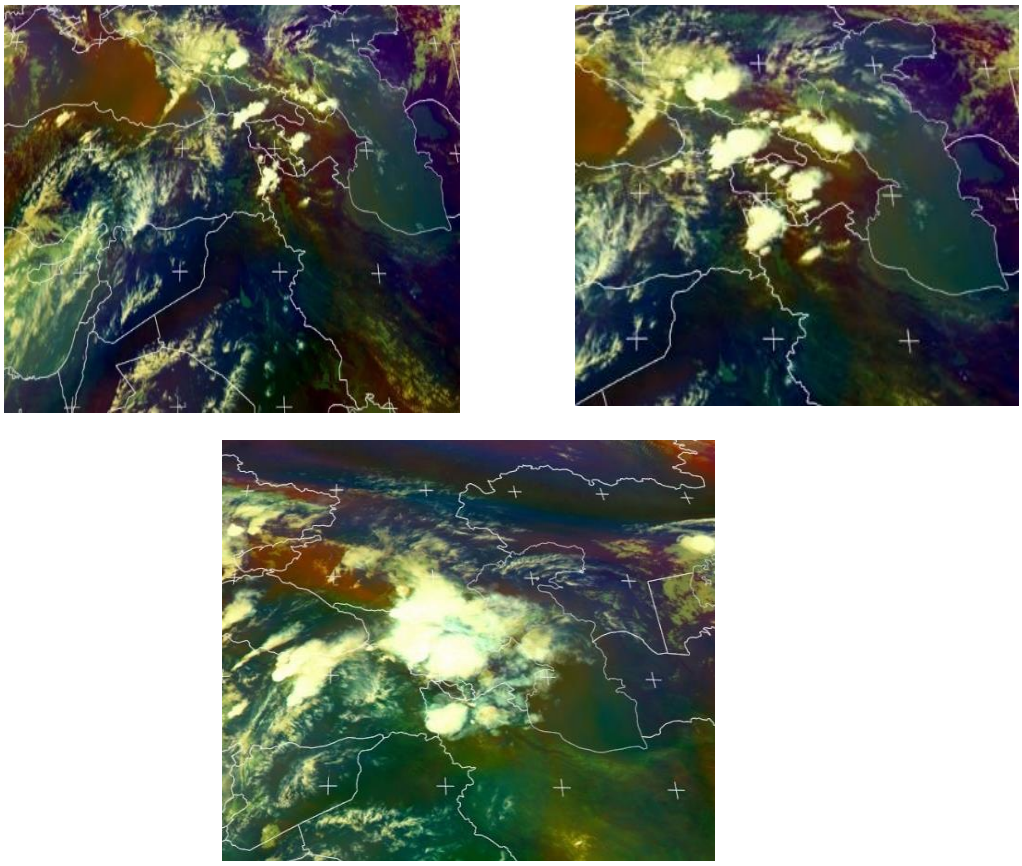


Рисунок. Airmass RGB изображения из спутника Meteosat-8 4 июня 2019 г., в 14, 16 и 20 ч местного времени соответственно (MSGIODC Airmass Northern Asia, https://eumetview.eumetsat.int/static-images/MSGIODC/RGB/AIRMASS/NORTHERNASIA/index.htm)

Глобальная гидрометеорологическая космическая система наблюдений включает спутники на геостационарной орбите (GEO) и спутники на средневысотных приполярных солнечно-синхронных орбитах (PEO).

В табл. 1 приведены основные характеристики полярных и геостационарных спутников. Главное различие с точки зрения применяемости в анализе погоды нашей страны состоит в пространственном разрешении, которая высока у полярно-орбитальных спутников за счет близости к Земле. Второе различие – в охватываемой территории. В этом смысле предпочтительны геостационарные спутники, которые дают общую картину движения воздушных масс.

Таблица 1

Сравнение GEO и PEO метеорологических спутников [3]

| Параметр | GEO спутники | PEO спутники |
|---|---|---|
| Пространственное разрешение | Сравнительно низко | Сравнительно высоко |
| Покрытие сканирования | Весь диск Земли | Ограниченная территория |
| Высота орбиты | Около 36 тыс. км над экватором | Около 800–1 200 км |
| Движение спутника | Орбита синхронизирована к Земле | Вращается вокруг Земли приблизительно с севера на юг |
| Частота отображения | Продолжительное отображение одного места | Отображает место 1–2 раза в день |

Поскольку данные у нас поступают из EUMETSAT, рассмотрим функции их GEO и PEO спутников. В геостационарной орбите на 36 000 км над экватором EUMETSAT эксплуатирует четыре спутника. Meteosat-9, 10 и 11 находятся в геостационарной орбите по Европе и Африке, а Meteosat-8 работает по Индийскому океану. Meteosat-9 предоставляет «Быструю услугу просмотра» (Rapid Scanning Service), более частые изображения в каждые пять минут по разным частям Европы, Африки и смежных морей.

Спутники Metop летят в низкой полярной орбите, на высоте 817 километров, и обеспечивают более подробные наблюдения за атмосферой, океанами и сушей. Metop-A, первый европейский полярно-орбитальный метеорологический спутник, который был запущен в октябре 2006 г. и начал доставить оперативные данные с 15 мая 2007 г. Metop-B был запущен 17 сентября 2012 г. и стал основным оперативным спутником с 24 апреля 2013 г. [2].

Meteosat Third Generation (MTG) – следующее поколение геостационарных спутников EUMETSAT. Эта серия будет заменять нынешнее – второе поколение спутников – за период 2020–2040 гг. MTG также уносит некоторые изменения. Эти изменения помогут улучшить качество сверхкраткосрочных прогнозов и nowcasting. Программа разрабатывается вместе с Европейским космическим агентством (ESA).

MTG включит шесть новых геостационарных (отображающих и зондирующих) спутников с 2021 г. Эта серия спутников будет основан на платформах с тремя осями и будет содержать:

- четыре отображающих спутника (MTG-I) (ожидается 20 лет эксплуатации);
- два зондирующих спутника (MTG -S) (ожидается 15,5 лет эксплуатации).

В полярной орбите глобальные наблюдения за период 2020–2040 гг. продолжит второе поколение спутников полярной системы EUMETSAT (EPS-SG). Эта серия улучшит качество предоставляемых важных исходных данных для числовых прогнозов погоды (NWP). Главные приоритеты программы – улучшение качества прогнозов погоды и мониторинга климата [4].

**Заключение.** С учетом текущих возможностей прогнозирования погоды «Армгидромета» и ожидаемого расширения этих возможностей в связи с будущим поколением спутников METEOSAT подчеркнем несколько главных направлений развития:

- внедрение текущих, сверхкраткосрочных и сезонных прогнозов, повышение достоверности среднесрочных прогнозов погоды;
- внедрение системы раннего оповещения об опасных гидрометеорологических явлениях;
- улучшение качества климатических прогнозов;
- правильное управление сельскохозяйственныыми работами;
- разрабатывание адаптационных мероприятий к климатическим изменениям;
- правильное управление энергетическими ресурсами.

**Список литературы**

1. Bulletin WMO for the 21st century. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5843.
2. EUMETSAT operates a fleet of satellites in geostationary and polar orbit, which provide a wide array of Earth observation data for weather, climate and environmental monitoring. URL: https://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhatWeDo/OperatingSatellites/index.html.
3. Ilcev, Stojce Dimov, Global Satellite Meteorological Observation (GSMO) Theory. Vol. 1. Springer 2018.
4. Preparing for the long-term future with Meteosat Third Generation (MTG) and EUMETSAT Polar System Second Generation (EPS-SG). URL: https://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhatWeDo/DevelopingSatellites/index.html.
5. Weather. URL: https://public.wmo.int/en/our-mandate/weather.

УДК 622

**Г.П. Метакса**

Доктор технических наук, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева,
Алма-Ата, Казахстан
e-mail: gmetaksa@mail.ru

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ БИОСИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Неполный анализ причинно-следственных взаимосвязей в системе «человек – среда» свидетельствует о том, что современное человечество уже превратилось в активную геологическую силу, изучение которой может позволить грамотно осуществлять зондирование состояния поверхностного слоя Земли и ее обитателей.

*Ключевые слова: прогноз, окружающая среда, биосфера, параметры взаимодействия, система, соотношения.*

При любом внешнем воздействии на структурированную систему она создает отклик, измеряемый современной аппаратурой в виде изменения временных (частота, период) или пространственных (длина волны, ИК-спектр, смещение и т.п.) параметров системы в зависимости от решаемых задач. Для классического случая движения электромагнитной волны [1] пространство и время проявляют себя в виде линейного соотношения, формирующего скоростной поток $V$ однородных элементов среды:

$$V = \frac{S}{T}, \text{ или } V = \frac{\lambda}{\mathrm{t}} = \lambda\nu, \tag{1}$$

где $S$ – путь; $T$ – время; $\lambda$ – длина волны; $t$ – период; $\nu$ – частота колебаний.

Для механических волн уже не существует линейных соотношений между скоростью и пространственно-временными компонентами среды распространения. Здесь квадрат скорости звука зависит от элементов структуры, обеспечивающих плотность, упругость, вязкость в зависимости от особенностей фазового состава среды распространения. В табл. 1 приведены кинетические параметры и физические соответствия для среды, формирующей отклик на внешнее воздействие. В качестве кинетического параметра выбрана величина корня квадратного от скорости распространения механических волн в основных фазах окружающей среды, так как она является основанием для любой степенной зависимости (по типу логарифмических взаимосвязей).

Здесь показана степень согласованности с высшим представителем биосферы – человеком. Видно, что все приведенные соответствия характеризуют временной показатель жизнедеятельности живых организмов. Для анализа пространственных соотношений в земных условиях существует показатель $\pi$ = 3,14. Это безразмерный показатель, используемых в расчетах любой степени кривизны пространства (мерность). Корень квадратный из этого показателя равен 1,77, что по абсолютному значению соответствует среднему росту современного человечества.

Другая фундаментальная константа относится к энергетическому показателю кванта действия – это постоянная Планка $h = 6{,}6262 \cdot 10^{-34}$дж·с, корень квадратный из этого показателя равен $2{,}57 \cdot 10^{-17}$, что по абсолютной величине соответствует нижнему пределу частоты гамма-излучения.

© Метакса Г.П., 2019

Таблица 1

Матрица физических соответствий между основаниями скоростных параметров Земного Окружения и их приемника – Человека

| Вид энергии и скорость ее распространения $M$ – м/с | Условие равновесия $K = \sqrt{V}$ | Физическое соответствие с приемником |
|---|---|---|
| Электромагнитная (световая) $V = 3 \cdot 10^8$ м/с | $\sqrt{3 \cdot 10^8} = 1{,}7 \cdot 10^4$ | 17 300 Гц – верхний предел слуха человека |
| Воздушный бассейн скорость звука $V = 324$ м/с | $\sqrt{324} = 18$ | 18 Гц – нижний предел слуховой чувствительности человека |
| Водная среда скорость звука: пресная – 1 340 м/с; то же для соленой пересыщенной воды $V = 1\,600$ м/с | $\sqrt{1340} = 36{,}6$ $\sqrt{1600} = 40$ | 36,6° – температура тела человека 40° = верхний предел температуры тела |
| Диапазон видимого излучения Солнца | $10^{14}$ | (0,4–0,8) $10^{14}$ Гц |
| Химическая энергия (количество положительных и отрицательных ионов в воде – показатель pH) | $\sqrt{10^{14}} = 10^7$ | $10^7$ = pH = 7 – нейтрального раствора пресной воды |
| Твердая среда скорость звука продольных волн $V = 6\,280$ м/с | $\sqrt{6280} = 79{,}2$ | Температура сворачивания белка ~80 °С |

Исходя из анализа размерности рассматриваемых единиц энергии кванта, вполне вероятно, что этот показатель относится к базовому размеру наименьшей природной частицы. Если это так, то для этого уровня рассмотрения уместно анализировать пространственно-временные соотношения, относящиеся к третьему закону Кеплера, в соответствии с которым пространство $R$ и время $T$ находятся в постоянном соотношении $K$:

$$\frac{R^3}{T^2} = K. \qquad (2)$$

Если подставить эти кинетические параметры, то коэффициент K’ будет равным

$$K = \frac{(1{,}77)^3}{6{,}62 \cdot 10^{-34}} = 0{,}83 \cdot 10^{34} \text{ м}^3 / \text{с}^3.$$

По порядку величин этот параметр соответствует межгалактическим взаимодействиям.

Предварительный сравнительный анализ показал, что существует жесткая предопределенность и взаимозависимость основных параметров окружающей среды (ОС) и их приемником – индивидуальным человеком. Представляет интерес проанализировать некоторые грани взаимодействия большого количества людей, для оценки его влияния и его параметров на биосферу Земли.

В обозримом историческом времени Земля никогда еще не имела такого количества обитающих на ней разумных существ, неравномерно распределенных по ее поверхности. Индивидуальный человеческий организм участвует в приеме и преобразовании поступающей к нему энергии различного фазового и спектрального состава. Общеизвестен факт теплового преобразования энергии, поступающей человеку от продуктов питания и позволяющей ему поддерживать температуру тела постоянной +36,6 °С.

Как тепловое устройство он вырабатывает суммарное количество энергии $Q$, равное [2]:

$$Q = N\,(mc\Delta t), \qquad (3)$$

где $N$ – количество населения Земли, равное ~6 млрд человек; $m$ – средняя масса индивидуального человека (авиационный показатель); $c$ – теплоемкость, характерная для водных растворов; $\Delta t$ – разность температур, принятая в расчете равной 36,6°.

Полученное значение этой энергии составляет $7{,}36 \cdot 10^{16}$ дж = $7{,}36 \cdot 1\ 0^{23}$ эрг. Годовые показатели только теплового обмена дают цифру $2{,}32 \cdot 10^{24}$ дж/год.

По порядку величины приведенные показатели сопоставимы с энергетическими возможностями геологических и космофизических процессов. В работе [3] приводятся следующие данные, дж/год:

- колебания кинетической энергии вращения – $5 \cdot 10^{21}$,
- приливное трение $1{,}6 \cdot 10^{21}$,
- потенциальная гравитационная энергия – $0{,}7 \cdot 10^{21}$,
- тектонические процессы – $0{,}1 \cdot 10^{21}$,
- геохимические процессы – $0{,}23 \cdot 10^{20}$,
- планетарные геофизические процессы – $0{,}1 \cdot 10^{21}$,
- радиоактивный распад – $(1{,}4–3) \cdot 10^{21}$,
- кондуктивный тепловой поток через поверхность Земли – $0{,}8 \cdot 10^{21}$,
- солнечная радиация – $3{,}2 \cdot 10^{21}$.

Отсюда следует, что внешняя энергия передается на Землю различными способами, но в виде волн разных размеров и амплитуды. Одной из форм восстановления равновесия Земли являются землетрясения. Импульсный отклик самых сильных зарегистрированных на Земле землетрясений оценивается $\sim 10^{24}$–$10^{25}$ эрг. [4].

Сравнивая приведенные энергетические показатели, можно отметить, что даже в качестве теплопреобразующей биомассы энергетика человечества приобрела статус геологической силы, способной влиять на равновесие планеты. Например, если представить, что одновременно у всех людей поднялась температура тела на 1°, то в соответствии с расчетом по формуле (2) получим величину энергетического скачка $\sim 10^{20}$ или $10^{13}$дж., что эквивалентно одновременному включению нескольких тысяч мегаватт электростанций. А если сравнивать с потерей энергии вследствие приливного трения для среднего прилива [5], равной $2{,}6 \cdot 10^{19}$ эрг/с, то становится явной сопоставимость этих энергетических уровней.

Проведем анализ изменения энергетических параметров взаимодействия, возникающего при неравномерном распределении населения на поверхности планеты. С этой точки зрения китайская территория, имея самую большую плотность населения, несет большую ответственность перед человечеством, так как только по тепловому признаку эта энергия сопоставима с геологическими и космофизическими составляющими обменных процессов планетарного масштаба (1/4 от общей $Q$).

Отсюда следует, что появление новой геологической силы вынуждает человечество грамотно и с уважением относиться ко всем ее составляющим как по фазовому признаку, так и по спектральному составу системы «воздействие – отклик». Если учитывать электрохимические процессы жизнеобеспечения каждого организма, то баланс потребления и преобразования энергии должен учитывать обменные процессы между природопользователем и окружающей средой. Предложенные математические модели [6, 7] учета влияния живой материи в органическом круговороте не содержат переменных, описывающих влияние человеческого фактора на энергетический баланс.

Рассмотрим некоторые особенности проявления этого влияния на основные фазы окружающей нас среды: воздушный бассейн, гидросферу, минеральное вещество и электромагнитно-активную среду.

Состояние воздушного бассейна определяется концентрацией основных газов жизнеобеспечения – кислорода и продукта его окисления диоксида углерода. Природный баланс $CO_2$ поддерживается деятельностью растений и растворением его в океанах и в водных растворах почвогрунтов. В крупных мегаполисах, особенно в зимнее время, возникает концентрационная перенасыщенность атмосферы диоксидом углерода. Тогда можно ожидать в силу изменения физических свойств атмосферного воздуха (коэффициента преломления, скорости звука) изменение спектрального состава отклика на кос-

мофизические воздействия. Так, для электромеханических взаимодействий мы получим смещение спектра взаимодействия в сторону высоких частот: для воздуха $\nu_в$ составит $8{,}98 \cdot 10^5$ Гц, для диоксида углерода – $11{,}72 \cdot 10^5$ Гц.

Те же соотношения для механических волн [8] дают колебания в диапазоне частот тектоносферы:

$$\nu = \frac{V_1 - V_2}{V_2} = \frac{334 - 256}{256} = 0{,}3 \text{ Гц},$$

где $\nu$ – частота взаимодействия; $V_1$, $V_2$ – скорости распространения волн в воздухе и диоксиде углерода соответственно.

Водные растворы пересыщенных углекислым газом почвогрунтов и водоемов изменят также спектральный состав отклика на это воздействие, например, для механических волн частота отклика будет составлять 4,86 Гц, т.е. на 1,36 Гц выше равновесного состояния. Для человеческого организма такие смещения приведут к изменению осмотического давления в межклеточном и внутриклеточном пространствах, что мы и наблюдаем в крупных городах в виде гипо- и гипертонических кризов.

Для минерального вещества человеческого организма, состоящего преимущественно из жидкокристаллических структур (кровь, мозг, лимфа, костная ткань), откликом на изменение внешнего воздействия являются процессы поляризации, влияющие на электрохимический обмен организма. Кроме того, скачкообразно может меняться напряженность электрического поля особенно в период прохождения магнитных бурь.

Известно [9], что напряженность электрического поля у поверхности Земли при электрически спокойной атмосфере колеблется около 100 В/м. При такой средней напряженности поля если силовые линии заканчиваются на острие (волосы, пальцы и т.п.) резко возрастает локальный заряд, который может достигнуть значений 1010–1012 В. Этого вполне достаточно для возникновения эффекта автоэлектронной эмиссии индивидуального организма. А если такие излучатели имеют численность больше одного миллиона, суммарный заряд возрастает на несколько порядков. Результатом таких накоплений могут являться участившиеся над крупными городами молниеподобные разряда без грома. Это новое явление, возникающее только в атмосфере густонаселенных участков планеты.

Таким образом, неполный анализ причинно-следственных взаимосвязей в системе «человек – среда» позволяет сделать вывод о том, что современное человечество уже превратилось в активную геологическую силу, изучение которой может позволить грамотно осуществлять зондирование состояния поверхностного слоя Земли и ее обитателей.

**Список литературы**

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Справочник по физике. М.: Наука., 1984, 942 с.
2. Кошкин И.И. Элементарная физика: справ. М.: Наука, 1991. 262 с.
3. Курскеев А.К. Проблемы прогноза землетрясений. Алма-Ата: Наука, 1990. 264 с.
4. Беньофф Г. Слабые землетрясения. М.: ИЛ, 1961. 220 с.
5. Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: СО РАН. Вып. 799, 1984. 192 с.
6. Костицин В.А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука, 1984. 96 с.
7. Шулейкин В.В. Взаимодействие звеньев в системе «океан – атмосфера – материки». Л., 1970. 29 с.
8. Красильников В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М., 1960. 560 с.

УДК 528.8.04, 528.88

**В.Ф. Мочалов, Д.В. Жуков, Е.И. Астахова**
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vicavia@yandex.ru

# ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМА ВЫБОРКИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА

Представлены требования к объему наземных спектрометрических измерений. Результаты измерений используются для формирования спектральных признаков идентификации элементов ландшафта. Рассмотрены труднодоступные территории с ярко выраженной сезонной и пространственной изменчивостью отражательных характеристик основных видов растительных сообществ.

*Ключевые слова: мульти- и гиперспектральная аэрокосмическая съемка, технология обработка материалов съемки, спектральные признаки идентификации, виды растительных сообществ.*

В настоящее время для решения задач народно-хозяйственных отраслей промышленности все более активно привлекаются технологии дистанционного зондирования Земли, в частности методы сбора и обработки материалов много- и гиперспектральной аэрокосмической съемки. Тематическая обработка таких материалов основана на анализе отражательно-излучательных характеристик объектов интереса в разных спектральных диапазонах и, как правило, требует наличия устойчивых спектральных признаков, по которым объект интереса уверенно идентифицируется. Поиск этих признаков возможно осуществить только при наличии наземных измерений спектральных сигнатур интересующих элементов ландшафта и сопутствующих фонов.

Вместе с тем наземные измерения спектральных сигнатур земной поверхности являются трудоемким процессом, особенно при необходимости проведения таких исследований на удаленных от дорожной сети, неосвоенных территориях, как, например, Арктическая зона. При измерении спектральных характеристик растительного покрова в таких районах дополнительную сложность создают разнообразие типовых растительных сообществ, а также сезонная изменчивость их спектральных сигнатур. Первый фактор обуславливает необходимость длительных пеших переходов от одного района проведения измерений к другому в условиях труднопроходимой местности, второй – высокую периодичность проведения таких работ. При этом практическая значимость таких исследований заключается в том, что с их помощью возможно будет получить необходимые данные которые в последствии будут использоваться в алгоритмах автоматизированной обработки материалов много- и гиперспектральной аэрокосмосъемки при идентификации видов растительных сообществ и определения их качественного состояния. В дальнейшем это позволит решить ряд важных задач, наиболее значимыми из которых являются:

- анализ влияния изменения климата на состояние растительных сообществ;
- оценивание состояния и динамики изменения кормовой базы для северных оленей;
- контроль возможного неблагоприятного антропогенного воздействия на растительность тундры.

© Мочалов В.Ф., Жуков Д.В., Астахова Е.И., 2019

Таким образом, актуальной является проблема обоснования минимального объема выборки наземных спектрометрических измерений с учетом технических характеристик бортовой съемочной аппаратуры, привлекаемой к решению соответствующей тематической задачи, а также геометрических параметров районов произрастания типовых растительных сообществ. Обозначенная проблема может быть решена с помощью метода статистической обработки архивных материалов съемки, который позволяет определить необходимый объем измерений для достижения требуемого уровня достоверности полученных результатов. В настоящее время по итогам применения этого метода для участка местности острова Колгуев, Баренцево море, были сформированы требования к геометрическим характеристикам элементов ландшафта с однородными спектральными отражательными характеристиками, периодичности и срокам выполнения измерений. На основе полученных данных в дальнейшем планируется разработать методики наземных измерений спектральных сигнатур различных объектов ландшафта.

Для решения задач классификации и оценки состояния растительности характерной для полярной и субполярной климатических зон в качестве индикаторов обычно выделяются специфические, характерные виды растительных сообществ. Так для анализа изменения климата могут выделяться: кустарниковая тундра (ST), влажные кислые тундры (MAT), влажные некислые тундры (MNT), мшистая тундра (MT) [1]. Процесс идентификации и оценивания состояния растительности в части кормовой базы северных оленей может быть основан на использовании технологии автоматизированной обработки материалов съемки [2]. При этом учитывается состояние растительных сообществ, пригодных для питания в зимних, демисезонных и летних условиях.

Возможное неблагоприятное антропогенное воздействие на растительность тундры оценивается, как правило, в районах активной хозяйственной деятельности, где отслеживается динамика изменения растительных сообществ.

Предлагается следующая методическая схема работ по обоснованию объема выборки наземных спектрометрических измерений. Схема предусматривает выполнение следующих операций:

- выбор зоны интересов с учетом имеющихся материалов геоботанического описания и подбор архивных материалов съемки;
- определение по материалам съемки спектральных отражательных характеристик элементов ландшафта условно однородных участков местности;
- определение статистических параметром спектральных характеристик и оценивание требуемого количества спектрометрических наземных измерений;
- разработка детальной пространственной схемы точек для выполнения наземных измерений;
- анализ имеющихся данных о динамике изменения отражательных характеристик растительности в вегетативный период, обоснование календарных сроков и частоты выполнения наземных спектрометрических измерений.

Предложенная методическая схема применялась для обоснования объема и мест наземных измерений. При этом учитывались данные геоботанического описания [3]. В качестве архивных материалов съемки использовались данные, полученные космическим аппаратом Sentinel-2 (*S2A MSIL2A 20180820T083601 N0206 R064_T38WPB 20180820T105651.SAFE_30m*).

Фрагмент выбранного участка местности и точки, для которых определены спектральные отражательные характеристики растительности, приведены на рис. 1. Аналогичные участки местности с условно однородными видами растительности в последствии необходимо выбрать для каждого анализируемого вида растительных сообществ или их сочетаний. Каждый квадрат, обозначенный точками, имеет размеры примерно 30х30 метров, что соответствует пространственному разрешению на местности материалов космической съемки Sentinel-2.

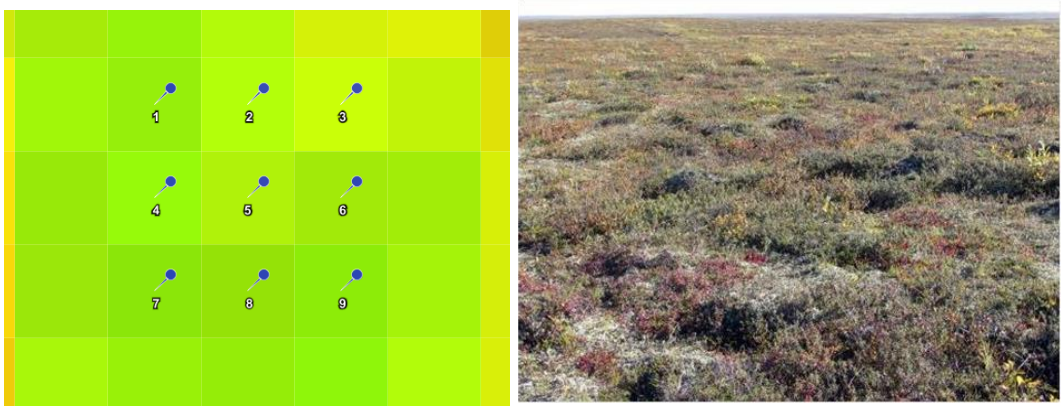



Рис 1. Фрагмент материалов съемки в условных цветах (слева),
фото растительности участка (справа)

Числовые значения спектральных характеристик (коэффициентов спектральной яркости), рассчитанные с помощью программного комплекса SNAP, приведены в таблице. Минимальное число наземных измерений для обеспечения требуемого уровня качества обучающей выборки с надежностью 90 % определено в соответствии с [4]. При этом принималось во внимание, что средняя квадратичная погрешность среднего арифметического равна средней квадратичной погрешности отдельного результата, деленной на корень квадратный из числа измерений (*n*).

Таблица

Исходные данные и результаты расчета объема выборки

| Каналы | Значения коэффициентов спектральной яркости в обозначенных точках | | | | | | | | | Коэффициент вариации | *n* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| B3 | 0,036 | 0,036 | 0,042 | 0,044 | 0,043 | 0,036 | 0,036 | 0,038 | 0,038 | 0,832 | 20 |
| B4 | 0,072 | 0,068 | 0,070 | 0,065 | 0,070 | 0,072 | 0,057 | 0,062 | 0,064 | 0,737 | 3 |
| B5 | 0,132 | 0,134 | 0,134 | 0,132 | 0,134 | 0,134 | 0,115 | 0,120 | 0,120 | 0,599 | 2 |
| B6 | 0,174 | 0,177 | 0,177 | 0,174 | 0,177 | 0,177 | 0,168 | 0,171 | 0,171 | 0,186 | 1 |
| B7 | 0,206 | 0,207 | 0,207 | 0,206 | 0,207 | 0,207 | 0,192 | 0,205 | 0,205 | 0,241 | 1 |
| B8 | 0,282 | 0,255 | 0,238 | 0,279 | 0,284 | 0,283 | 0,233 | 0,256 | 0,279 | 0,763 | 4 |
| B8A | 0,291 | 0,290 | 0,290 | 0,291 | 0,290 | 0,290 | 0,246 | 0,279 | 0,279 | 0,512 | 1 |
| B11 | 0,253 | 0,249 | 0,249 | 0,253 | 0,249 | 0,249 | 0,260 | 0,264 | 0,264 | 0,247 | 1 |
| B12 | 0,151 | 0,145 | 0,145 | 0,151 | 0,145 | 0,145 | 0,160 | 0,156 | 0,156 | 0,383 | 1 |

Анализ содержания таблицы позволяет сделать вывод, что выбранный участок местности характеризуется невысоким разбросом спектральных отражательных характеристик. Наибольшее отклонение от математического ожидания наблюдается в спектральном канале B3. Минимальное количество наземных измерений для данного вида растительного сообщества соответствует 20.

Таким образом, для достижения заданной надежности, необходимое количество наземных измерений в точках, указанных на рис. 1, можно задать равным восемнадцати. Из этого следует, что в каждой приведенной точке необходимо провести по два измерения.

Обоснование сроков и частоты пополнения наземных работ осуществлялось на основе анализа данных об изменении значения индекса NDVI для различных видов растительных сообществ, приведенных на рис. 2 [1].

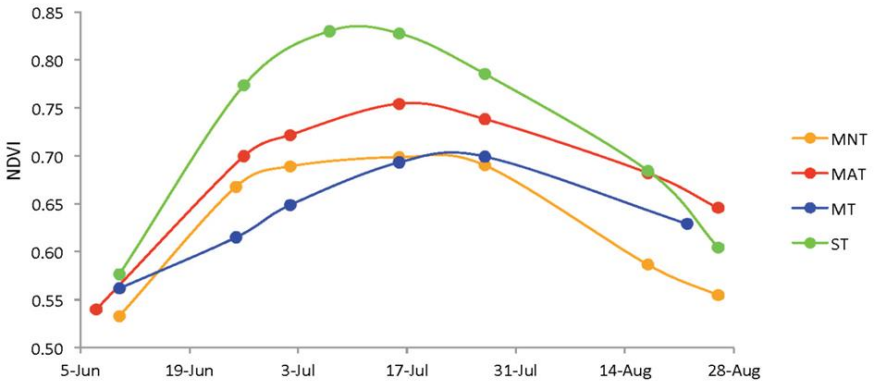



Рис. 2. Изменения вегетационного индекса в вегетативный период

Анализ хода кривых, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод, что измерения для конкретной территории целесообразно проводить с начала июня по конец августа. Например, в первой половине августа для отслеживания интенсивного уменьшения вегетативного индекса периодичность наземных измерений должна составлять как минимум один раза в пять дней. Для выявления максимума в значении индекса необходимо провести не менее четырех измерений в первой и второй декадах июля.

Таким образом, на основе статистической обработки спектральных отражательных характеристик отдельных видов растительных сообществ тундры обоснован объем выборки, сроки и точки наземных спектрометрических измерений. Предложенный подход призван обеспечить требуемый уровень качества формирования обучающей выборки для автоматизированной идентификации элементов ландшафта. Наземные спектрометрические измерения необходимо сопровождать углубленным геоботаническим описанием растительности в выбранных точках.

**Список литературы**

1. Differentiating among four Arctic Tundra plant communities at Ivotuk / Sara N. Bratsch 1, Howard E. Epstein 1, Marcel Buchhorn 2,3 and Donald A. Walker 2 // Alaska Using Field Spectroscopy Remote Sens. 2016. № 8 (1). P. 51. URL: https://doi.org/10.3390/rs801005.

2. Intelligent technologies and methods of Tundra Vegetation properties detection using satellite multispectral imagery / V. Mochalov, O. Grigorieva, V. Zelentsov, A. Markov, M. Ivanets // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer Nature Switzerland AG 2019 R. Silhavy (Ed.): CSOC 2019, AISC 986, pp. 234–243, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19813-8_24.

3. Анализ динамики состояния растительности тундры на основе комплексной обработки материалов много- и гиперспектральной космической съемки / В.Ф. Мочалов, О.В. Григорьева, И.Ю. Пиманов, И.А. Лавриненко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018.

4. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. М.: Наука, 1968.

УДК 528.88

**Д.Ю. Панов, Е.Ю. Сахарова, А.Е. Воронова**
Младший научный сотрудник, Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»,
Новосибирск, Россия
e-mail: panovdeny@yandex.ru, sakharova@rcpod.ru, 35voran@gmail.com

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Рассмотрена возможность использования радарных космических снимков для прогнозирования урожайности яровой пшеницы на примере двух хозяйств Новосибирской области. Выявлена зависимость нормализованного относительного вегетационного индекса, полученного по данным Terra (MODIS), и радарного вегетационного индекса по данным Sentinel-1 (SAR). Выполнен регрессионный анализ индексов и проведено сравнение прогноза урожайности, полученного по данным радиолокационной съёмки, с фактическими наземными данными.

*Ключевые слова: радарный вегетационный индекс, RVI, Sentinel-1, прогнозирование урожайности.*

**Введение.** В сфере сельского хозяйства получение достоверной информации о состоянии сельскохозяйственных угодий на обширных территориях является актуальной задачей, решение которой стало возможным благодаря использованию дистанционных методов наблюдения. Применение спутниковых данных обеспечивает объективный контроль динамики роста и развития посевов, прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, оценку реакции растений на воздействие внешних факторов.

В Сибирском центре ФГБУ «НИЦ "Планета"» с 2005 г. реализуется система регионального мониторинга земель сельскохозяйственного назначения южных регионов Западной Сибири, обеспечивающая прогнозирование урожайности и оценку состояния посевов зерновых культур. Выполнение работ по многолетнему прогнозированию ожидаемой урожайности позволило сформировать обширную базу знаний, которая включает в себя архив измеренных вегетационных индексов для тестовых полей, статистические значения урожайности, базу данных метеорологических параметров, планы размещения культур и т.д. [1].

В системе регионального мониторинга сельскохозяйственных земель перспективным направлением является исследование возможности привлечения радиолокационных данных [2]. Независимость получения информации от погодных условий – главное преимущество радиолокационной съемки, которое может быть использовано для улучшения показателей прогноза урожайности.

**Исходные данные.** Посевные площади Новосибирской области составляют порядка 2,3 млн га. На территории области расположено около 80 тестовых хозяйств, которые отличаются климатическими и почвенными параметрами, особенностями проводимых агротехнических мероприятий и урожайностью культур.

Для исследования было выбрано 26 полей, засеянных яровой пшеницей, в двух тестовых хозяйствах Коченевского района: ЗАО «Чистополье» и ЗАО «Коченевская птицефабрика». Управлением сельского хозяйства Коченевского района были предоставлены планы расположения культур, информация о датах проведения посевных и уборочных работ, а также данные о фактической урожайности пшеницы.

В качестве спутниковых данных использовались космические снимки КА Terra (MODIS) из архива Сибирского центра ФГБУ «НИЦ "Планета"» и радарные данные

© Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю., Воронова А.Е., 2019

КА Sentinel-1 (SAR) из открытого интернет-ресурса Copernicus Open Access Hub ESA, включающие в себя спутниковые изображения в поляризациях VV и VH.

**Исследование и результаты.** Для каждого отдельного поля в оперативном режиме за вегетационный период с 1 июня по 20 июля 2018 г. по данным MODIS были рассчитаны значения нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) [3], которые использовались при расчете основного прогноза урожайности пшеницы.

Данные спутника Sentinel-1 прошли предварительную обработку в программном комплексе SNAP, включающую в себя следующие процессы: радиометрическая калибровка изображений, фильтрация спекл-шума, коррекция за влияние рельефа (SRTM).

Значение радарного вегетационного индекса (RVI) рассчитывается по усеченной формуле с использованием двух поляризаций [4]:

$$RVI_{VV} = \frac{4\sigma_{VH}}{\sigma_{VV} + \sigma_{VH}},$$

где $\sigma VH$, $\sigma VV$ – калиброванные радиолокационные изображения с поляризациями VH, VV.

Вычисленные радарные индексы по тестовым полям в ЗАО «Чистополье» продемонстрировали высокую корреляцию со значениями NDVI, полученными за те же даты съемки, что и RVI. Коэффициент корреляции превысил значение 0,9. Регрессионный анализ показал наличие статистически значимой связи линейного характера между значениями RVI и NDVI (рисунок). Коэффициент детерминации составил 0,9, стандартная ошибка – 0,06.

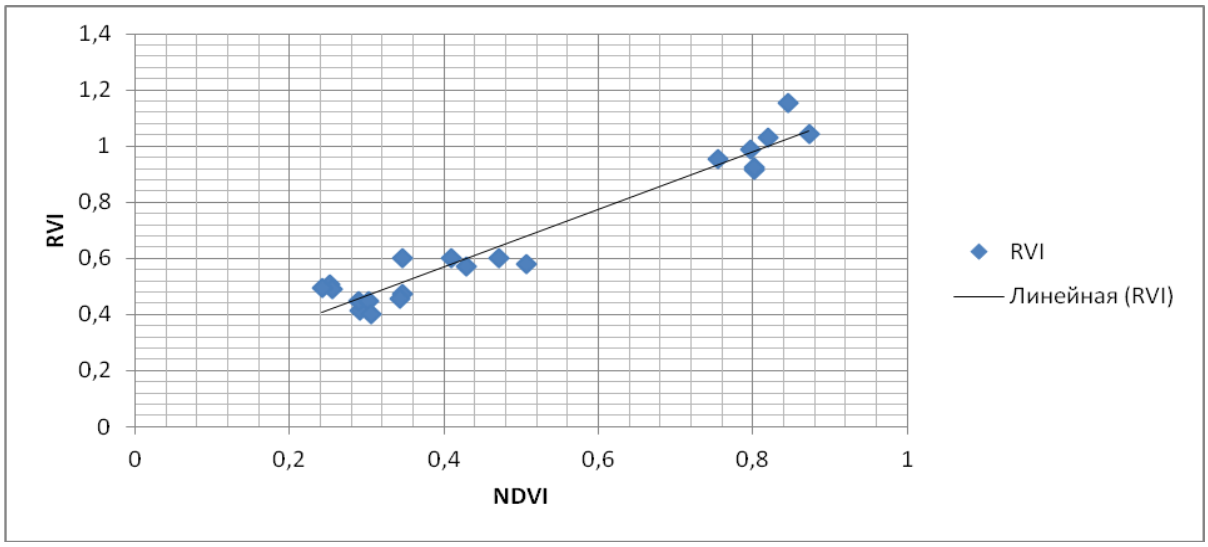



Рисунок. Диаграмма рассеяния и линия регрессии, построенная по данным хозяйства ЗАО «Чистополье» за вегетационный период 2018 г.

По коэффициентам линейной регрессии был произведен расчет NDVI для хозяйства ЗАО «Коченевская птицефабрика». Среднеквадратическое отклонение величины найденного NDVI от фактического значения индекса, рассчитанного по данным MODIS, составило 0,087.

Расчет ожидаемой урожайности осуществлялся с использованием адаптированной к агроклиматическим условиям исследуемого региона имитационной модели SDIM [5]. Основным параметром для вычисления прогноза урожайности в данной модели служит вегетационный индекс. Кроме этого вводятся климатические параметры: максимальная и минимальная температуры воздуха, суммарные суточные осадки, относительная влажность воздуха, средняя скорость ветра, суммарная солнечная радиация, а также даты проведения посевных и уборочных работ.

Для проверки достоверности полученных оценок была рассчитана степень соответствия прогнозируемой урожайности фактическим данным объемов собранной пшеницы, результаты представлены в таблице.

Таблица

Средние значения урожайности яровой пшеницы

| Хозяйство | Урожайность, ц/га | | Оправдываемость прогноза, % |
|---|---|---|---|
| | Прогноз | Факт | |
| ЗАО «Чистополье» | 19,9 | 175 | 86 |
| ЗАО «Коченевская птицефабрика» | 20,8 | 18 | 84 |

**Выводы.** Результаты проведенного исследования показали, что радарный вегетационный индекс может быть использован для мониторинга темпов роста и прогнозирования урожайности яровой пшеницы. Найдены коэффициенты регрессионной модели зависимости RVI и NDVI, дана оценка ожидаемой урожайности при помощи имитационной модели SDIM, оправдываемость прогноза составила 84 %. Перспектива дальнейшего исследования состоит в изучении возможности использования радиолокационных данных при прогнозировании урожайности других зерновых культур.

**Список литературы**

1. Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири / Л.А. Сладких, М.Г. Захватов, Е.И. Сапрыкин, Е.Ю. Сахарова // Геоматика. 2016. № 2 (31). С. 39–48.

2. Мышляков С.Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2016. № 2 (31). С. 16–24.

3. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering // Third ERTS Symposium, NASA SP-351. 1973. Vol. 1. P. 309–317.

4. S Dinesh Kumar, S Srinivasa Rao, J R Sharma. Radar vegetation index as an alternative to NDVI for monitoring of soyabean and cotton // Indian Cartographer. 2013. Vol. 33. P. 91–96.

5. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В. Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности // ГЕО-Сибирь. 2005. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли: сб. материалов науч. конгр. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). Новосибирск. СГГА. 2005. Т. 5. С. 218–223.

УДК 537.86

**В.Г. Подопригора[1, 3], А.В. Сорокин[2],**
**Д.С. Макаров[2], Д.В. Харламов[2]**

[1] Институт физики им. А.В. Киренского, СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия
[3] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: podoprigora46@gmail.com

# АНИЗОТРОПИЯ КРОН ДРЕВОСТОЯ И РАССЕЯНИЕ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1

Рассмотрена модель взаимодействия сигналов навигационных спутников с кроной дерева. Показан вклад анизотропии диэлектрической проницаемости в сечение рассеяния радиоволн, обусловленный ориентационной упорядоченности ветвей. Представлен расчет сечений рассеяния для малых и больших элементов. Введен тензор ориентационной упорядоченности ветвей дерева с разделением на ярусы, отличающиеся величиной и ориентацией элементов. Проведены тестовые измерения сигналов навигационных спутников, прошедших через кроны елей.

*Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, анизотропия, сечение рассеяния, тензор ориентационной упорядоченности, спутниковый сигнал.*

**Введение.** Исследование распространения импульсных сигналов навигационных спутников (НС) в лесу имеет целью расширение понимания характера взаимодействия поляризованных когерентных электромагнитных волн (ЭМВ) излучения диапазона частот 1-2 ГГц с разномасштабными элементами деревьев и древостоя в целом. Сложность применения разных моделей взаимодействия ЭМВ с лесным пологом обусловлена зависимостью результатов от большого числа входных параметров, включая заметную зависимость диэлектрической проницаемости древесины от влажности и разнообразие размеров и форм элементов лесной среды. Соотношения длины волны сигналов НС с размерами многообразных структурных элементов леса имеют диапазон от много меньших единицы для листьев и хвои, сравнимых с единицей для диаметров стволов и ветвей и много больших единицы для неравномерно распределенных групп деревьев. Это приводит к множеству механизмов взаимодействия и приближений, частично представленных в обзорах [1–3]. Слой стволов имеет практически идеальную ориентационную упорядоченность относительно вертикали. Слой крон, образованный ветвями разных диаметров и длин, листьями и хвоей, частично упорядочен в пространстве, имеет изменяющуюся с высотой плотность биомассы и степень упорядоченности. Поэтому разработка рефракционной модели древостоя предполагает учет распределения объемной плотности биомассы и ориентационную упорядоченность стволов и ветвей крон.

**Ослабление сигналов НС в древостое.** Любому дереву определенного вида и возраста присущи типовые структурные характеристики: форма и размер кроны, высота и диаметр ствола, расположение и ориентация больших и малых ветвей, листьев и хвойных иголок. В настоящей работе модель дерева описывается совокупностью канонических элементов, распределенных по разным слоям (ярусам). Стволы и ветви моделируются цилиндрами конечной длины, листья и иглы представляются диэлектрическими эллипсоидами. Для радиочастот навигационных спутников (1,2–1,6 ГГц) элементы дерева достаточно прозрачны, прошедшее и рассеянное излучение реагирует на анизотропию древесины и ориентационную упорядоченность стволов и ветвей [1].

© Подопригора В.Г., Сорокин А.В., Макаров Д.С., Харламов Д.В., 2019

Вывод выражений для рассеяния радиоволн диэлектрическими эллипсоидами основывается на обобщенном приближении Рэлея – Ганса – Дебая (РГД), которое требует выполнения ограничения

$$k_0 d\,|\sqrt{\varepsilon}-1| << 1, \tag{1}$$

где $k_0 - 2\pi/\lambda$ – волновой вектор в свободном пространстве; $d$ – наименьшая ось эллипсоида; ε – диэлектрическая проницаемость. Выражение (1) подразумевает, что рассеиватель частично пропускает зондирующую волну.

Поскольку размеры крупных элементов дерева (ствол, ветви) в рассматриваемом L-диапазоне частот соизмеримы с длиной волны радиоизлучения ($\lambda \sim 18-20$ см), сечения рассеяния при произвольных углах падения рассчитывались с использованием дифракционной модели для бесконечных и конечных цилиндров [2, 3]. В этой модели единственным ограничением на размеры цилиндра является

$$h >> r, k_0 h >> 1, \tag{2}$$

где $h$ и $r$ – высота и радиус цилиндра соответственно.

Известно [5], что рассеяние электромагнитных волн можно интерпретировать в терминах малоамплитудных флуктуаций ориентаций рассеивающих объектов. В этом случае дифференциальное сечение рассеяния σ на единицу объема рассеяния в единице телесного угла $\Omega$ на единицу изменения угловой частоты ω запишется в виде

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\omega} = \pi^2\lambda^{-4}\int\int_{-\infty}^{+\infty}\left\langle\delta\varepsilon^2\right\rangle\exp\left[i\left(\bar{q}\bar{r}-\omega t\right)\right]drdt\,, \tag{3}$$

где $\lambda = \dfrac{2\pi c}{\omega_0}$ – длина волны в вакууме; $\bar{q}$ – волновой вектор, $\left\langle\delta\varepsilon^2\right\rangle = \left\langle\delta\varepsilon(0,0)\delta\varepsilon(r,t)\right\rangle$ – средняя квадратичная диэлектрическая проницаемость в данной точке $\bar{r}$ в данное время $t$.

Для волнового вектора $q$ и частоты ω дифференциальное сечение рассеяния на единицу объема имеет вид [5]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\pi^2}{\lambda^4}\left\langle\delta\varepsilon^2\right\rangle_q = \frac{4\pi^2}{q\lambda^4}\left(\Delta\varepsilon\right)^2\left\langle S_{ij}^2\right\rangle_q\,, \tag{4}$$

где $\delta\varepsilon = \varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i$; $\bar{\varepsilon}$ – средняя диэлектрическая проницаемость; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ – анизотропия ε между направлениями вдоль и поперек ствола в случае, когда рассеиватели параллельны друг другу; $S_{ij}$ – компоненты тензора ориентационной упорядоченности. Формула (4) справедлива, если мнимая часть ε много меньше действительной части. Элементы тензора $S$ ориентационной упорядоченности имеют вид

$$S_{ik} = \frac{1}{N-1}\sum^{N-1}\frac{1}{2}\left(3e_\alpha^i e_\beta^k - \delta_{ik}\right), \tag{5}$$

где $N$ – количество ветвей; $e_\alpha^i$ – $i$-я компонента единичного вектора $\bar{e}$ вдоль направления α-й ветви; $\delta_{ik}$ – символ Кронекера. Три собственных значения тензора $S_{ij}$ являются параметрами ориентационного упорядочения, причем максимальное собственное значение соответствует параметру порядка $S$, стандартно определяемому в теории жидких кристаллов и полимеров [6–7].

Тензоры $\left\langle S_{ij}\right\rangle$ и $\left\langle S_{ij}^2\right\rangle$ могут быть рассчитаны как для малых веточек и иголок, ориентированных под определенными углами к крупным ветвям, так и для основных несущих крону ветвей и всего дерева, разбитого на ярусы. Ярус содержит области ветвей с одинаковым углом наклона θ от вертикали. Этот угол от яруса к ярусу изменяться

от 20 до 120°. Например, для третьего яруса с углом наклона ветвей θ = 90° диагональные элементы тензора ориентационной упорядоченности равны

$$\langle S_{xx} \rangle = \langle S_{yy} \rangle = \frac{2}{8}, \langle S_{zz} \rangle = -\frac{4}{8}.$$

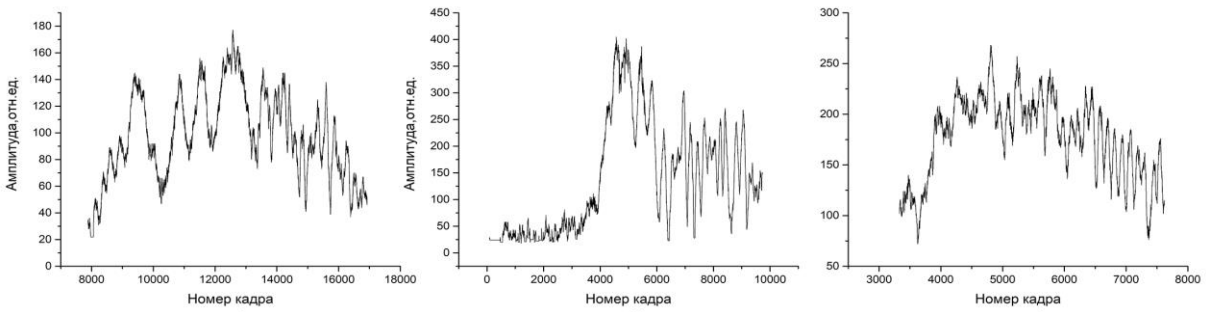
Недиагональные элементы тензора равны нулю из-за аксиальной симметрии кроны. Недиагональной компоненты тензоров $\langle S_{ij}^2 \rangle$ не обращаются в общем случае в ноль и могут проявляться в элементах тензора рассеяния при поляризационных измерениях.

Экспериментальные данные о зависимости элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости древесины $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ разных видов леса от влажности и температуры для радиочастот в диапазоне 20-1011 Гц представлены в монографии [4]. Различие диэлектрических свойств древесины наблюдается для ориентаций вектора напряженности электрического поля вдоль волокон (ствола) в радиальном и тангенциальном направлениях. В практических приложениях используются элементы тензора, соответствующие продольному и поперечному направлениям древесины.

Смешение слоёв стволов и крон с известным распределением анизотропии по вертикали дает возможность определить анизотропию комплексной эффективной диэлектрической проницаемости слоистой модели древостоя в целом. Реальный древостой состоит из упорядоченных, как правило, по вертикали стволов с параметром порядка $S = 1$.

Кроны имею протяженность по вертикали меньшую, чем стволы. Доля объема биомассы кроны составляет 0,1–0,2 от объема дерева. Ориентационный параметр ветвей от значений 0,8–0,9 в верхних ярусах уменьшается к нижним практически до нуля. Это обстоятельство с учетом области взаимопроникновения слоя стволов и крон даёт возможность сделать модельные оценки вертикальной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости древостоя в целом.

**Радиопросвечивание крон.** Использование сигналов НС предоставляет реальную возможность получить «анизотропный портрет» дерева в варианте радиопросвечивания. На рисунке представлены временные зависимости амплитуды сигналов трех НС, зарегистрированных антеннами после прохождения двух елей с развитыми кронами. Рисунки *а* и *б* соответствуют взаимно ортогональным вариантам просвечивания, высота расположения антенн 6 м, на рисунке *в* – антенна находилась на высоте 9,5 м в плоскости с антенной *а*.




*а* *б* *в*

Рисунок. Зависимости амплитуд сигналов НС, ослабленных прохождением в кронах елей:
*а* – ГЛОНАСС 19 , *б* – ГЛОНАСС 3; *в* – спутник ГЛОНАСС 17

Импульсное излучение с правой круговой поляризацией проходит сквозь ели, ослабляется в результате рассеяния и частичного поглощения. Прошедшие сигналы регистрировались штатным приемником сигналов НС с право круговыми антеннами. Анизотропия древесины и рассеяние на элементах деревьев, интерференционные эф-

фекты когерентного излучения на пространственных диэлектрических неоднородностях формируют ЭМВ сложной пространственно-временной структуры. Дальнейшие экспериментальные исследования и варианты моделей взаимодействия сигналов НС предполагают проведение поляризационных измерений, использование разных проекций радиопросвечивания и восстановление распределения пространственной структуры диэлектрической проницаемости.

**Список литературы**

1. Попов В.И. распространение радиоволн в лесу. М.: Горячая линия «Телеком», 2015. 392 с.

2. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1285–1311.

3. Ulaby F.T., Tavakoli A. Senior T.B.A. // IEEE Trans. 1987. V. GRS-25. P. 714–719.

4. Torgovnikov G.I. Dielectric properties of wood and wood based materials. Berlin: Springer – Verlag, 1993. 194 p.

5. Новик С.Н., Завьялов А.С., Тельпуховский Е.Д. Электрофизические и. рассеивающие свойства элементов хвойного древостоя // Изв. вузов. Серия: Физика. 2006. Т. 49, № 7. С. 57–65.

6. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1980. 344 с.

7. Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и жидких кристаллов / отв. ред. В.А. Иванов. М.: Либроком, 2009. 696 с.

УДК 528.87, 528.88

**В.А. Пуртов, Н.С. Ремень, Е.М. Гуземина,**
**Е.И. Чупина, Д.В. Борисов**

АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им.В.И.Шпильмана», Тюмень, Россия
e-mail: ecolog@crru.ru, geoportal@crru.ru, guzemina@crru.ru, chupina@crru.ru, borisov@crru.ru

# МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРА С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В настоящее время, в условиях сильного техногенного воздействия на окружающую среду Западной Сибири, мониторинг посредством данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) должен быть основой для предотвращения негативных последствий производственной и хозяйственной деятельности человека, так как система мониторинга накапливает, упорядочивает и анализирует информацию. С 2007 г. сотрудники АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», используя накопленный практический опыт обработки космических снимков и многолетние результаты дешифрирования ДДЗЗ, ведут мониторинг объектов производственной инфраструктуры и земель, нарушенных вследствие деятельности человека, с применением геоинформационных технологий. Данные дистанционного зондирования Земли и их обработка являются неотъемлемой частью информационного и научно-аналитического сопровождения рационального недропользования и природопользования Югры.

*Ключевые слова: мониторинг, нарушенные земли, данные дистанционного зондирования Земли, геопортал, дешифрирование космических снимков, производственная инфраструктура.*

Согласно утвержденному государственному заданию, для мониторинговых работ выбраны следующие категории земель, утративших свою хозяйственную ценность или являющихся источником отрицательного воздействия на окружающую среду в связи с нарушением почвенного покрова, гидрологического режима и образования техногенного рельефа в результате производственной деятельности: нефтезагрязненные земельные участки (НЗУ); нарушенные земли в местах сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ); территории непроизводственной и промышленной инфраструктуры и др.

Мониторинг осуществляется с использованием космических снимков различного пространственного разрешения на местности со спутников: Landsat-7,8 (15 м, 30 м), Alos Prism (2,5 м), Rapideye (5 м), а также «Ресурс-П» (0,7 м) и «Канопус» (2 м, 10 м) [1]. Для обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования используются программный комплекс ENVI. Хранение, анализ и визуализация космической информации производятся в программном комплексе MapInfo Professional.

Космический мониторинг НЗУ. Общее количество НЗУ на территории округа, по результатам дешифрирования космических снимков за 2017 г., составляет 6 803 полигона с общей площадью 6 444,3га, а также были сняты с учёта 913 НЗУ общей площадью 741,3 га и отнесены в разряд рекультивированных земель. Лидирующие позиции по площадным и количественным показателям из года в год продолжают занимать Нижневартовский, Нефтеюганский и Сургутский районы автономного округа. Их доли в общем объёме площади нарушенных земель составили соответсвенно 44, 29 и 20 %.

© Пуртов В.А., Ремень Н.С., Гуземина Е.М., Чупина Е.И., Борисов Д.В., 2019

Данные показатели обусловлены наличием на территории районов основных нефтедобывающих участков недр с тремя крупными зонами нефтяных загрязнений автономного округа. Центры зон расположены в пределах Самотлорско-Вахской (Нижневартовский район), Мамонтовско-Балыкско-Петелинской (Нефтеюганский район) и Лянторско-Фёдоровской (Сургутский район) групп участков (рис. 1).

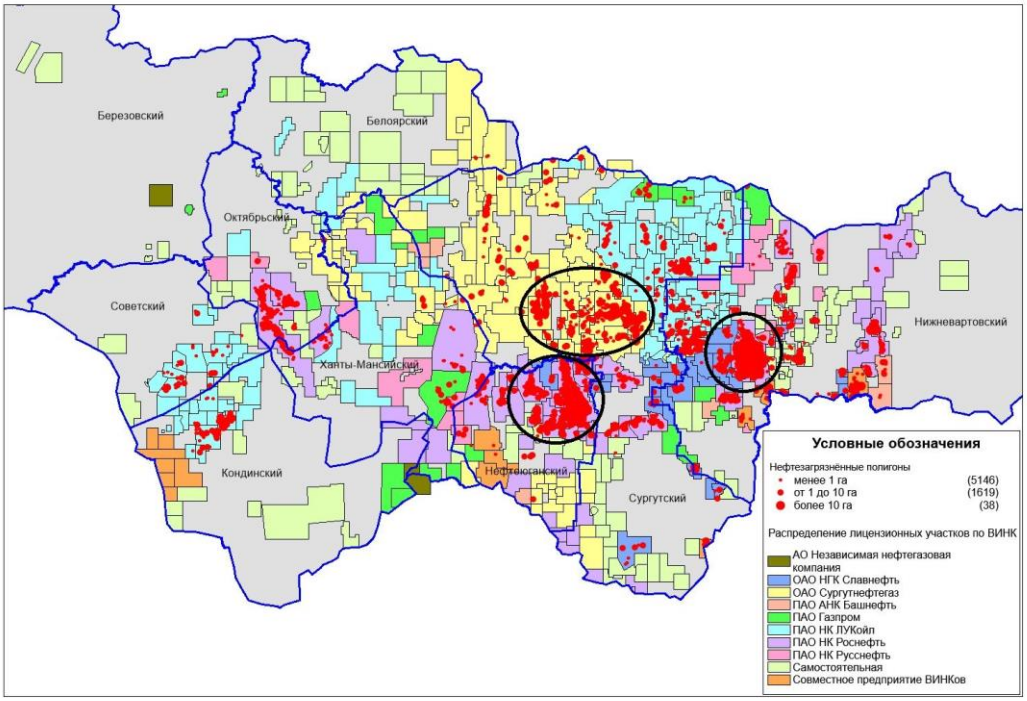



Рис. 1. Основные зоны нефтяных загрязнений на территории ХМАО – Югры (2017 г.)

Проведенная работа с предприятиями-недропользователями по уточнению количества и площадей нефтезагрязненных земель показывает совпадения данных до 74 % и выявление ранее не учтённых участков. Также наблюдается продолжение процессов сокращения площади нефтезагрязнений. Так, за четырёхлетний период общая площадь НЗУ автономного округа уменьшилась на 22,5 %, а за последний год снизилась на 12 %.

Космический мониторинг факельных установок. По данным ДЗЗ на 01.12.2018 на территории ХМАО – Югры дешифрированы 797 факельных установок с разной стадией функционирования: на 324 ФУ зафиксировано горение; на 473 ФУ горение отсутствует или невозможно определить состояние работы по метеоусловиям (высокий процент облачности космосъёмки). В результате дешифрирования нарушенных земель в местах сжигания ПНГ выделено 587 полигонов общей площадью 702 га. Наибольшее количество нарушенных участков выявлено в пределах Сургутского и Нижневартовского районов.

Мониторинг объектов производственной инфраструктуры. Анализ космических снимков (КС) и отчетов предприятий по объемам добычи нефти и газа позволяет выявить новые обустроенные лицензионные участки в ХМАО-Югре даже при отсутствии информации от недропользователей. В дальнейшем идет уточнение данных о фактическом наличии объектов обустройства. Линейные и площадные объекты инфраструктуры нефтедобычи достаточно четко отображаются на космических снимках в панхроматическом канале [2]. Различные варианты синтеза каналов одной сцены КС Landsat-8 позволяют достаточно четко отобразить наземные объекты инфраструктуры нефтедобычи в мультиспектральном изображении [3].

Для оперативной оценки произошедших изменений на территории лицензионного участка, выполняется процедура синтеза разновременных каналов. В результате синтеза каналов космических снимков с различной датой съемки, на разновременном композите в красном цвете отображаются новые объекты (рис. 2, *в*, *е*).

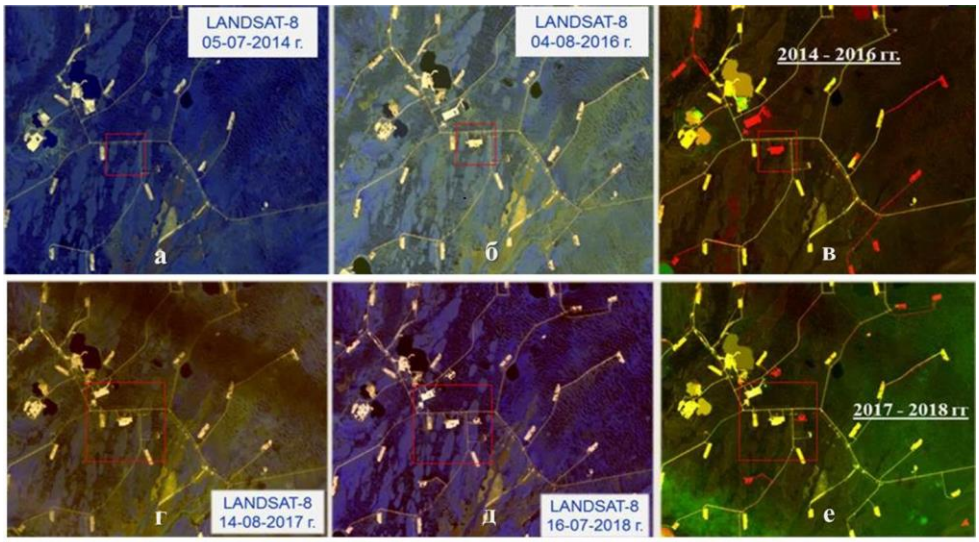



Рис. 2. Фрагменты КС Landsat-8: *а* – дата съемки 05.07.2014; *б* – дата съемки 04.08.2016; *г* – дата съемки 14.08.2017; *д* – дата съемки 16.08.2018; *в* – разновременной композит за период 2014–2016 гг.; *е* – разновременной композит за период 2017–2018 гг.

В результате анализа космических снимков Landsat-8 за 2017–2018 гг. и картографических материалов недропользователей в графические базы данных добавлены новые объекты: кустовые площадки и скважины (407 шт.); объекты сбора и подготовки нефти (9 шт.); межпромысловые нефтепроводы (9 шт., 168 км); железные дороги (6 шт., 393 км); региональные автодороги (9 шт., 1 377 км); межпромысловые автодороги (7 шт., 517 км); подъезды к кустам (428 шт., 868 км); автодороги без покрытия (1 шт., 9 км); зимники (11 шт., 65 км).

**Геоинформационный портал ЮГРА.** Результаты мониторинга в области природопользования и недропользования, полученные с помощью методов дешифрирования данных ДЗЗ интегрируются в геоинформационный портал ЮГРА. Пространственная информация сервиса представлена в виде тематических карт. Основное назначение Геопортала ЮГРА – обеспечить органы государственной власти и местного самоуправления автономного округа, компании – недропользователей и граждан пространственными данными для повышения оперативности и эффективности решения различных задач по управлению территорией ХМАО – Югры. Информация доступна на сайте центра рационального недропользования по адресам http://www.crru.ru/ и http://maps.crru.ru/.

**Заключение.** Мониторинговые работы ведутся с целью формирования баз данных, на основе которых формируются аналитические отчеты, даются практические рекомендации по предупреждению экологических проблем, разрабатываются технико-экономические обоснования развития региона, в том числе развитие объектов добычи и транспорта нефти и газа, контролируется строительство новых объектов производственной инфраструктуры, издаются тематические карты, атласы.

Актуальный космический снимок является независимым источником пространственного положения объекта и является неотъемлемой частью формирования и поддержания в актуальном состоянии различных баз данных. Доступность данных ДЗЗ позволяет оперативно и многократно получать качественную актуальную информацию для обширных территорий, что практически недостижимо при любых наземных обследованиях.

**Список литературы**

1. Космическая съемка Земли высокого и сверхвысокого разрешения // ГИС технологии: интеграция геоинформационных систем – Совзонд. URL: https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/ (дата обращения: 17.06.2019).

2. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие / О.С. Токарева; Том. политехн. ун-т. Томск, 2010. 148 с.

3. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ // GIS-Lab: Геоинформационные системы и Дистанционное зондирование Земли. URL: http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html (дата обращения: 17.06.2019).

УДК 502/504-547.596.2

**В.А. Рогов[1], Н.В. Кравченко[2], О.И. Багаева[3]**

[1] Доктор технических наук, [2] Кандидат технических наук, [3] Аспирант
Сибирский государственный университет им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: vishurenko.nataliya@yandex.ru

# АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ МЕГАПОЛИСА И ПРИГОРОДНЫХ ЗОН ЛЕСНОГО МАССИВА

Проведен мониторинг антропогенного влияния мегаполиса на выделение летучих веществ древесными растениями, ионизации воздуха в пригородных зонах лесного массива за период 1998–2018 гг. Выявлено снижение выделения летучих веществ древесными растениями, отрицательных ионов, повышение положительных ионов. Установлено, что антропогенные факторы (запыленность, загазованность, электромагнитные излучения) повышают на порядок количество положительных ионов. Проведены теоретические исследования, на основании которых получены детерменированные, дифференциальные уравнения влияния ионизации на запыленность, загазованность воздушной среды. Данные экспериментальных и теоретических исследований позволят разработать мероприятия по снижению антропогенных факторов на окружающую среду, что улучшит экологическую обстановку, снизит заболеваемость жителей мегаполиса.

*Ключевые слова: воздушная среда, антропогенные факторы, летучие вещества, отрицательные, положительные ионы, лесной массив, мегаполис, древесные растения.*

Пригородные и парковые зоны являются легкими мегаполиса, влияющими на очистку его воздушной среды. Положительный эффект достигается за счет выделения летучих веществ и отрицательных ионов. Одной из причин повышения заболеваемости жителей мегаполиса является его антропогенное воздействие, оказывающее отрицательное влияние на физические и химические свойства воздушной среды пригородных зон лесного массива.

До настоящего времени не проводились исследования и мониторинг влияния антропогенных факторов на выделение древесными растениями летучих веществ и природной ионизации воздуха. Полученные результаты мониторинга показали снижение летучих веществ древесными растениями и повышение количества положительных ионов воздуха за счет урбанизации и роста антропогенных факторов.

Целью работы является исследование влияния антропогенного воздействия на выделение летучих веществ и естественной ионизации воздуха в пригородных зонах лесного массива, их взаимодействие. В работе проведены исследования физических и химических свойств лесного воздуха – наличие отрицательных и положительных ионов, выделение летучих веществ древесными растениями. Исследования проводились за период 1998–2018 гг. Данные исследования позволяют определить влияние антропогенного воздействия мегаполиса на тропобиосферу хвойного леса.

Были получены теоретические зависимости влияния естественной ионизации на концентрацию пыли и патогенную микрофлору воздушной среды.

Проведён сравнительный анализ опубликованных материалов по выделению древесными растениями летучих веществ, а также проведены измерения естественной ионизации воздуха лесного массива и мегаполиса: количество отрицательных и положительных ионов [1, 2].

© Рогов В.А., Кравченко Н.В., Багаева О.И., 2019

Динамика изменения количественного содержания отрицательных и положительных ионов за период 1998–2018 гг. представлена в таблице. Измерение ионизации воздуха проводилось прибором МАС-01 в теплый период года (в июле), так как данный период характеризуется наибольшим количеством выделений летучих веществ и повышенным содержанием отрицательных ионов.

Таблица

Динамика изменения количественного содержания отрицательных и положительных ионов за период 1998–2018 гг.

| Период | 1998 | 2003 | 2008 | 2013 | 2018 |
|---|---|---|---|---|---|
| Количество отрицательных ионов, е/см$^3$ | 10 000 | 9 000 | 9 000 | 9 200 | 7 000 |
| Количество положительных ионов, е/см$^3$ | 50 | 150 | 200 | 300 | 350 |

Из таблицы видно, что за указанный период возрастает количество положительных ионов при уменьшении отрицательных.

В экспериментальном исследовании обнаружено влияние электромагнитного излучения на физические свойства воздуха.

По наблюдениям авторов (В.А. Рогов, О.И. Багаева), на жителей города и воздушную среду оказывает негативное воздействие электромагнитные излучения (ЭМИ), которые обнаруживаются практически во всех районах города. Наличие ЭМИ отрицательно сказывается и на физических свойствах воздушной среды, увеличивая на порядок количество положительных ионов по сравнению с отрицательными, образуя кластеры из пыли и газов [3].

Исследованиями авторов (В.А. Рогов, Н.Г. Черкасова) установлено – в воздухе лесных массивов и лугов содержится от 2000 до 10 000 отрицательных аэроионов в см$^3$ (е/см$^3$), а в жилых помещениях их концентрация снижается до 25 е/см$^3$, а в селитебных районах города не превышает 500 е/см$^3$ или вовсе отсутствуют и превышение наблюдается положительными ионами, что, естественно, пагубно влияет на здоровье населения мегаполиса.

Для описания модели воздействия антропогенных факторов на ионизацию воздуха проведено теоретическое исследование и получены математические зависимости.

Модельно равновесное состояние слоя адсорбированных ионов на поверхности частицы описывается уравнением Фоккера – Планка [4]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left( i_i p - \frac{\partial}{\partial x_i} D_{ij} p \right), \qquad (1)$$

где $x_i = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$ – координаты точки в области объёма конгломерата частица – адсорбат, содержащей границу раздела частица – среда; $l_i$ – соответствующие им проекции вектора подвижности адсорбированных ионов; $p$ – плотность распределения заряда; $D_{ij}$ – тензор их коэффициентов диффузии.

После преобразования уравнения Фоккера – Планка (1) с учетом свойств материала адсорбата (частиц пыли) получаем уравнение [4]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \alpha \frac{\partial U}{\partial r}\frac{\partial p}{\partial r}, \qquad (2)$$

где $r$ – приведенный радиус адсорбата; $\alpha$ – вектор подвижности.

Полученые математические зависимости описывают влияние ионизации на запыленность, загазованность воздушной среды.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны мероприятия по снижению антропогенного воздействия на воздушную среду и жителей мегаполиса.

**Список литературы**

1. Рогов В.А., Степень Р.А., Кулак В.В. Влияние летучих терпеноидов растений и отрицательных ионов на организм человека и окружающую среду в помещениях // Хвойные бореальной зоны: теорет. и науч.-практ. журн. Красноярск: СибГТУ, 2015. Т. 33. С. 168–170.

2. Рогов В.А., Рогов А.В., Степень Р.А. Оздоровление воздушной среды производственных помещений зелеными растениями // Химия растительного сырья. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2008. № 4. С. 181–184.

3. Прусакова В.А., Рогов В.А., Кулак В.В. Влияние электростатического поля на свойства древесной пыли // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения. Красноярск: СибГТУ, 2015. Т. 1. С. 206–208.

4. Рогов В.А. Влияние отрицательных ионов и летучих терпеноидов на очистку воздушной среды производственных помещений деревообрабатывающих предприятий: монография. М.: Изд-во МГУЛ, 2002. 222 с.

УДК 528.88:556

**В.Ю. Ромасько[1, 2]**

[1] Сибирский центр ФГБУ «НИЦ Планета», Новосибирск, Россия
[2] Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия
e-mail: rom@g-service.ru

# ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КАРТИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА СО СПУТНИКОВ TERRA И SNPP ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

Произведено сравнение результатов методики ежедневного картирования снежного покрова по данным КА Terra и Suomi NPP с наземными ежедневными наблюдениями за снегом на 29 метеостанциях в бассейне р. Оби до Барнаула с целью определения среднемноголетних задержек фиксации схода снега по спутниковым данным за весенний период 2005–2018 гг. Для решения поставленной задачи произведено уточнение координат метеоплощадок, которые в худшем случае находятся в 7 км от координат из паспорта метеостанции. Средние многолетние задержки и их медианы по результатам сравнения составили менее 1 суток, а в худшем случае доходят до 2 недель (менее 3 % случаев). Такие характеристики позволяют их использование в практике отделов гидрологических прогнозов.

*Ключевые слова: дистанционное картирование, снежный покров, метеостанция.*

Снежный покров является одним основным источником воды в сибирских реках в весенний период. Точная оценка наличия снега в пределах бассейна реки необходима для прогнозирования высоты и длительности весеннего половодья. Данная задача становится особенно актуальной в конце весны, когда граница снегового покрова поднимается выше действующих метеостанций, и поступление наземной информация о таянии снега прекращается. Вторая волна половодья на р. Оби, например, начинается как раз в таких условиях отсутствия наземной информации.

Для решения данной задачи на основе данных дистанционного зондирования Земли была разработана «Система мониторинга заснеженности» [1] в качестве части новых разработанных или усовершенствованных методик прогноза уровней и расходов воды в реках и водохранилищах Сибири. Основу мониторинга заснеженности составляет методика ежедневного картографирования снежного покрова, которая отличается наличием методов накопления безоблачных данных, позволяющих осуществлять ежедневное картографирование, на основе которого производится оперативная оценка заснеженности высотных зон.

Целью данного исследования явилась оценка точности ежедневного картографирования снежного покрова по срокам схода снега в точках метеостанций по наземным данным и выработка рекомендаций по применению оперативных оценок заснеженности высотных зон в отделах гидрологических прогнозов. Исследования проводились на основе данных в период сезона снеготаяния март–май 2007–2018 гг. по 29 метеостанциям бассейна р. Оби до Барнаула.

Для картографирования снежного покрова в системе мониторинга заснеженности используется спутниковая информация КА Terra и Suomi NPP, принятая и обработанная по алгоритмам [2, 3] в оперативном режиме в СЦ ФГБУ «НИЦ Планета». Имеющиеся архивы данных начинаются с сезона снеготаяния 2005 г. и продолжают оперативно пополняться в реальном времени.

Для оценки точности ежедневного картографирования снежного покрова используется сравнение сроков схода снега по ежедневным данным о высоте снега и покрыто-

© Ромасько В.Ю., 2019

сти окрестностей снегом на всех действующих метеостанциях в бассейне Верхней Оби и вблизи него за период, начиная с 2005 г. Особо следует отметить принципиально иной подход к измерению характеристик снежного покрова по спутниковым данным, который заведомо не даёт оснований на точное совпадение результатов наблюдений по наземным и спутниковым данным. Измерения высоты снежного покрова на метеоплощадке делаются по трём снегомерным рейкам, расположенным в разных местах метеоплощадки, размеры которой составляют 26 × 26 м [4]. Можно считать, что средняя высота снежного покрова относится к территории метеоплощадки в 676 м$^2$. Степень покрытия окрестностей станции снегом производится глазомерно по наблюдению видимых окрестностей вблизи станции. Причём, на прибережных станциях учитывается только поверхность суши, а на станциях вблизи лесных массивов – только поверхность открытых мест. В наставлениях не ограничивается предельная дальность наблюдения окрестностей, и информация о действительно наблюдаемой площади отсутствует, поскольку никак не регламентирована. Таким образом, степень покрытия станции снегом относится к открытой, видимой окрестности территории.

Картографирование снежного покрова со спутников делается по растровым изображениям, полученным с радиометров, установленных у них на борту. Разрешение в надире для каналов радиометра MODIS КА Terra, используемых для картографирования снега, составляет 500 м, для радиометра VIIRS КА Suomi NPP – 375 м. Исходные данные для возможности анализа временны̀х рядов трансформируются в азимутальную эквивалентную проекцию Альберса с размером пикселя 400 м. Для соответствия точности координат метеостанций детальности изображений пришлось решать задачу уточнения координат метеоплощадок, так как в паспорте метеостанции координаты метеоплощадки указываются с точностью до угловых минут.

Определение координат метеоплощадок проводилось с использованием общедоступных источников спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения (http://maps.google.ru/) совместно с публичной кадастровой картой РФ (http://pkk5.rosreestr.ru/). Участки земель под метеоплощадки за редким исключением зарегистрированы в земельном кадастре, и информации по ним указано назначение, связанное с гидрометеорологическими наблюдениями, что позволяет их однозначно идентифицировать, однако не позволяет их легко найти.

В результате выяснилось, что только три метеоплощадки могут попасть в пиксель со своими координатами. Остальные метеоплощадки гарантированно в «свои» пиксели не попадают, так как в действительности находятся на расстоянии больше 400 м от своего паспортного положения. Причём 6 из 29 метеостанций расположены в радиусе больше 1′ от паспортных координат, т.е. в их координатах присутствует ошибка, не связанная с округлением до минут. Наихудший случай представлен метеоплощадкой 36033 Шипуново, которая сдвинута на север на 7 км.

В сезоне рассматривались только факты схода только установившегося зимнего снежного покрова. Для средней высоты снежного покрова на метеоплощадке определялась первая дата с высотой менее 1 см. Для степени покрытости окрестностей станции снегом определялась первая в сезоне дата со значением менее 5, что соответствует покрытости менее 50 %, что соответствует классификации снега по спутниковым данным. Даты сравниваемых фактов идентифицировались по таблицам данных вручную, чтобы избежать ошибок, связанных с временным снежным покровом из-за осадков. Всего рассмотрено 397 сезонов.

В таблице приведены средние, медианы и предельные значения задержек (положительные значения) и опережений (отрицательные значения) по всем метеостанциям в совокупности. В целом можно констатировать, что средняя задержка от достижения нулевой высоты снежного покрова до фиксации схода снега по спутнику составляет менее суток, а по степени покрытости опережает менее, чем на сутки. Аналогично себя

ведут и медианы этих величин. Таким образом, результаты картографирования снежного покрова со спутника являются в среднем практически совпадающими с наземными наблюдениями.

Таблица

Средние, медианы и предельные значения задержек и опережений
для всех метеостанций в 2005–2018 гг.

| Метод | Наземные данные | Минимум | Среднее | Медиана | Максимум |
|---|---|---|---|---|---|
| Кумулятивных сумм | нулевая высота | –22 | 0,8 | 0 | 18 |
| | покрытость <50 % | –22 | –0,7 | –1 | 13 |
| Последнего значимого | нулевая высота | –21 | 0,5 | 0 | 18 |
| | покрытость <50% | –20 | –0,9 | –1 | 13 |

В обоих случаях параметров спутниковой оценки – и по методу обнаружения разладки, и по методу последнего значимого – они запаздывают по отношению к нулевой средней высоте снежного покрова на метеоплощадке и опережают достижение степени покрытости окрестностей станции 4 баллов и менее. Ежедневное картографирование снежного покрова в 28 из 29 метеостанций укладываются в ±3 суток от наземных данных по достижению нулевой средней высоты снежного покрова на метеоплощадке и от +2 до –7 суток по достижении степени покрытости окрестностей станции 4 баллов. Предельные границы наблюдавшихся значений составили от опережения на 21 сутки до задержки в 18 суток.

Таким образом, методика автоматического ежедневного картографирования снежного покрова по спутниковым данным обеспечивает фиксацию схода снега в среднем практически в те же сутки, что дают и наземные данные.

**Список литературы**

1. Ромасько В.Ю., Бураков Д.А. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2017. № 10 (6). С. 704–713

2. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Envi-ronment. 1995. № 54. С. 127–140.

3. Snow and ice products from Suomi NPP VIIRS / Jeffrey R. Key, Robert Mahoney, Yinghui Liu, Peter Romanov [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013 Т. 118. С. 12816–12830.

4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3 Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях / отв. ред. Д.П. Беспалов. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 299 с.

УДК 528.88

**И.В. Рублев[1], А.Е. Воронова[2]**

[1] Заместитель заведующего отделом обработки спутниковой информации
[2] Младший научный сотрудник
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», Новосибирск, Россия
e-mail: rublev@rcpod.ru, 35voran@gmail.com

# ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОПОРТАЛА «МЕТЕО-СИБИРЬ» ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

Статья посвящена геоинформационному сервису «Метео-Сибирь»: представлены его основные возможности и источники данных. Описана специфика геопортала, которая заключается в использовании результатов классификации спутниковых данных среднего и высокого разрешения по разработанным алгоритмам. Показано преимущество их использования по сравнению со стандартными продуктами обработки для мониторинга паводковой обстановки и ландшафтных пожаров.

*Ключевые слова: спутниковый мониторинг, геопортал, Метео-Сибирь.*

**Введение.** Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"» – один из трёх региональных центров, образующих государственную территориально-распределённую систему космического мониторинга Росгидромета, является основным поставщиком спутниковых данных с национальных космических систем в Сибирском регионе и обеспечивает оперативный мониторинг обширных территорий Урала и Сибири.

Особую важность спутниковый мониторинг приобретает во время опасных природных явлений, наиболее характерными из которых для Сибири являются паводки и пожары. При неблагоприятных погодных условиях нередки случаи возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) в результате неконтролируемого пала вблизи населенных пунктов или масштабных лесных пожаров. Другой потенциальной угрозой являются реки Сибири, характер сезонных режимов которых часто приводит к затоплению пойменных территорий.

При возникновении ЧС важна не только оперативность предоставляемой информации, но также и ее детальность, которая, в свою очередь, зависит от пространственного разрешения исходных спутниковых данных. В Сибирском центре были разработаны алгоритмы классификации космических снимков среднего и высокого разрешения, которые позволяют получать более точные результаты по сравнению со стандартными продуктами в условиях Сибирского региона [1].

С целью оперативного и удобного предоставления результатов основной деятельности Сибирского центра с 1 июня 2019 г. в опытную эксплуатацию введён геоинформационный сервис «Метео-Сибирь» (http://ppi.rcpod.ru:85/MeteoSiber/).

**Геоинформационный сервис «Метео-Сибирь».** В качестве покрытия на геопортале используются оперативно принимаемые в круглосуточном режиме спутниковые данные с космических аппаратов Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA-20, «Метеор-М» № 2 и «Электро-Л» № 2 – геостационарного спутника, позволяющего пользователю наблюдать за ситуацией на всей территории России, от Калининграда до Хабаровска, с интервалом в 30 мин.

Помимо различной метеорологической информации на геопортале отображаются продукты стандартных алгоритмов автоматической обработки: «горячие точки»

© Рублев И.В., Воронова А.Е., 2019

по данным MODIS (1000 м) и VIIRS (375 и 750 м) [2]. Автоматически обнаруженные природные пожары представлены полигональными объектами в палитре «остывающей стали», что позволяет наглядно демонстрировать в хронологическом порядке историю развития пожарной ситуации [3].

Важной отличительной чертой сервиса «Метео-Сибирь» является использование результатов обработки спутниковых данных среднего и высокого разрешения с КА серии «Канопус-В», «Ресурс-П», «Метеор-М», Landsat-8, Sentinel-2. Для их классификации используются алгоритмы, разработанные в Сибирском центре «НИЦ "Планета"» [1] и в Институте вычислительных технологий СО РАН [4].

При мониторинге ландшафтных пожаров, непосредственно угрожающих населенным пунктам, данные высокого разрешения позволяют точнее оценить форму распространения горящей кромки и расстояние от нее до жилых районов (рис. 1).

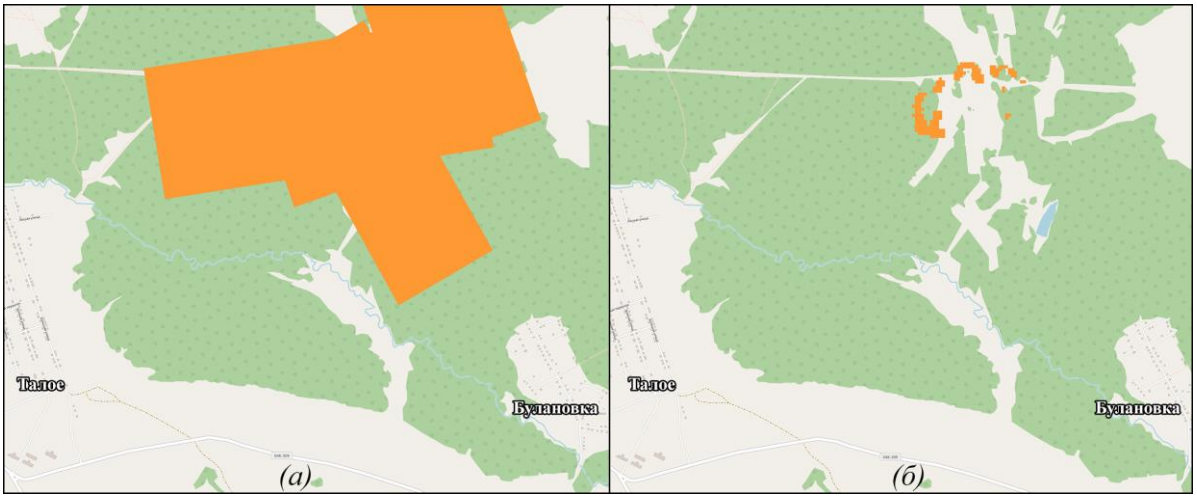



Рис. 1. Отображение на геопортале векторного слоя пожара (Красноярский край, 05.06.19):
*а* – по данным MODIS: *б* – по данным Sentinel-2

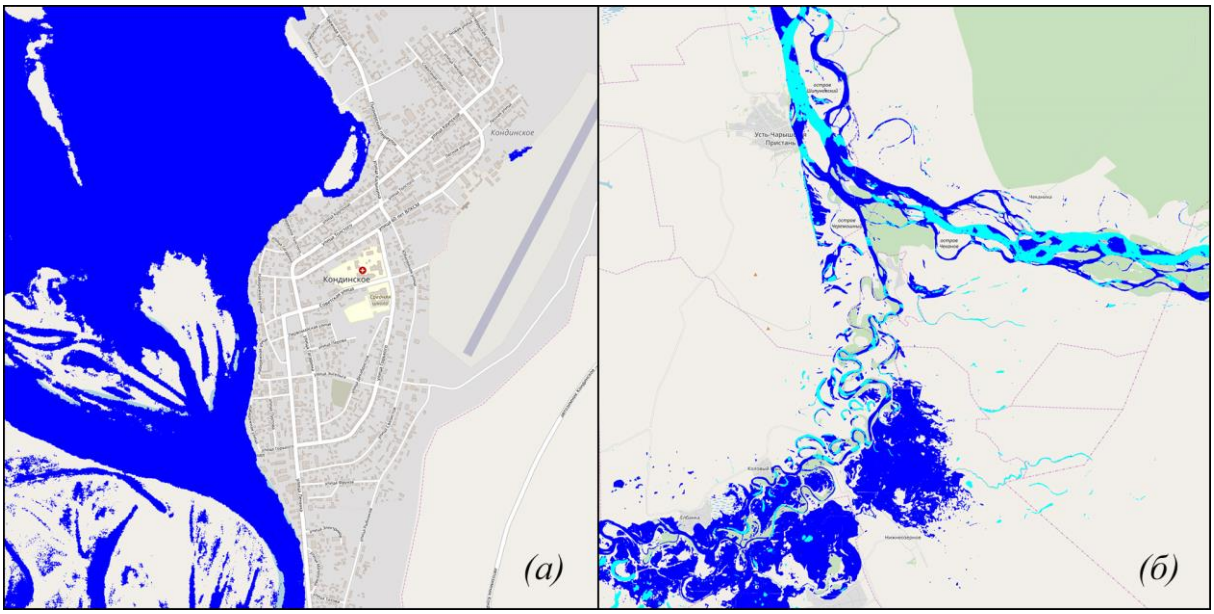



Рис. 2. Отображение на геопортале векторного слоя гидрологической обстановки:
*а* – по данным «Канопус-В» № 3 (р. Конда, Кондинское, ХМАО, 16.05.19),
б – по данным Sentinel-2B (р. Обь и Чарыш, Алтайский край, 08.04.19)

Основанная на спутниковых данных высокого разрешения гидрологическая информация, представленная на геопортале в виде площадных объектов водной поверхности, предоставляет пользователям точную плановую информацию о паводковой обстановке при мониторинге затоплений в границах населённых пунктов (рис. 2, *а*).

Используемые в процессе обработки бинарные алгоритмы позволяют выделять на снимках также ледовые поверхности, что является особенно актуальным при мониторинге ледовых заторов, нередко приводящих к возникновению паводковой ситуации (рис. 2, *б*).

**Заключение.** Геоинформационный сервис «Метео-Сибирь» предоставляет пользователям широкие возможности для получения оперативных спутниковых данных и результатов их тематической обработки. Использование космических снимков высокого и среднего пространственного разрешения, а также разработанных алгоритмов их классификации при мониторинге ЧС позволяет с большей точностью и достоверностью осуществлять выделение интересующих объектов.

Полученные продукты оперативно предоставляются в первую очередь для подразделений Росгидромета и МЧС России. Наглядное отображение информации позволяет своевременно осуществлять принятие мер для ликвидации и предотвращения распространения ЧС, а также для последующей оценки нанесённого стихией ущерба.

**Список литературы**

1. Воронова А.Е., Кузьминых С.А. Автоматизация технологии обработки спутниковых данных для оперативного картографирования водной и ледовой поверхностей: электр. сб. ст. 16-й конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ, 2018. С. 84–91.

2. The MODIS fire product / C.O. Justice, L. Giglio, S. Korontzi [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2002. № 83. P. 224–262.

3. Батанов Д.В., Панов Д.Ю., Ромасько В.Ю. Технология мониторинга пожарной обстановки на территории Сибири: сб. тез. докл. 16-й конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ, 2018. С. 19.

4. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации: материалы II Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» / С.А. Рылов, О.Г. Новгородцева, И.А. Пестунов, О.А. Дубровская, Ю.Н. Синявский. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. С. 207–212.

УДК [551.507: 551.521.3]: 550.34

**Л.Г. Свердлик**
Кандидат физико-математических наук, Научная станция
Российской академии наук в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

# ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В ПЕРИОДЫ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

Проанализированы данные наземного (*AERONET*) и спутникового (*MERRA*) мониторинга оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля для выявления возможной связи с сейсмической активностью в Северном Тянь-Шане. Наблюдались хорошо выраженные изменения спектральной оптической толщины аэрозольного ослабления и отношения массовой концентрации (*PM* 1.0) к оптической толщине аэрозольного рассеяния за несколько дней до землетрясений магнитудой $M > 5{,}0$.

*Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, аэрозольная оптическая толща, массовая концентрация, аномалии.*

**Введение.** Аэрозоли играют важную роль в радиационном балансе Земли [1], региональных и глобальных изменениях климата, а также влияют на качество воздуха и здоровье людей. В последнее время свойства взвешенных в атмосфере частиц используют в качестве индикаторов предсейсмических аномалий [2]. Наиболее точную информацию о параметрах атмосферного аэрозоля предоставляет дистанционное зондирование с использованием солнечных фотометров CIMEL. Данные наземных измерений целесообразно использовать в сейсмически активных областях вблизи станций AERONET. Важную роль в аэрозольных исследованиях также играют спутниковые измерения, позволяющие анализировать изменения, предшествующие крупным землетрясениям в глобальном масштабе. Сочетание этих двух источников информации является наиболее эффективным и, соответственно, было применено в настоящем исследовании. Для количественной оценки содержания аэрозоля в атмосфере использовались результаты измерений спектральной аэрозольной оптической толщины (АОТ) до и после землетрясений. Дополнительно были проанализированы спутниковые временные ряды различных комбинаций параметров, в частности, обеспечивающих важную информацию относительно соотношения рассеивающих свойств аэрозоля и массовой концентрацией взвешенных в воздухе частиц с аэродинамическим диаметром менее 1.0 μm (PM 1.0).

**Сейсмические и спутниковые данные.** Были проанализированы наземные и спутниковые данные в периоды подготовки шести сильных землетрясений, которые произошли на территории, ограниченной координатами 39–43° *N*, 71–80° *E* в 2003–2014 гг. и характеризовались магнитудами $M > 5{,}0$. Сведения о сейсмических событиях взяты из каталога землетрясений, составленного по данным сейсмологической сети *KNET* [3] и онлайн-версии мирового каталога *USGS* [4]. Исходные данные о параметрах аэрозоля получены на станции «Иссык-Куль», входящей в состав глобальной Сети *AERONET* [5] и представлены среднесуточными значениями *AOT* достоверного качества (*Level* 2.0), а также данными *Level* 1.5 (фильтрация облаков), имеющими более высокую погрешность восстановления оптических параметров атмосферы, но обеспечивающими лучшую статистику измерений.

© Свердлик Л.Г., 2019

Как средство глобального мониторинга изменчивости характеристик аэрозоля, в данном случае оптической толщины аэрозольного рассеяния на длине волны 550 nm для массовой концентрации тонкодисперсных частиц *PM* 1.0, применялись результаты спутникового зондирования (*Area-Averaged of Dust Scattering AOT 550 nm – PM 1.0 μm*). Были восстановлены как временные серии этого параметра с дискретизацией $\Delta t$=1 час над участками размером ±1° от эпицентров землетрясений, так и его пространственное распределение [6].

Обсуждение результатов

Изменения оптической толщины атмосферы перед сильными землетрясениями оценивались неоднократно. Так явное увеличение *AOT* (примерно на ~40 %) вблизи эпицентра за несколько дней до землетрясения наблюдалось, например, в Чили (2010 г.) и Непале (2015 г.) [3]. Исследование возможной связи аэрозольной нагрузки атмосферы с сейсмической активностью в Тянь-Шане было проведено с использованием данных наземных наблюдений. Для этого выбрано наиболее сильное землетрясение магнитудой 6.1, зарегистрированное 28 января 2013 г. в 150 км от станции *AERONET*. На рис. 1 приведены изменения *AOT* в диапазоне спектра от 340 до 1640 nm с 4 января по04 февраля 2013 г. Как видно, аэрозольная оптическая толщина достигала максимальных значений (0.400–0.550) за 1–6 суток до сейсмического события.

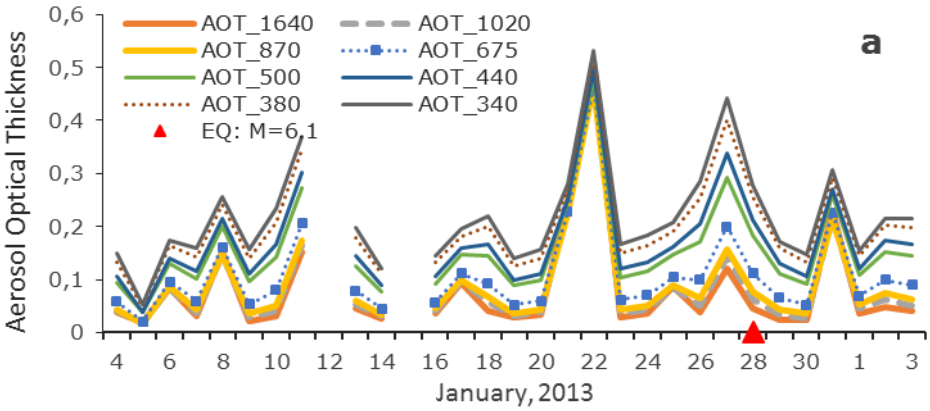



Рис. 1. Изменение среднесуточных значений спектральной AOT (AERONET, Level 1.5) в январе 2013 г. Маркером показан момент землетрясения *M* = 6,1 (28 января 2013 г.)

Данные наблюдений *AOT* были детализированы с использованием тонкодисперсной (*AOT-Fine*) и крупнодисперсной (*AOT-Coarse*) модальных составляющих. Как показано на рис. 2, наиболее высокое значение оптической толщины, составляющее 0,325 на длине волны 440 nm, наблюдалось за сутки до землетрясения *M* = 6,1. Полученные оценки вклада двух фракций аэрозоля свидетельствуют, что доминирующую роль играли тонкодисперсные частицы, которые практически определяли характер эволюции *AOT-Total*. Одной из возможных причин является ионизация приземного слоя атмосферы [7].

Процессы, происходящие в геосферах при подготовке сильных землетрясений, могут привести к образованию аэрозолей, распределения по размерам которых отличается от наблюдаемых в периоды без сейсмических событий. Такие особенности предсейсмических вариаций спектров размеров частиц были обнаружены с использованием параметра $\mu = AOT_{sca} / PM\ 1.0$, характеризующего связь между массовой концентрацией и оптической толщиной аэрозольного рассеяния [8]. Предварительные результаты обработки спутниковых данных в виде нормированных отношений 1/μ, приведенных к одному моменту землетрясения, показаны на рис. 3.

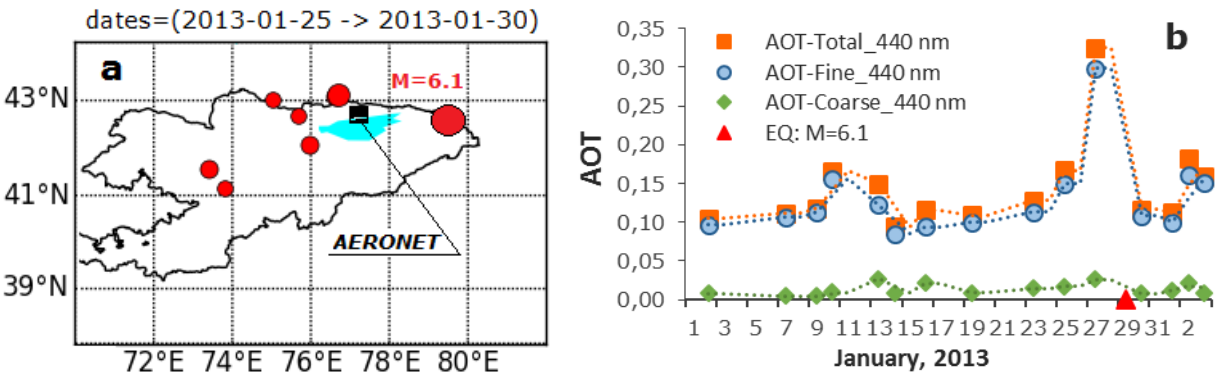



Рис. 2. Расположение станции *AERONET* и эпицентров землетрясений 25–30 января (*a*); временной ход *AOT-Total*, *AOT-Fine* и *AOT-Coarse* (*Level* 2.0) в январе 2013 г. (*b*)

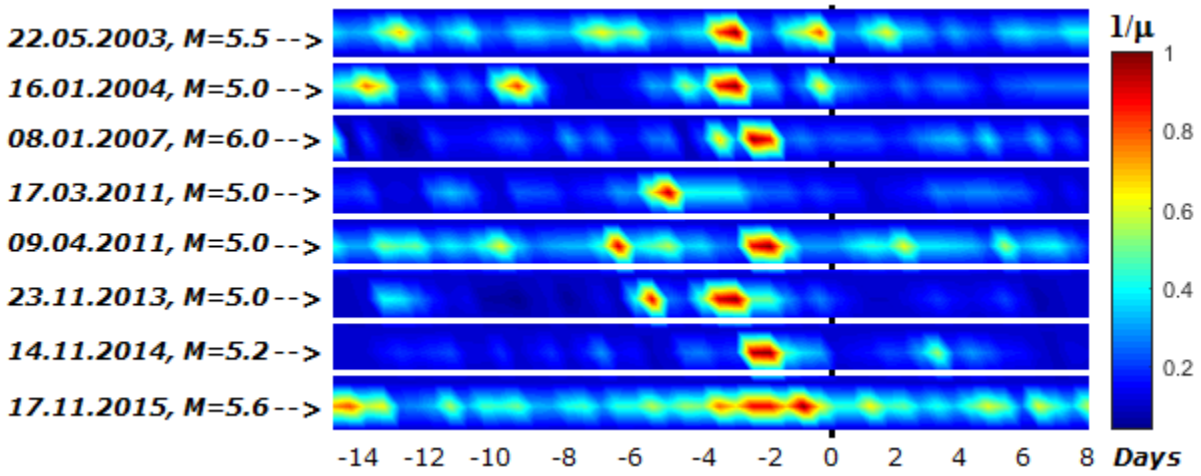



Рис. 3. Распределение нормированных отношений 1/μ в периоды времени начиная с 15 дней до и заканчивая 7 днями после каждого события $M > 5{,}0$ в Северном Тянь-Шане

Наблюдаемые хорошо выраженные изменения, предваряющие сильные землетрясения, можно, вероятно, объяснить присутствием преимущественно тонкодисперсных частиц, которые оказывают значительное влияние на AOT, но незначительно изменяют PM 1.0. Пространственное распределение отношения параметров Scattering $AOT_{550nm}$ – $PM_{1.0\mu m}$ по данным спутникового зондирования за сутки до сильных землетрясений, произошедших 17 ноября 2015 г. ($M$ = 5,6) и 19 июля 2016 г. ($M$ = 5,1), представлено на рис. 4.

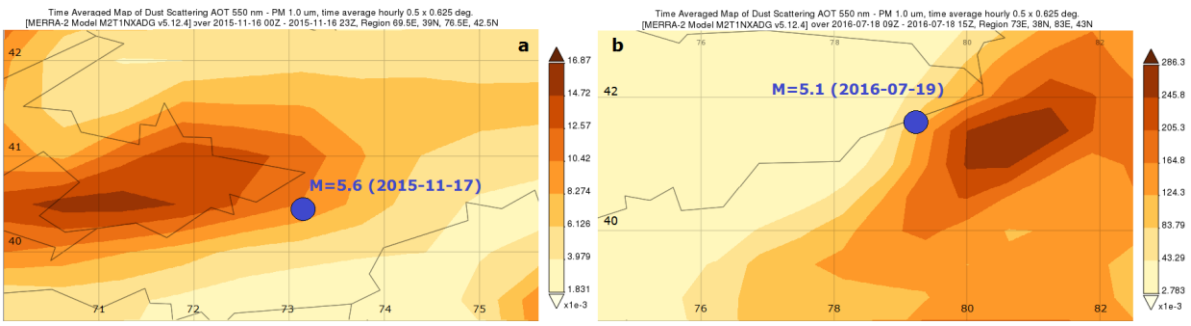



Рис. 4. Пространственное распределение *Scattering* $AOT_{550\ nm}$ – $PM_{1.0\ \mu m}$ за сутки до сильных землетрясений магнитудой $M > 5.0$: 17 ноября 2015 г. (a) и 19 июля 2016 г. (b)

**Заключение.** Проанализированы результаты наземных и спутниковых измерений параметров атмосферного аэрозоля в сопоставлении с несколькими случаями сейсмической активности на территории и вблизи границ Кыргызстана. Продемонстрированы атмосферные эффекты, сопровождающие процессы подготовки наиболее сильных землетрясений, в виде изменения аэрозольной оптической толщины мелкодисперсной фракции и отношения *PM* / *AOT*. Полученные результаты являются предварительными, однако приведенные примеры подтверждают, что вариации параметров атмосферного аэрозоля в предсейсмический период целесообразно использовать в дальнейшем.

*Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC и руководителю проекта AERONET доктору Б.* Холбену *за обеспечение свободного доступа к данным.*

**Список литературы**

1. Свердлик Л.Г. Радиационные свойства атмосферного аэрозоля в регионе Северного Тянь-Шаня // Вестн. КРСУ. 2018. Т. 18, № 12. С. 156–163.
2. Jiao Z-H., Zhao J., Shan X. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 18. № 4. P. 1013–1036.
3. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и НС РАН в г. Бишкеке.
4. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/.
5. URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/.
6. URL to Reproduce Results: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.
7. Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Davidenko D.V. Earthquake Prediction is Possible?! Integral technologies of multiparameter monitoring the geoeffective phenomena within the framework of integrated lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling model. M.: Trovant Publ. 2014. 144 p.
8. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) // Наука, новые технологии и инновации. 2013. № 3. С. 3–7.

УДК 551.513: 550.34

**Л.Г. Свердлик[1], Э.Ю. Зыскова[2]**

[1] Кандидат физико-математических наук, Научная станция
Российской академии наук в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

[2] Доцент, Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызстан

# СВЯЗЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В АТМОСФЕРЕ

Проанализированы результаты моделирования процессов переноса воздушных масс (*HYSPLIT*) и спутниковых данных об изменениях северной и восточной компонент вектора скорости ветра, направленные на выявление когерентного поведения с вариациями сейсмической активности в Северном Тянь-Шане. Наблюдалась хорошо выраженная связь между возникновением относительно сильных землетрясений и меридиональным типом циркуляции атмосферы.

*Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, обратные траектории, скорость и направление ветра.*

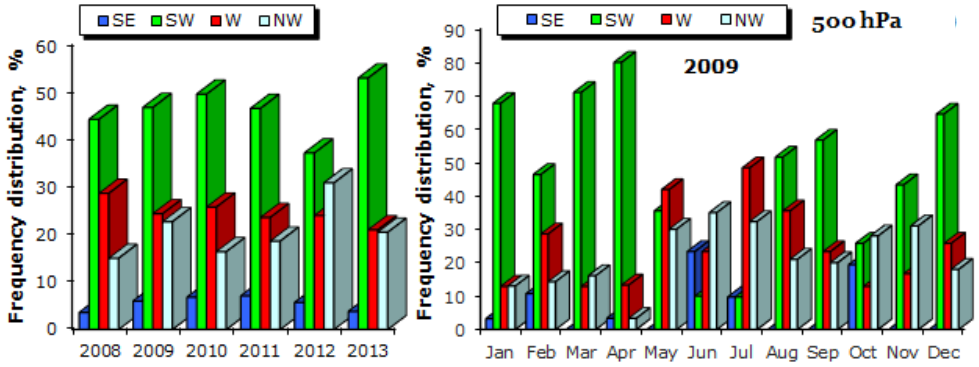
**Введение.** В последние годы с развитием методов дистанционного зондирования появляется все больше доказательств того, что на последних этапах процесса подготовки сильных землетрясений может происходить обмен энергией между литосферой и различными слоями атмосферы и ионосферы [1]. Определенную роль в сейсмическом процессе играют изменения уровня солнечной активности, которые вызывают ряд взаимосвязанных явлений в геосферах, в том числе изменчивость циркуляции атмосферы, способствуя накоплению дополнительной энергии в земной коре [2, 3]. Перемещение областей высокого и низкого атмосферного давления может рассматриваться в качестве тектонического фактора, обуславливающего процессы накопления деформаций и напряжений, а значит способного ускорить возникновение землетрясения, назревающего в земной коре независимо от атмосферных процессов [4]. С целью изучения внутригодовой изменчивости атмосферных процессов, как одного из факторов, которые могут инициировать землетрясения, в данной работе рассмотрена динамика тропосферы и сейсмической активности в Северном Тянь-Шане.

**Модельные, спутниковые и сейсмические данные.** Анализ циркуляционных процессов в атмосфере основывался на результатах построения траекторий движения воздушных масс. Расчеты обратных траекторий продолжительностью 96 ч с шагом по времени 12 ч проводились с помощью модели дальнего переноса *HYSPLIT* [5]. В качестве входных данных этого программного комплекса использовались двухмерные и трехмерные поля давления, температуры воздуха, зональной и меридиональной скорости ветра, представленные в глобальной базе метеопараметров *GDAS* (*Global Data Assimilation System*) [5].

Сопоставление динамики атмосферных процессов с количеством землетрясений энергетического класса $K > 9$, произошедших в Северном Тянь-Шане проводилось с использованием цифровых записей сейсмической сети *KNET* [6]. Так как средняя высота горных хребтов Северного Тянь-Шаня составляет 3,8–4,2 км, все оценки проводились по обратным траекториям, рассчитанным на геопотенциальной поверхности 500 *hPa* (~5,2 км). На более низких уровнях существенное влияние имеет сложный рельеф поверхности, что приводит к значительны отклонениям расчетных значений от фактических параметров ветра [7]. С высотой влияние этого фактора ослабевает.

© Свердлик Л.Г., Зыскова Э.Ю., 2019

**Обсуждение результатов.** Результаты проведенного для нескольких лет (2008–2013 гг.) моделирования обратных траекторий позволили выделить основные направления переноса воздушных масс: юго-восточное (*SE*); юго-западное (*SW*); западное (*W*) и северное, северо-западное (*NW*) [7]. Многолетние распределения повторяемости траекторий (рис. 2а) показали достаточно стабильное доминирующее воздействие адвекции воздушных масс с юго-запада (*SW*), на долю которых приходилось от 35 до ~55 %. Повторяемость меридионального типа циркуляции с северными составляющими (*NW*), которые переносят более холодный воздух и сопровождаются усилением вертикальных потоков [7], варьировала в пределах ~15–30 %. Внутригодовое распределение повторяемости обратных траекторий по направлениям рассмотрено на примере данных, полученных в 2009 г. (рис. 2, *б*).




*а* *б*

Рис. 1. Распределения повторяемости обратных траекторий (в %) по направлениям на изобарическом уровне 500 hPa: (a) – в период 2008-2013 гг.; (b) – в 2009 г.

Связь между атмосферными и сейсмическими процессами определялась путем сопоставления усредненной за каждый месяц повторяемости обратных траекторий и количеством зарегистрированных в Северном Тянь-Шане землетрясений. Наибольший коэффициент корреляции между этими временными рядами, составляющий $R^2$ = 0,62, был получен для обратных траекторий с направления *NW* (рис. 2). Это свидетельствует о высокой степени согласованности между возникновением относительно сильных землетрясений и меридиональными атмосферными процессами, что соответствует данным, приведенным в работе [3].

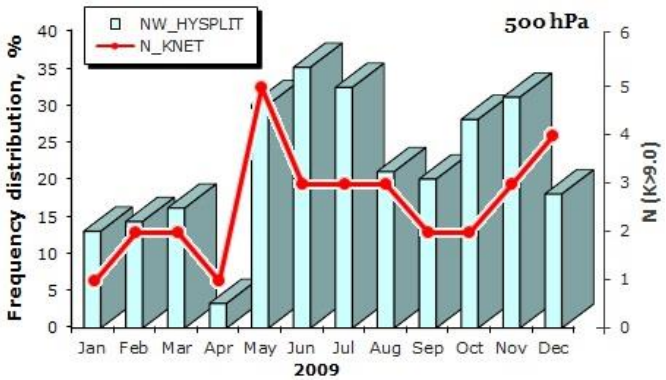
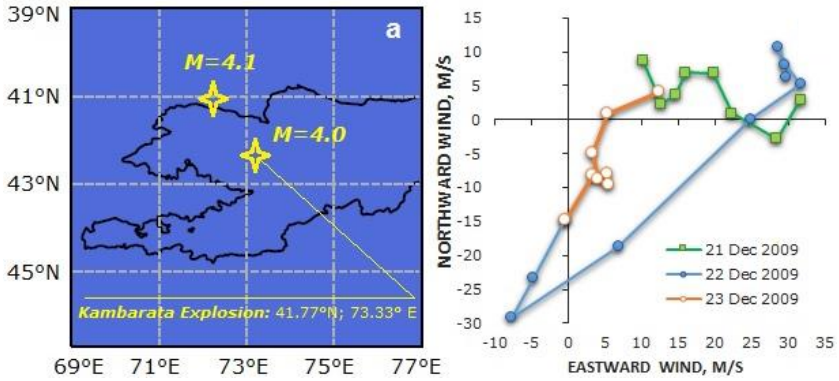



Рис. 2. Распределения повторяемости обратных траекторий (в %) с северного, северо-западного (*NW*) направления на уровне 500 *hPa* (*a*) и количество землетрясений энергетического класса $K > 9{,}0$ (*b*) по данным сейсмологической сети *KNET* в 2009 г.

На примере мощного взрыва в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата) и последовавшего за ним землетрясения магнитудой $M$ = 4,0 (22 декабря 2009 г.

в 06:54 *UTC*) проведена оценка пространственно-временной изменчивости циркуляции атмосферы. Анализ вертикального распределения характеристик тропосферного ветра проводился по данным спутникового дистанционного зондирования на различных уровнях верхней тропосферы [8] над местом проведения промышленного взрыва и эпицентром землетрясения (рис. 3, *а*). Годограф, заданный изменениями северной (*Northward*) и восточной (*Eastward*) компонент вектора скорости ветра на изобарическом уровне 350 *hPa*, дает наглядное представление об изменениях направлений переноса воздушных потоков в каждый последовательный момент времени ($\Delta t$ = 3 ч) с 21 по 23 декабря 2009 г. (рис. 3, *б*). Как видно, в период прохождения рассматриваемого землетрясения (22 декабря 2009 г.) преобладал ветер, имеющий сильную меридиональную составляющую.




*а* *б*

Рис. 3. Расположение эпицентров землетрясений (*а*) и годограф изменчивости северной и восточной компонент вектора скорости ветра на уровне 350 *hPa* (*б*)

**Заключение.** Проанализированы вариации сейсмичности Северного Тянь-Шаня в сопоставлении с данными моделирования движения воздушных масс и спутниковыми измерениями скорости ветра. Несмотря на то, что представленные результаты, вероятно, не в полной мере отражают изменения в различных частях исследуемого региона, проведенные исследования дают основания полагать, что меридиональный тип циркуляция атмосферы играет важную роль в инициировании землетрясений энергетического класса $K > 9{,}0$.

**Список литературы**

1. Geospace perturbations induced by the Earth: the state of the art and future trends / A. De Santis, G. De Franceschi, L. Spogli [et al.] // J. Phys. Chem. Earth. 2015. № 85–86. P. 17-33.

2. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 98 с.

3. Боков В.Н. Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // РГГМУ. Ученые записки. № 6. 2008. С. 139–147.

4. Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // Физика Земли. 2008. № 6. С. 77–85.

5. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT Model access via NOAA ARL READY Website (http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php), NOAA Air Resources Laboratory. College Park. MD. 2013.

6. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и НС РАН в г. Бишкеке.

7. Зыскова Э.Ю., Свердлик Л.Г. Дальний тропосферный перенос аэрозоля // Вестн. КРСУ. 2004. Т. 4, № 6. С. 96–103.

8. URL to Reproduce Results: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.

УДК 582

**Б.Т. Сериков[1], Е.С. Ауелхан[2]**
[1] Докторант Phd, [2] Кандидат технических наук
Satbayev University, Алма-Ата, Казахстан
e-mail.ru: bakhtiyarserikov@gmail.com, ergali_79@mail.ru

# МОНИТОРИНГ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ВДОЛЬ ЧИЛИСКОГО РАЗЛОМА

Данная статья посвящена степени возможности применения данных дистанционного зондирования Земли при мониторинге опасных геологических процессов, в частности активизации оползневых процессов вдоль Чиликского разлома.

*Ключевые слова: разлом, оползневые процессы, землетрясение, космоснимки, сейсмология.*

Мониторинг опасных геологических процессов включает анализ разносторонней информации, в том числе данных дистанционного зондирования, геофизических исследований, режимных геотехнических, гидрометеорологических и сейсмических наблюдений. При региональном и локальном мониторинге оползней в труднодоступных горных районах в настоящее время широко используются аэрокосмические методы, в частности, данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) из космоса.

При мониторинге оползней, предполагающем оценку их динамического состояния, основным источником сведений являются космические снимки.

В совокупности методов картографирования оползней следует выделить:

1) традиционные методы (полевое геоморфологическое картографирование, визуальное дешифрирование аэрофотоснимков);

2) современные методы (визуальная интерпретация оптических изображений, анализ мультиспектральных изображений, использование данных SAR-радаров с синтезированной апертурой);

3) методы улучшенного полевого картографирования (с использованием GPS для съемки и ГИС-технологий) [3].

Детальный мониторинг, как правило, привязан к конкретному оползню или участку неустойчивого склона, откоса. Получаемая в процессе детального мониторинга информация используется для прогнозирования и раннего предупреждения оползневой угрозы, назначения мер по снижению риска и предупреждению чрезвычайной ситуации [1, 2].

ДДЗЗ представляют собой эффективный инструмент мониторинга и картографирования оползней, а также высокотехнологичного анализа оползневой опасности. Материалы дистанционного зондирования (аэрофотосъёмка, космическая съёмка, радарная интерферометрия и др.) достаточно широко используются в разнообразных исследованиях оползневых процессов, причем не только в виде самостоятельных методов, но и в сочетаниях. Часто ДДЗЗ служат основным источником исходных данных, а применение передовых методов обработки (статистическое моделирование, нейронные сети, нечеткие множества) и ГИС-технологий способствуют достижению качественных результатов. В обозримой перспективе значимость материалов ДЗЗ в исследовании оползневых явлений, несомненно, будет усиливаться.

© Сериков Б.Т., Ауелхан Е.С., 2019

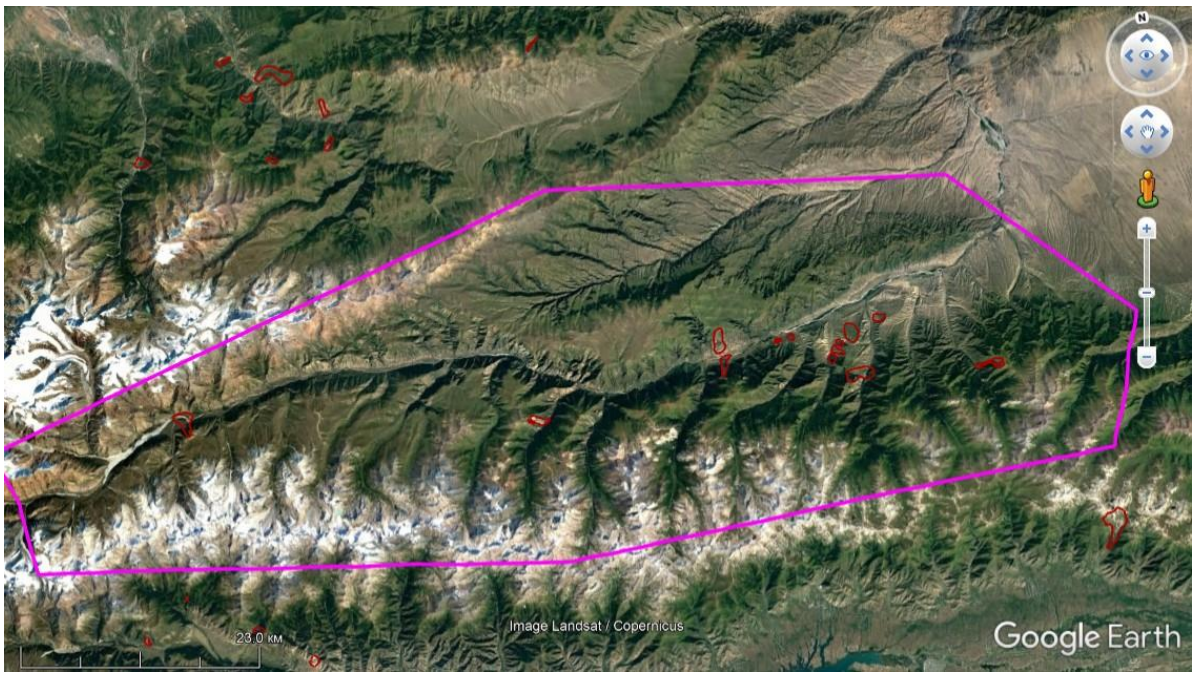



Рис. 1. Участок исследований
с выявленными потенциально опасным развитием оползневых процессов

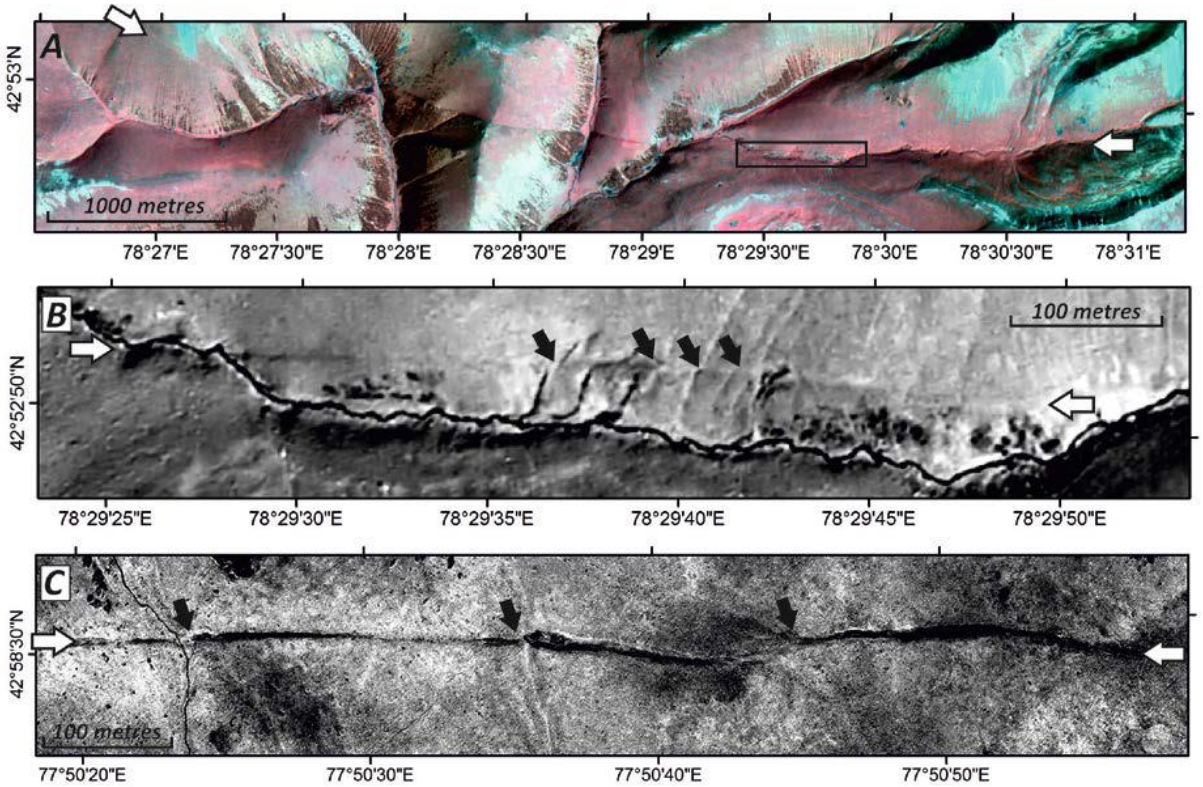



Рис. 2. Примеры активных разломов, закартированных
в пригребневой части Кунгейского хребта (севернее с. Талдысу, Саты и др.)

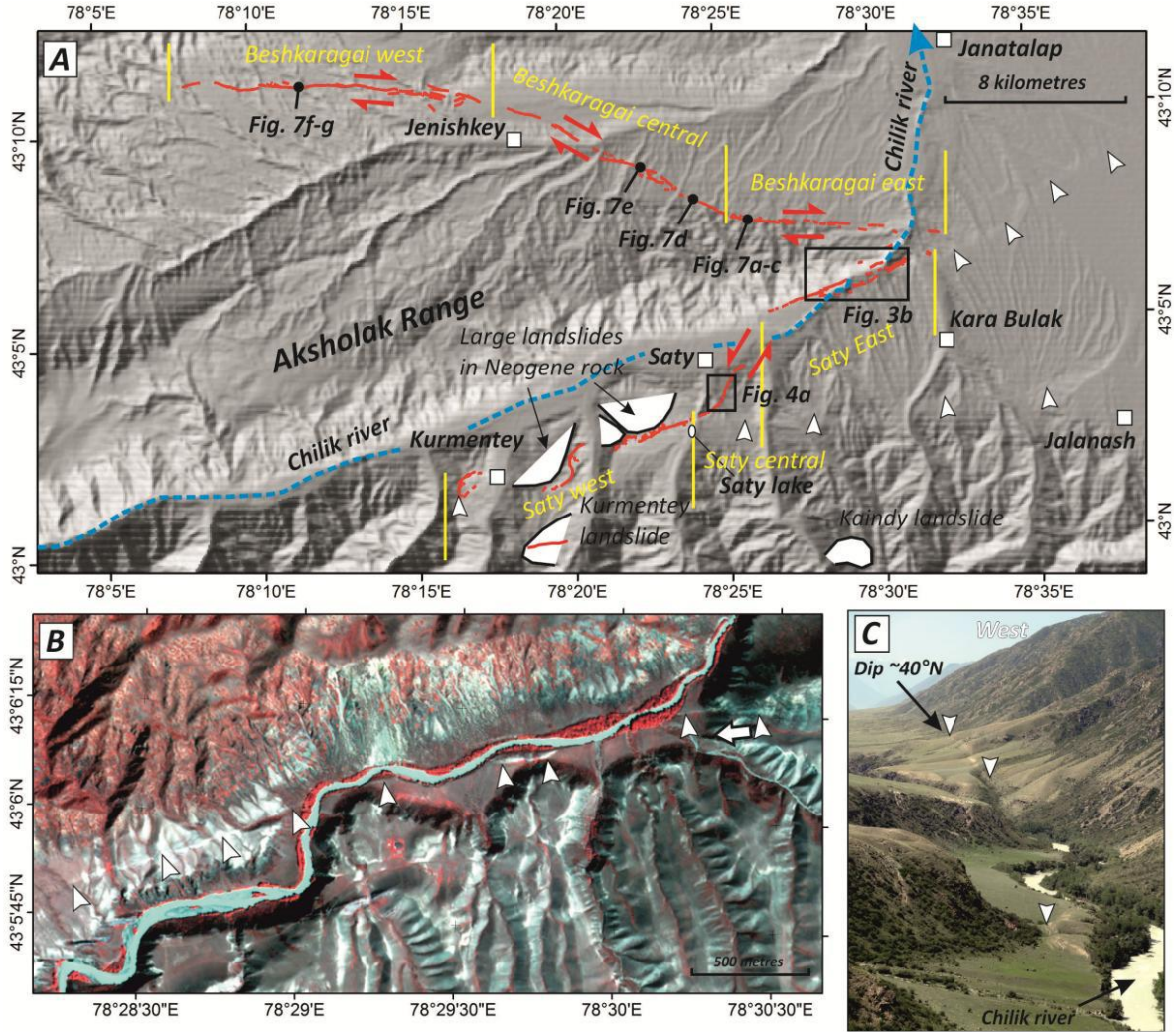



Рис. 3. Новейшие и активные разломы восточной части Северного Тянь-Шаня

Основные разломы показаны черным; поверхностные разрывы сильных землетрясений – красным. Поверхностные разрывы Кеминского землетрясения 1911 г. приведены по данным Arrowsmith et al. (2015). Разрывы Чиликского землетрясения 1889 г. показаны по нашим собственным данным и данным Tibaldi et al. (1997) и Crosby et al. (2006). Изосейсты двух землетрясений показаны по данным Arrowsmith et al. (2015). Черные звездочки указывают на эпицентры исторических землетрясений (Kulikova et al., 2015).

**Список литературы**

1.Абдрахматов К.Е. Современная блоковая структура Северного Тянь-Шаня. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов // Сб. материалов Второго международ. симп., М. – Бишкек, 2003.

Абдрахматов К.Е. Внутриконтинентальное горообразование и сейсмическая опасность (на примере Тянь-Шаня). Бишкек, 2013.

3.Ляпишев К.М. Обзор современных исследований оползней по данным аэрофото и спутниковых съёмок. Краснодар, 2009.

УДК 550.3

**К.В. Симонов[1], М.А. Курако[2], А.С. Кругляков[2], А.Н. Мацулев[1]**

[1] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru, mkurako@sfu-kras.ru

# АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАРТ МАКСИМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ НА ОСНОВЕ ШИАРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Задача раннего предупреждения о цунами решается на основе предвычисления распространения катастрофических волн от заданных очагов источников цунами в цунамигенных областях океана до защищаемых участков береговой зоны. На экспериментальном материале проведённых исследований – численном моделировании цунами в Тихом океане за период с 2001 по 2017 г. – показано, что предлагаемая вычислительная методика, включающая в себя применение алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с процедурой контрастирования изображений, является эффективным инструментом для анализа внутренних геометрических черт изучаемых объектов – карт максимальных высот цунами. На этих картах отображается направленность и распределение энергии волны, которая отражает анизотропию дна океана, что важно при решении задач прогноза опасности цунами.

*Ключевые слова: цунамигенные землетрясения и цунами, карты максимальных высот волн, направленность энергии, анизотропия дна океана, шиарлет-преобразования, геометрический анализ визуальных данных.*

**Введение.** В первые десятилетия XXI в. в различных акваториях Тихого океана произошла череда катастрофических подводных землетрясений, вызвавших разрушительные цунами, проявления которых отмечены вдоль тихоокеанского побережья Дальнего Востока России. Наибольшие разрушения вызвали гигантские волны от цунамигенных землетрясений в районе Суматры (2004), Чили (2010) и Японии (2011).

Раннее предупреждение о цунами и оценка опасности являются основными прикладными задачами в проблеме цунами. Надёжность и своевременность прогноза цунамиопасности и оценки цунамириска определяют степень защищённости приморских территорий. Существующие международные и национальные службы предупреждения о цунами активно используют всю имеющуюся информацию о катастрофическом процессе для оповещения об угрозе воздействия цунами. При этом численное моделирование процессов генерации и распространения волны в открытом океане является ведущим инструментом для решения практических задач.

Ключевым моментом процесса численного моделирования трансформации цунами, оценки конкретных высот волн вдоль побережья и прогноза цунами являются начальные условия в источнике цунами. Формирование очага цунами на поверхности морской акватории является сложным нелинейным процессом, определяющим характер волнового поля в начальный момент времени. При дальнейшем распространении длинной гравитационной волны амплитудные характеристики волнового поля и распределение энергии по частотам будут определяться как батиметрией бассейна, так и формой источника цунами, а также его эволюцией в ходе формирования и распространения.

Адекватность расчётов цунами оценивается обычно по степени согласования расчётных мареограмм с имеющимися данными мареографов в морской акватории по трассам следования цунами. Однако при полученном согласии мареограмм не устраняется неоднозначность решения обратной задачи и определения характеристик источника цунами.

© Симонов К.В., Курако М.А, Кругляков А.С., Мацулев А.Н., 2019

В связи с этим становится необходимым привлечение дополнительных данных, например, структуры волнового поля цунами в открытом океане, подводных датчиков давления, или распределения максимальных высот заплеска цунами вдоль побережья. Таким образом, комплексная обработка и анализ расчётных карт распределений высот волн цунами (направленности волновой энергии) как изображений, снимков, визуальных данных является новой актуальной задачей в проблеме цунами.

**1. Геометрический анализ визуальных данных.** В современной литературе приводятся различные варианты для автоматизации процесса обработки изображений, связанные с проявлениями опасных природных явлений. Однако получаемые результаты не всегда отвечают требованиям современной практики.

Применение алгоритмов шиарлет-преобразования [1–4] в сочетании с предлагаемой методикой контрастирования является новым вычислительным подходом в данной предметной области. Теоретической основой алгоритмического обеспечения для обработки визуальных данных являются разработанные и обоснованные вычислительные схемы геометрического анализа пространственных данных и изображений с применением вейвлет-преобразования и нового вычислительного инструмента – шиарлет-преобразования [1].

В большинстве многомерных задач важные особенности рассматриваемых данных наблюдений сосредоточены в многообразиях малых размерностей. Например, при обработке изображений край – это одномерная кривая, на которой интенсивность изображения резко меняется. В этой связи в последнее время вызывают большой интерес новые разработки, связанные с шиарлетами, где представлены эффективные инструменты для анализа внутренних геометрических черт изображений, использующие анизотропные и направленные оконные функции [3].

При таком подходе направленность изучается за счёт применения целых степеней матрицы сдвига, а эти операции сохраняют структуру целочисленной решётки, что имеет решающее значение для цифровой реализации. По сути, это ключевая идея приводит к единому анализу как в непрерывной, так и в дискретной области, обеспечивая при этом оптимально редкие приближения анизотропных характеристик.

Шиарлет-системы – это системы с параболическим масштабированием, операторами сдвига и параллельного переноса, это те же вейвлет-системы, но также включающие в себя характеристику направленности и имеющие дополнительную сдвиговую операцию (анизотропное масштабирование). Сдвигающая операция фактически даёт более удобный подход для анализа направлений, обеспечивая тем самым единую обработку непрерывных и цифровых областей в отличие от кервлетов, которые базируются на вращении в непрерывной области.

В указанных выше исследованиях представлен подход к разделению точечных и криволинейных структур с применением комбинированного набора вейвлетов и шиарлетов. Численные результаты свидетельствуют также, что полученные ранее результаты верны, т.е. этот подход лучше алгоритмов разделения, использующих вейвлеты и кервлеты, в частности алгоритм шиарлет-преобразования, быстрее и обеспечивает более точное разделение, если, например, кривизна криволинейной части велика. В рамках концепции воспроизводимых исследований описываемые алгоритмы включены в свободно доступный инструментарий [2–4].

Исходя из описанных выше теоретических и методических представлений предлагается методика геометрического анализа визуальных данных, позволяющая решать широкий класс задач обработки сложных изображений на основе шиарлет-преобразования. При этом решаются следующие задачи гидрофизического мониторинга цунами: разделение точек и кривых на изображениях; выделение контуров; визуализация данных на основе трёх алгоритмов шиарлет-преобразования. Предлагаемая вычислительная методика решения указанных задач состоит из следующих этапов:

- подготовительный этап, когда исходное изображение форматируется под расчётный шаблон и намечается последовательность расчётных процедур для оптимального решения поставленной задачи;
- запуск и настройка алгоритмического обеспечения шиарлет-преобразования, выбор конкретного алгоритма в зависимости от поставленной задачи и от условий яркости и контрастности изображений;
- загрузка и обработка исходных изображений для различных расчётных условий в зависимости от поставленной задачи;
- анализ полученных расчётных изображений, контрастирование изображений на основе применения алгоритмов FFST [2], Shearlet Toolbox [3] и Shearlab [4].

В результате проведённого исследования в качестве количественного параметра оценки эффективности алгоритмов выбрано среднее время работы алгоритмов. Изображения размерами более 512 × 512 анализируются по частям. Проводились исследования указанных типов снимков для различных условий яркости и контрастности. При исследовании возможностей шумоподавления выполнялись оценки для шума Гаусса.

Исследована задача выделения контуров объектов. Исследование алгоритма FFST выявило, что контуры объектов можно получить как сумму коэффициентов шиарлет-преобразования для фиксированного значения масштаба и всевозможных значений параметров сдвига и поворота. В связи с этим предлагается использовать эту особенность при решении задачи оконтуривания:

$$f_{contour} = \sum_{k=0}^{k_1} \sum_{m=0}^{m_1} \mathrm{sh}_{\psi}[f](j^*, k, m),$$

где $\mathrm{sh}_{\psi}[f]$ ставит в соответствие исследуемой функции $f$ коэффициенты $\mathrm{sh}_{\psi}[f](j^*, k, m)$, полученные для масштаба $j^*$, поворота $k$ и сдвига $m$; $k_1$ – количество поворотов; $m_1$ – количество сдвигов.

В рамках разработанной вычислительной методики выполнен также сравнительный анализ алгоритмов дискретного шиарлет-преобразования для решения базовых прикладных задач фильтрации и шумоподавления на визуальных данных.

**2. Контрастирование визуальных данных.** Предлагается алгоритмическая процедура контрастирования – подбора цветов и распределения плотности изолиний на изображении, которая соответствует известной методике построения упругой сетки по пространственным данным [5]. Анализируемый объект представляется в виде ограниченного двумерного многообразия, вложенного во множество исследуемых данных наблюдений (изучаемое изображение) таким образом, чтобы форма и расположение многообразия отражали основные особенности распределения точек исходных данных на изображении.

На основе изложенной постановки задачи предложен способ построения «упругой сетки», учитывающий значения введённого физического признака для исследуемых данных и характеризующий изучаемый объект. Представлено краткое описание основных элементов алгоритмического обеспечения разрабатываемой методики анализа и визуализации данных на изображении. Показаны возможности применения этой методики для обработки и анализа сложных изображений, в частности в проблеме цунами для обработки изображений карт различного вида.

Представлена общая алгоритмическая схема геометрического анализа при выполнении численных экспериментов с изучаемыми изображениями. Последовательность действий для оценки результатов анализа имеет следующий вид: для каждого снимка формируется карта эталонов, в которой пользователь-эксперт выделяет контуры объектов интереса; для каждого снимка применяются фильтры с разными настройками (размер и тип ядра); по каждому снимку готовится серия отфильтрованных изображений; к этой серии применяются методы выделения контуров.

Далее оценивается результат применения фильтров и алгоритмов выделения контуров: насколько видны объекты интереса и их контуры (в процентном соотношении от эталона); сколько лишней информации (в процентах от размеров изображения). Разработанная методика контрастирования применяется для изображений с выделенными контурами, затем оцениваются результаты расчётов цветового выделения, т.е. насколько видны объекты интереса и их контуры (в процентном соотношении от эталона), а также в сравнении с простым выделением контуров; долю незначимых участков; в итоге, формируется заключение о том, какой вариант лучше.

Далее выполняется общая оценка пригодности фильтров для обработки изучаемых снимков. Для наилучшего метода (алгоритмы шиарлет-преобразования в сочетании с контрастированием) проводятся дополнительные эксперименты для изображений каждого класса. Формируются искусственно зашумлённые изображения с добавлением шума (5, 10, 15 %), где представлено следующее распределение шумовых компонентов – 70 % аддитивного и 30 % импульсного.

После этого подготовительного этапа выполняются следующие исследования: формируется набор отфильтрованных с помощью разных фильтров изображений; применяется разработанная методика; выполняется сравнение полученных результатов с результатами, полученными с незашумлёнными изображениями. В итоге оцениваются результаты по контрастированным объектам интереса – насколько они близки к тому, что получены на незашумлённых снимках и выдаётся заключение о качестве решения поставленной задачи различными фильтрами.

Предлагаемые в данной работе подходы к визуализации изображений позволяют повысить объективность обнаружения и разрешающую способность, а также возможность создания трёхмерного виртуального изображения изучаемого объекта.

В работе представлены примеры обработки результатов численного моделирования цунами (карт распределений высот цунами). Приведённые особенности выделения цветом изучаемых объектов обусловлены поставленной задачей (см. рисунок).

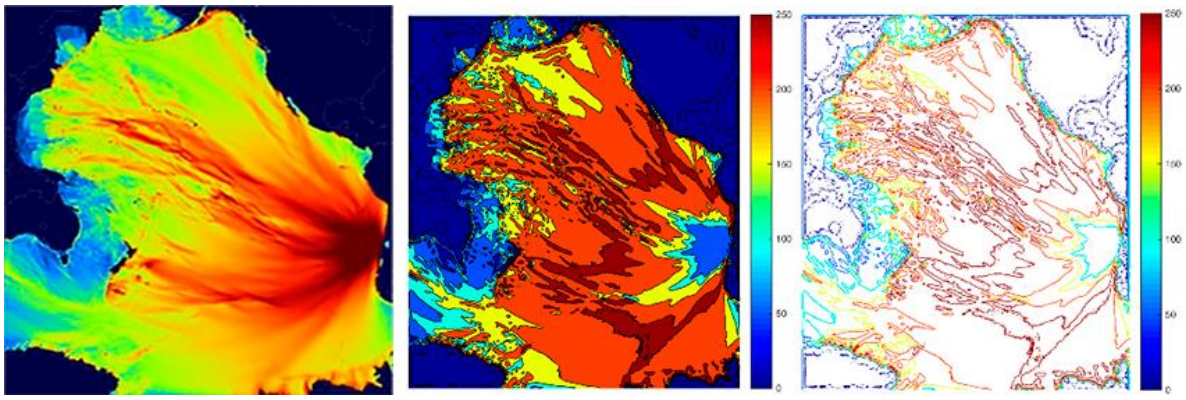



Рисунок. Обработка и анализ карты максимальных высот цунами от чилийского землетрясения 2010 г.: слева – исходное изображение (карта высот (амплитуд)); в центре – результат шиарлет-преобразования и контрастирования карты; справа – геометрический анализ и выделение контуров объектов интереса

**Заключение.** В рамках усовершенствованной технологии вычислительного эксперимента выполнены экспериментальные исследования особенностей проявления цунами в ближней зоне источников цунами для восточных цунамигенных областей Тихого океана (2001–2017 гг.): Перу (23.06.2001), Чили (27.02.2010, 01.04.2014, 16.09.2015), Коста-Рика (05.09.2012), Эквадор (16.04.2016), Мексика (08.09.2017). Применение разработанной методики обработки и анализа визуальных данных на основе алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с процедурой контрастирования позволило значительно улучшить результаты оценки направленности распространения энергии цунами и, соответственно, особенностей анизотропии рельефа дна.

Разработанный вычислительный инструментарий для анализа внутренних геометрических черт экспериментальных изображений позволяет успешно решить задачу количественного морфологического (геометрического) представления визуальных данных. Предлагаемая методика позволяет повысить точность выделения квазикруглых и линейных структур, а также повысить визуальное качество изображений изучаемых объектов в рамках процедуры контрастирования снимка для адекватной количественной оценки их основных характеристик.

**Список литературы**

1. Donoho D.L., Kutyniok G. Geometric separation using a wavelet-shearlet dictionary // Proc. SampTA'09 (Marseille France 2009). 2009.

2. Hauser S. Fast finite shearlet transform: a tutorial. University of Kaiserslautern. 2011.

3. Guo K., Labate D., Lim W-Q. Edge analysis and identification using the Continuous Shearlet Transform // Appl. Comput. Harmon. Anal. 2009. № 27. P. 24–46.

4. Kutyniok G., Labate D. Introduction to shearlets // In Shearlets. Multiscale analysis for multivariate data. Boston MA Birkhauser. 2012. P. 1–38.

5. Горбань А.Н., Зиновьев А.Ю. Питенко А.А. Визуализация данных методом упругих карт // Информационные технологии. 2000. № 6. С. 26–35.

УДК 911.52

**А.А. Синюткина**

Сибирский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия
e-mail: ankalaeva@yandex.ru

# ОЦЕНКА ГИДРОМОРФНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГЕОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ LANDSAT

Представлены результаты оценки гидроморфной трансформации геосистем в зоне влияния северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота с использованием спутниковых данных. Определение границ зоны потенциального заболачивания проведено на основе полуавтоматической классификации данных Landsat-8. Средняя протяженность зоны влияния северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота составила 3,9 км с колебаниями в пределах 0,6–8,4 км.

*Ключевые слова: Большое Васюганское болото, заболачивание, дешифрирование, торф, геоботанические исследования.*

В условиях глобального изменения климата в настоящее время становится все более актуальной проблема заболачивания лесов на периферии верховых болотных массивов [1]. Поглощение $CO_2$ и накопление углерода в виде торфа в пределах заболоченных лесов является одним из не учитываемых в настоящее время агентов, сокращающих глобальный дисбаланс углерода. Это связано, в том числе, с отсутствием современных оценок площадей распространения заболоченных лесов в периферийных частях крупных болотных массивов, к каким относится Большое Васюганское болото. Использование современных методов исследования на основе анализа спутниковых данных в сочетании с наземными исследованиями позволит оценить протяженность зон влияния верховых болотных массивов и получить новые данные о современном состоянии и степени гидроморфной трансформации геосистем прилегающих к болотам территорий. Целью исследования является разработка и апробация алгоритма классификации растительного покрова по спутниковым данным Landsat для оценки гидроморфной трансформации геосистем в зоне влияния северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота (Иксинский и Бакчарский болотные массивы, подзона южной тайги Западной Сибири) (рис. 1).

Методика исследования включала в себя проведение полевых ландшафтных исследований в пределах ключевого участка в бассейне р. Ключ с определением степени гидроморфной трансформации экосистем на ключевых участках для создания обучающих выборок. Оценка степени гидроморфной трансформации геосистем проведена с использованием следующих показателей: ступень увлажнения местообитаний, рассчитанная по видовому составу растительного покрова в соответствии с [2, 3] с учетом удельного веса проективного покрытия видов; мощность торфяной залежи и мощность слоя верхового торфа при его наличии; уровень грунтовых вод. Определение мощности торфяной залежи, выделение стратиграфических слоев проведено с использованием метода георадиолокации с привлечением дополнительной информации ручного зондирования на опорных точках с отбором образцов торфа для определения ботанического состава и степени разложения (ГОСТ 28245–89). Обработка и интерпретация георадарных данных проведена с использованием программы GeoScan32.

© Синюткина А.А., 2019

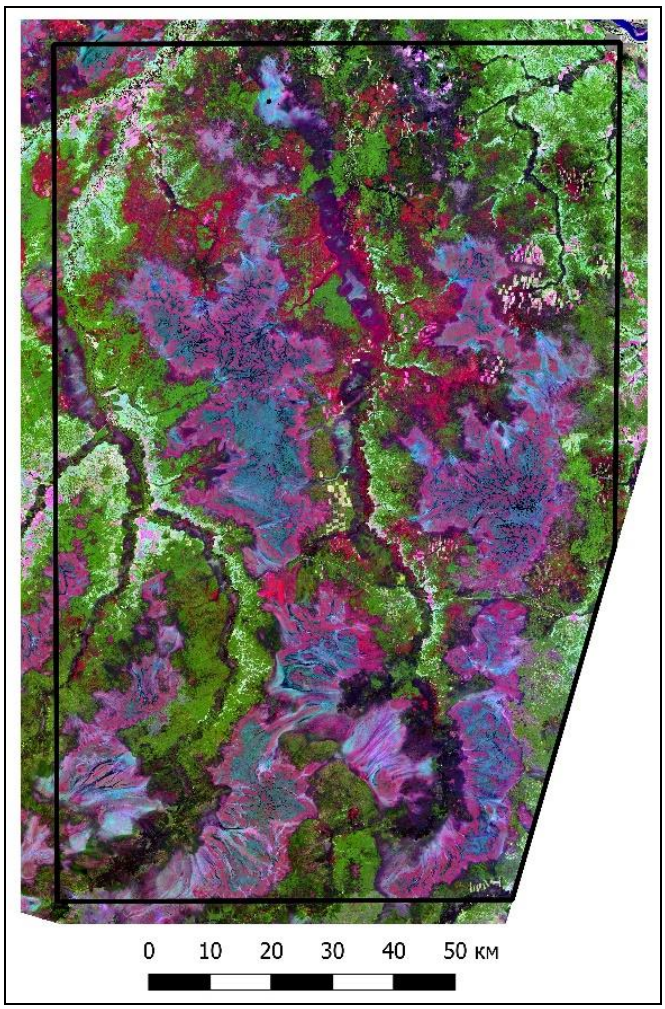



Рис. 1. Схема расположения объектов исследования
(КС Landsat-8, 17.07.2018)

Определение границ зоны потенциального заболачивания проведено на основе полуавтоматической классификации данных Landsat-8 (дата съемки 17.07.2018) с использованием Semi-Automatic classification plugin. Обучающая выборка составлена с использованием данных полевых ландшафтных исследований и включала в себя четыре класса участков, индицирующих развитие процессов гидроморфной трансформации геосистем: 1) сильно переувлажненные участки лесов, характеризующиеся массовым повалом деревьев; 2) сосново-кустарничковое травяно-сфагновое верховое болото за пределами основного контура болотных массивов, 3) кедрово-березовый заболоченный лес; 4) сосново-березовый заболоченный лес. На рис. 2 представлены результаты классификации на примере ключевого участка в бассейне р. Ключ (Бакчарский болотный массив) Оценка протяженности зоны влияния определена методом ландшафтного профилирования. Всего заложено 40 профилей, пересекающих границу болотных массивов параллельно линиям стока. На каждом профиле поведено измерение протяженности зоны влияния болотных массивов в соответствии с распространением участков, выделенных по результатам дешифрирования снимка Landsat.

Согласно данным полевых ландшафтных исследований участки характеризуются накоплением торфа мощностью до 1 м и более, увлажнение изменяется в пределах 14,2–15,7 баллов и характеризуется как сыровато-лесолуговое, сыро-лесолуговое и мокро-лесолуговое согласно оценке условий местообитаний методом стандартных экологических шкал [2, 3]. Средняя протяженность зоны влияния северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота составила 3,9 км с колебаниями в пределах 0,6–8,4 км.

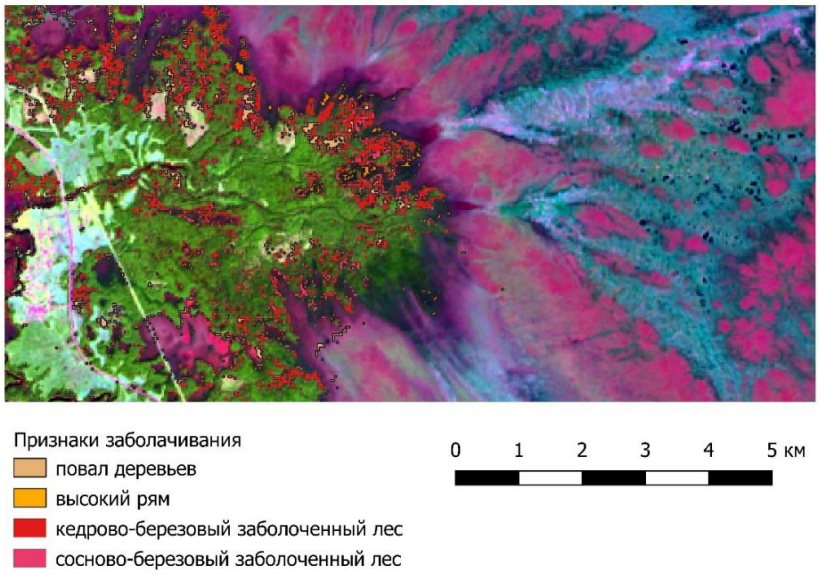



Рис. 2. Зона влияния Бакчарского болотного массива
на примере ключевого участка (КС Landsat-8, 17.07.2018)

**Заключение.** Использование современных методов исследования на основе анализа спутниковых данных позволило получить качественно новые научные данные о пространственной дифференциации прилегающих к болотам территорий и оценить протяженность зоны влияния крупных верховых болотных массивов. Разработанные алгоритмы моделирования гидроморфной трансформации экосистем будут являться универсальными для таежной зоны Западной Сибири и могут быть использованы для оценки процессов заболачивания на значительных по площади территориях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00387 – мол_а).*

**Список литературы**

1. Бабиков Б.В., Кобак К.И. Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания // Изв. вузов. 2016. № 1 (349). С. 6–36.

2. Прокопьев Е.П. Экология растений (особи, виды, экогруппы, жизненные формы). Томск: Том. гос. ун-т, 2001. 340 с.

3. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 197 с.

УДК 528.7

**Б.В. Содномов[1], А.А. Аюржанаев[1], Ю.М. Ильин[2], М.В. Семенова[2], Б.З. Цыдыпов[1]**

[1] Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия
[2] Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, Россия
e-mail: sodnomov@binm.ru

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ПРИМЕРЕ ОВСА

Использование точного земледелия, элементом которого является БПЛА, приводит к снижению климатических рисков. На основе аэрофотоснимков БПЛА DJI Mavic определены высоты побегов и построения вегетационных индексов. Цифровые модели местности, полученные по данным лазерной сканирующей системы Lieca ScanStation приняты как эталонные значения. Построены статистические модели прогноза урожайности на основе данных БПЛА и климатических данных. Выявлено, что полученные данные обеспечивают возможность для корректировки мелиоративного и агрохимического режима и прогнозирования урожайности на ранних этапах.

*Ключевые слова: БПЛА, точное земледелие, вегетационные индексы.*

Целью работы является возможность использования БПЛА для мониторинга состояния зерновых культур и прогнозирования урожайности в климатических условиях Республики Бурятия.

Точное земледелие позволяет проводить оптимизацию поливов и режима аэрации, что в свою очередь приводит к снижению климатические риски растениеводства и увеличению урожая [1]. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) является необходимым элементом точного земледелия и являются наиболее перспективными для нужд сельского хозяйства [2]. К их основным задачам относятся: инвентаризация и планирование, мониторинг сельскохозяйственных земель и прогноз урожайности.

**Материалы и методы.** Проведена разбивка опытного поля на орошаемые и неорошаемые участки с контрольным опытом (без удобрений) и с дозами удобрений N60P10K20 и N120P10K20 с трехкратной повторностью. Для посева использован следующий семенной материал: овес сорта «Ровесник» и люцерна сорта «Находка», районированные для условий юга Восточной Сибири.

В работе использованы квадрокоптер DJI Mavic для определения цветных вегетационных индексов (ВИ) и высоты побегов с сантиметровой точностью, сканирующая система Lieca ScanStation для определения высоты побегов с миллиметровой точностью. Измерения температуры и влажности воздуха и почвы, количества осадков осуществлялись стандартными приборами и методами. Периодичность наблюдений составила 1 съемка в неделю; в течение сезона проведено 13 съемок.

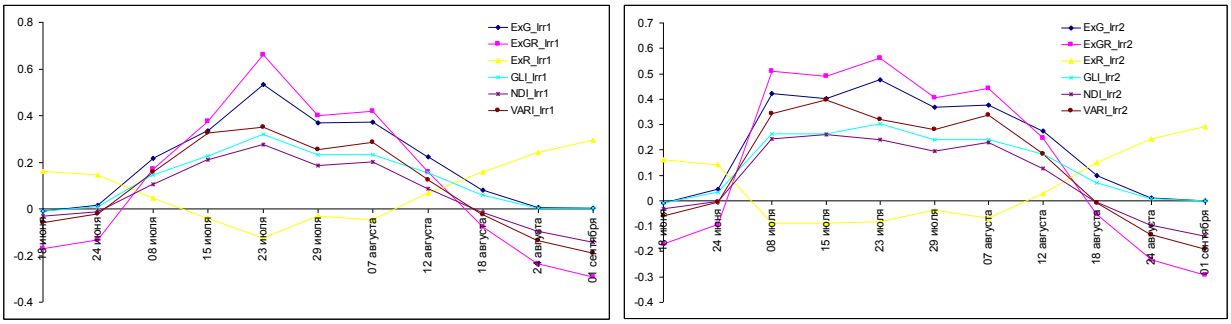
Температура почвы и воздуха измерялась автономными регистраторами температуры, количество выпадающих осадков – осадкомером Довитая, уровень залегания грунтовых вод – по наблюдательным скважинам и пьезометрам.

Камеральные работы состояли в обработке полученных данных аэрофото- и лазерной съемки, статистической обработке полученного массива данных и анализе результатов исследования. Полученные аэрофотоснимки использованы для расчета следующих вегетационных индексов (ВИ): $NDI = (g - r) / (g + r)$, $ExG = 2g - r - b$,

© Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Ильин Ю.М., 2019

ExR = 1,4r – g, ExGR = 3g – 2, 4r – b, VARI = (g – r) / (g + r – b), GLI = (2g – b – r) / (2g + b + r), где *r* – отношение спектральной яркости в красном канале, *g* – в зеленом, *b* – в синем к их сумме [3]. Результаты исследований разных авторов в целом дают хорошие оценки зависимости ВИ от продуктивности и иных свойств сельскохозяйственных культур [4–6]. Для каждой опытной площадки получены усредненные значения индексов. Цифровые модели поля, полученные в результате лазерной съемки, использованы для контроля линейного роста сельскохозяйственной культуры (определения средней высоты посевов). Статистическая обработка данных проведена с помощью стандартных тестов и техник.

**Результаты и обсуждение.** Динамика вегетационных индексов для орошаемого контрольного варианта (без удобрений) выявила четко выраженный сезонный ход (рис. 1). Динамика всходов овса орошаемого опыта для контрольного варианта и с внесением удобрений различается ранним ростом ВИ для удобряемых участков поля. Сезонная динамика ВИ отличается от контроля. Хотя наибольшее значение почти для всех ВИ наблюдается, как и для контрольного варианта, 23 июля; тем не менее, здесь максимум не выражен – резкий рост ВИ происходит после 24 июня и устанавливается на одном уровне, после чего происходит спад с 29 июля. Аналогичный ход ВИ наблюдается и для вариантов с двойной дозой азотистого удобрения.




*а* *б*

Рис. 1. Сезонная динамика ВИ овса на контрольном (*а*) и с внесением удобрений (*б*) вариантах орошаемого опыта

Сезонная динамика ВИ в условиях богарного опыта имеет ряд особенностей (рис. 2). Во-первых, не удалось установить различие значений ВИ для контрольного варианта без внесения удобрений и вариантов с однократной и двукратной дозой азота; во-вторых, ВИ зависят от режима выпадающих осадков, что проявляется в падении их значений, когда было зарегистрировано декадное отсутствие осадков с середины августа; в-третьих, значения ВИ для богарного опыта в 2-3 раза меньше, чем для орошаемого опыта.

Поскольку первоначальный посев овса в богарных условиях не дал всходов, 4 июля был произведен его пересев на зеленую массу (что является распространенной сельскохозяйственной практикой). Оба опыта проводились в различных метеорологических условиях и провести синхронный анализ ВИ орошаемого и богарного опыта не представляется возможным.

Для проверки наличия различий между вариантами опытов статистическому анализу подвергнуты ряды высот сельскохозяйственной культуры и их вегетационных индексов. Для анализа использована часть выборки, соответствующая росту ВИ до максимальных значений, так как ценность ранней оценки состояния сельскохозяйственной культуры существенно выше с точки зрения проведения своевременных мероприятий для сохранения или повышения урожайности. На поливе наибольшие коэффициенты корреляции с высотой овса равны 0,938 (ExR), 0,875 (GLI), 0,861 (ExG) для контрольного варианта, вариантов N60P10K20 и N120P10K20, соответственно. В богарных опытах наибольшие коэффициенты корреляции с высотой овса показал индекс ExGR.

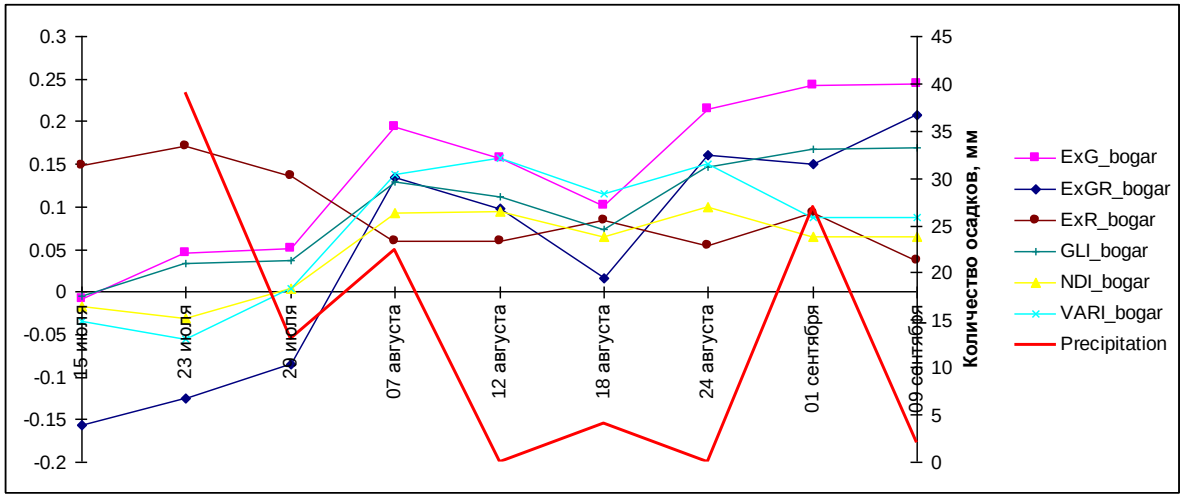



Рис. 2. Сезонная динамика количества осадков и ВИ овса в условиях богарного опыта

Двухвыборочный t-тест с зависимыми выборками ($N$ = 18, $p$ < 0,05) показал, что для каждого ВИ среднее значение контрольного опыта различимо с вариантами с внесением удобрений, при этом средние значения ВИ для последних вариантов не различимы.

По результатам анализа различий в ВИ между орошаемым и богарным опытом для всех вариантов нулевая гипотеза о равенстве средних отвергнута.

Для разработки статистических моделей использован массив данных, полученных в результате выполнения исследования. В качестве зависимой переменной (предиктант) использованы данные об урожайности. Всего в разработке различных вариантов статистических моделей использовано 46 предикторов: вегетационные индексы, данные о температуре и влажности воздуха и почвы на разных уровнях, осадки, уровень грунтовых вод, биоклиматический коэффициент. В результате получены различные статистические модели прогноза урожайности, которые объясняют до 90 % дисперсии ($R^2$). При уменьшении числа переменных с целью более раннего прогноза его точность уменьшается и зависит от набора предикторов, включенных в модель. Метод пошагового включения переменных, позволяющий определить оптимальный набор предикторов (нестрого говоря), также был использован в разработке моделей. Аналогичным образом, в зависимости от входного набора предикторов, изменялся и результат, например, при включении лишь почвенных данных и ВИ, оптимальным оказывался набор «ВИ – температура почвы на глубине 30 см».

**Выводы.** Использование БПЛА позволяет проводить мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, корректировать мелиоративный и агрохимический режим и прогнозировать урожайность.

Проведенный статистический анализ выявил, что все протестированные индексы, полученные по данным аэрофотосъемки с БПЛА, дают принципиальную возможность дифференциации участков поля с недостаточным уровнем удобрений и поливом.

Полученные данные могут обеспечить адекватный прогноз урожайности. Также показано, что вегетационные индексы без агрометеорологической информации могут обеспечить (хотя и худшее) прогнозирование урожайности.

*Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-016-00211.*

**Список литературы**

1. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People / H. Charles [et al.] // Science. 2010. Vol. 327 (5967). P. 812–818.

2. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственном производстве / А.С. Сметнев [и др.]. // Вестн. Рос. Гос. аграр. заоч. ун-та. 2015. № 18 (23). С. 51–56.

3. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery / X. Zhou [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. Vol. 130. P. 246–255.

4. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture / J. Gagoa [et al.] // Agricultural Water Management. 2015. № 153. P. 9–19.

5. Geipel J., Link J., Claupein W. Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system // Remote Sensing. 2014. № 11. P. 10335–10355.

6. Multi-temporal crop surface models combined with the RGB vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland / M. Possoch [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. XLI-B1. P. 991–998.

УДК 537.86

**А.В. Сорокин[1], А.Н. Остыловский[2], А.Н. Борисов[3], В.В. Иванов[3], Д.С. Макаров[1], Д.В. Харламов[1]**

[1] Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[3] Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН
e-mail: sorav@iph.krasn.ru

# ОЦЕНКА ОБЪЕМА БИОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1

Представлен метод оценки объема биомассы древостоя на основе данных измерений ослабления сигналов навигационных спутников диапазона L1 и морфологических особенностях лесного массива. Использована диэлектрическая модель смешанного диэлектрика с естественными структурными характеристиками древостоя. Рассмотрен вариант восстановления объема биомассы древостоя по данным радиоскопии на тестовом участке смешанного леса. Обсуждаются практические приложения метода непрерывного локального мониторинге состояния древостоя.

*Ключевые слова: древостой, биомасса, полиструктурность, диэлектрическая модель, радиоскопия, сигналы ГЛОНАСС и GPS, диапазон L1.*

**Ведение.** Физика взаимодействия радиоволн с лесом являются актуальным направлением исследований фундаментальных и прикладных наук. Лесные массивы являются случайно неоднородными средами с элементами дерева различной формы, размеров и пространственной ориентации [1]. Электрофизические свойства древостоя как многокомпонентной среды, определяются молекулярной структурой древесины, включая воду, и макроскопическим распределением элементов деревьев в объеме древостоя.

Возможен непрерывный мониторинг состояния древостоя методом радиоскопии с использованием сигналов навигационных спутников [2]. Электрофизические характеристики древостоя определяются количеством биомассы древостоя по фракциям, влажностью древесины, хвои, листьев и пространственным распределением деревьев.

Зондирование лесных массивов сигналами различных спутников навигационных систем GPS и ГЛОНАСС с частотой в 1 Гц обеспечивает сканирование древостоя на площади до 1 га. Координатная привязка сканирующих потоков импульсных сигналов позволяет определять локализацию изменения биомассы и её влажности [3].

**Метод определения объемной плотности биомассы древостоя.** Сигналы каждого навигационного спутника покрывают половину поверхности земного шара. Расположение антенны в древостое на поверхности почвы с вертикально ориентированной осью диаграммы направленности позволяет регистрировать зондирующий поток отдельного спутника в аналитическом объеме $V$ в виде конуса с углом 160$^{o}$ и вершиной на антенне. Выделим в этом объеме конические каналы с телесным углом, соответствующим первой зоне Френеля. В данном объеме антенна регистрирует рассеянные древостоем сигналы с разностью хода не более $\lambda/4 \approx 5$ см. Вклады сигналов с большей разностью хода будут заметно меньше и данный объем, в основном, определяет величину регистрируемого сигнала после прохождения древостоя. Азимут и угол возвышения спутника в совокупности с координатами расположения антенны позволяют рассчитать коэффициенты погонного ослабления в древостое с координатной привязкой [3].

© Сорокин А.В., Борисов А.Н., Иванов В.В., Остыловский А.Н., Макаров Д.С., Харламов Д.В., 2019

Древостой как статистически неоднородная среда смешанного диэлектрика с локальной проводимостью для радиоволн диапазона L1 является рассеивающей и поглощающей средой. Общие потери мощности сигнала в процессе распространения в лесу определяются поглощением и множественным рассеянием на древесине, хвое, листьях [1].

В объеме $V_F$ конического канала с телесным углом Френеля в слоях малой толщины δ, перпендикулярных волновому вектору сигнала, с объемной долей древесины μ и коэффициентом ослабления ν потери мощности сигнала будут определятся произведением νμδ.

Прохождение сигнала от верхней границы древостоя до антенны через число слоев H/δsinφ дает коэффициент ослабления сигнала $(1 - \nu\mu\delta)^{H/\delta\sin\varphi}$. Предельный переход при δ → 0 приводит к выражению для ослабления мощности сигнала $P_0$ на входе в древостой до величины $P$ на приемной антенне:

$$P = P_0 \exp\left(\frac{\nu\mu H}{\sin\phi}\right) \qquad (1)$$

Полученный экспоненциальный закон аналогичен известным законам поглощения и рассеяния электромагнитных волн оптического диапазона в различных средах [4]. Объем $V_F$ определяется из угловых координат навигационного спутника и средней высоты древостоя. Среднее значение доли объема биомассы в этом объеме определяется выражением $\mu V_F$, где

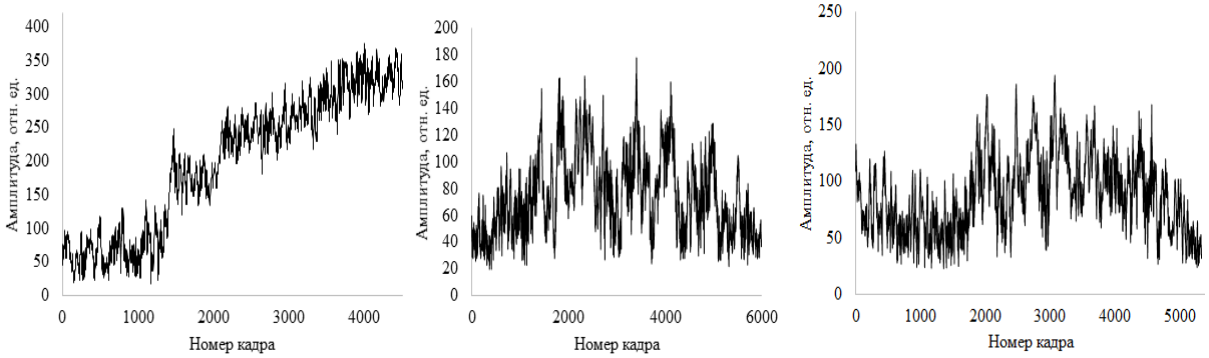
$$\mu = \frac{\ln\frac{P_0}{P}}{\nu H}\sin\phi \qquad (2)$$

**Радиоскопия древостоя.** Ключевым моментом для выявления возможностей метода определения объема древостоя является подбор тестовых объектов. Характеристики прошедших сигналов навигационных спутников в древостое меняются в зависимости от породного состава, возраста деревьев, диаметра столов, размеров и структуры крон, структуры размещения деревьев на исследуемом участке [5]. Проведение измерений, анализ данных и выявление связи изменения характеристик проходящих радиоволн сквозь лесной полог с конкретными биометрическими показателями древостоя требует максимального уменьшения числа факторов, влияющих на ослабление мощности сигнала. Такими объектами могут быть чистые по составу насаждения с равномерным размещением деревьев, без прогалин и явно выраженного группирования. Желательно отсутствие подроста, подлеска и кустарничкового яруса. Важным является явно выраженные слои крон и стволов древостоя.

Однако смешанные хвойно-лиственные леса интересны тем, что имеют заметные изменения электрофизических характеристики крон, связанные с появлением и опадом листвы на фоне сохраняющейся хвои. Поэтому в качестве тестового объекта выбран участок смешанного сосново-березового насаждения, расположенного на территории городских лесов вблизи СФУ. Подрост, подлесок и кустарничковый ярус отсутствуют. Насаждение представлено небольшими участками сосняков и березняков. Сосновый древостой (сосняк мелкотравный) площадью около 1,0 га II класса бонитета имеет следующие таксационные характеристики: диаметр на высоте 1,3 м 26,0 см, высота – 23,5 м, полнота – 0,9, запас стволовой древесины – 290 м$^3$. Березовый древостой (березняк разнотравный) площадью 0.4 га III класса бонитета имеет следующие таксационные характеристики: диаметр на высоте 1,3 м 25,0 см, высота – 20,5 м, полнота – 0,7, запас стволовой древесины – 170 м$^3$.

Сигналы диапазона L1 систем GPS и ГЛОНАСС регистрировались аппаратурой МРК-32. Высота расположения антенны над уровнем почвы 0,25 м. Ось диаграммы направленности антенны ориентирована вертикально. Координаты расположения антенны 56°00'07,6" N 92°46'09,2" E. Антенна находилась на середине опушки со смещением на 3м к южной границе площадки.

Продолжительность сеанса регистрации 3 ч 2 мин. Частота отсчетов составляла 1 Гц, за указанный интервал времени лесной массив просканировали 13 спутников из каждой группировки. Расположение антенны обеспечивало регистрацию сигналов ГЛОНАСС, GPS, прошедших через массив леса и частично свободное пространство, в интервале углов азимута 0–360° и углов возвышения 10–90°. Максимальная длина трассы прохождения сигнала в лесном массиве составляет около 100 м. Графики изменения амплитуды сигналов от времени (шкала кадров, дискретность 1 с) представлены на рисунке.




*а* *б* *в*

Рисунок. Графики изменения амплитуды сигналов от времени:
*а* – спутника ГЛОНАСС 18, лесной массив (номера кадров 1–2000) и свободное пространство (номера кадров 2000–4000), диапазоны углов возвышения – 19–55°, азимутов 230–260°;
*б* – спутника GPS 3, лесной массив диапазоны углов возвышения – 16–34°, азимутов – 100–37°;
*в* – спутника GPS 24, лесной массив, диапазоны углов возвышения – 21–31°, азимутов 260–320°

Результаты и обсуждение. Однозначно определенное положение аналитического объема VF конического канала позволяет выявлять пространственные диэлектрические неоднородности в древостое, связанные с вариациями биомассы и ее влажностью. Временные зависимости амплитуды ослабленных сигналов в древостое используются для определения коэффициенты погонного ослабления, отнесенные к участкам разных видов леса с учетом известных таксационных характеристик. Зондирующий сигнал для траекторий спутников с углами возвышения 20–40º проходит последовательно слои крон и стволов. Увеличение угла возвышения спутника позволяет выбрать сигналы, ослабленные только кронами, изменение азимутального угла обеспечивает сканирование площади древостоя до 3 Га в интервале углов 0–360○. Связанные величины ν и μ при возможности калибровки по однородным древостоям дают возможность восстанавливать ν при известном значении μ, определенным по таксационным характеристикам. В долговременном мониторинге древостоя необходим учет изменений диэлектрической проницаемости, связанный с сезонными циклами влажности древесины и хвои, состояния листвы.

**Выводы.** Принципиальная возможность метода восстановления долей объема древесины, листвы или хвои требует разработки диэлектрической модели на основе данных о диэлектрической проницаемости древесины [6], морфологических и структурных характеристик древостоя, калибровки зондирующего сигнала. Реально создание специализированных приемников с программным обеспечением, позволяющим обрабатывать массивы регистрируемых сигналов до пользовательского уровня в течение 3–4 ч. Размещение приемной антенны на различных высотах над почвой обеспечивает получение данных о слое крон. Практические приложения метода непрерывного локального мониторинге состояния древостоя сигналами навигационных спутников могут быть полезными в лесоведении и лесопатологии.

**Список литературы**

1. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия «Телеком», 2015. 392 с.

2. Метод измерения ослабления микроволнового излучения в лесном пологе с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS. / В.Л. Миронов, А.В. Сорокин, М.И. Михайлов [и др.] // Вестн. СибГАУ. 2013. Т. 51, № 5. С. 123–126.

3. Пат. 2682718 РФ, МПК G01S 19/03 (2010.01) Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой / Макаров Д.С., Савин И.В., Сорокин А.В., Фомин С.В., Харламов Д.В. № 2018119448; заявл. 25.05.2018; опубл. 21.03.2019, Бюл. № 9. 8 с.

4. Алешкевич В.А. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 314 с.

5. Эволюция характеристик сигналов навигационных спутников в лесу / А.В. Сорокин, В.Г. Подопригора, С.В. Фомин, И.В. Савин // Изв. вузов. Серия: Физика. 2017. Т. 60, № 12/2. С. 19–22.

6. Torgovnikov G.I. Dielectric properties of wood and wood based materials. Berlin, Springer – Verlag, 1993. 194 p.

УДК 556.556+528.88

**Е.Н. Сутырина**
Кандидат географических наук, Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия
e-mail: ensut78@gmail.com

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ РАДИОМЕТРОМ AVHRR

Рассмотрены вихревые структуры в озере Байкал, детектируемые в поле температуры поверхности воды по данным радиометра AVHRR за период с 1998 по 2017 г. Определены поперечные размеры, продолжительность существования, горизонтальный градиент температуры на границе данных структур. Изучена изменчивость характеристик антициклонического вихревого образования напротив полуострова Святой Нос на границе Северной и Центральной котловин озера в безлёдный период. Разработана картосхема локализации антициклонических и циклонических вихревых образований в озере в период охлаждения.

Ключевые слова: озеро Байкал, вихревые структуры, данные AVHRR, температура поверхности воды.

Дистанционное спутниковое зондирование является полезным инструментом для наблюдения за динамическими явлениями в озерах. Вихревые образования могут регистрироваться в поле температуры поверхности воды, восстановленной на основе информации, полученной в тепловом инфракрасном диапазоне спектра, как за счёт характерной спиралевидной структуры, так и за счет различных температурных характеристик водных масс внутри и снаружи вихря. Вихри с относительно холодным ядром вращаются циклонически, а вихри с относительно теплым ядром вращаются антициклонически, что позволяет идентифицировать типы вихрей по инфракрасным изображениям температуры поверхности. В рамках данного исследования для изучения локализации и динамики вихревых образований в оз. Байкал были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за 1998–2017 гг. Для составления карт распределения температуры поверхности воды оз. Байкал использовались региональные алгоритмы тематической обработки данных AVHRR, описанные в [1].

Вихревые образования в оз. Байкал прослеживаются с начала июля до середины или даже конца ноября. По картам за соответствующий период были определены локализация и размеры вихревых образований. Наибольшие вихревые образования, различимые на спутниковых картах распределения температуры, достигают размеров около 25–40 км в поперечнике.

Наиболее заметное в оз. Байкал антициклоническое вихревое образование наблюдается ежегодно и появляется на выходе из Баргузинского залива у полуострова Святой Нос на границе Центральной и Северной котловин (обозначено цифрой «1» на рис. 1) в начале июля, постепенно увеличивается в размерах, достигает максимума в августе-сентябре, распадается только в ноябре при развитии в озере осенней гомотермии, а в отдельные годы регистрируется вплоть до ледостава и, вероятно, какое-то время существует подо льдом.

© Сутырина Е.Н., 2019

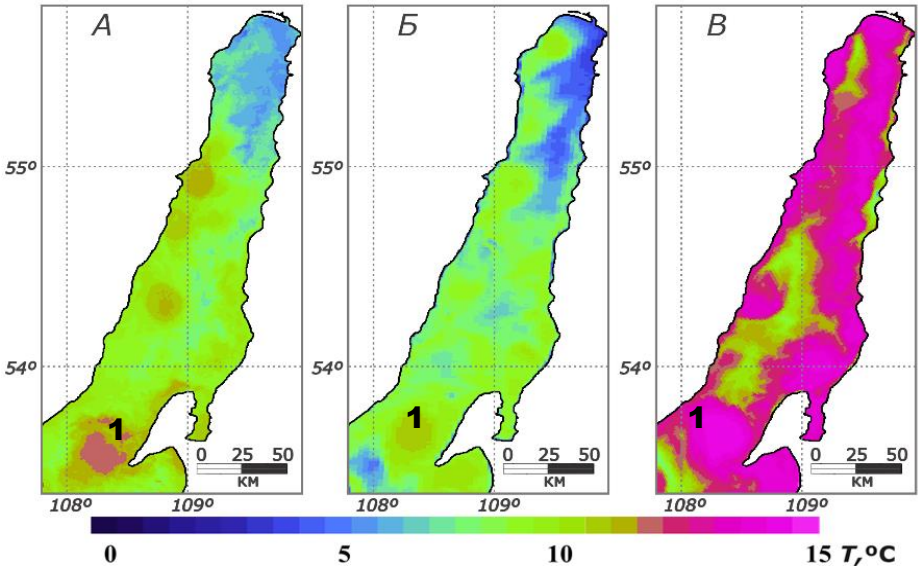



Рис. 1. Антициклонические вихревые образования в Северной котловине оз. Байкал и у полуострова Святой Нос: *А* – 26.09.2009, *Б* – 04.10.2011, *В* – 11.09.2017

На границе вихря прослеживается гидрологический фронт, в котором перепад температур по горизонтали может доходить до 1,5 ºС/км. На начальном этапе формирования данной структуры контрасты температуры поверхности воды внутри и снаружи вихря могут достигать более 8 ºС, затем уменьшаются. За период исследования наблюдался схожий характер развития указанной вихревой структуры в разные годы. Выявлено закономерное уменьшение величины горизонтального градиента температуры воды на границе вихря по мере увеличения размеров вихревой структуры. Развитие данной вихревой структуры может быть ассоциировано с выходом Баргузинского течения из Баргузинского залива, имеющего стоково-градиентный характер.

Кроме данной вихревой структуры, по картам распределения температуры воды в период охлаждения озера, как правило, со второй декады или даже с начала сентября по первую половину ноября в Северной котловине оз. Байкал наблюдается до 4–6 вихрей антициклонического или грибовидного характера одновременно в основном у западного побережья. Эти вихри выделяются существенным повышением температуры в их пределах до 2,5 ºС, а иногда и более. Продолжительность их существования может достигать 2 месяцев. Несколько раз за указанный период они могут ослабевать или распадаться и развиваться повторно. Размеры некоторых из этих образований могут доходить в поперечнике до 30 км.

Дислокация наибольшего числа относительно крупных антициклонических вихрей в Северной котловине озера в период охлаждения водоёма может быть связана с ослабеванием циклонической циркуляции в данной котловине в указанный период, а также с тем, что по сравнению с другими котловинами в Северной чаше циклоническая циркуляция имеет меньшие значения скорости и является менее устойчивой [2]. В Центральной и Южной котловинах озера в период охлаждения водоёма также образуются антициклонические вихри в непосредственной близости от берега, но данные структуры, как правило, имеют меньшие размеры, повторяемость и контрасты температуры с окружающими водами на поверхности данных акваторий, что делает их идентификацию по данным AVHRR более трудной задачей.

На рис. 2 отображается локализация антициклонических и циклонических вихревых образований в оз. Байкал, определяемых в поле температуры поверхности воды за 1998–2017 гг. в период охлаждения водоёмов. Очевидно, что ряд вихревых образований с размерами менее 10 км в поперечнике и малыми контрастами температур не могли быть детектированы по полю температуры на поверхности и отсутствуют на данной схеме.

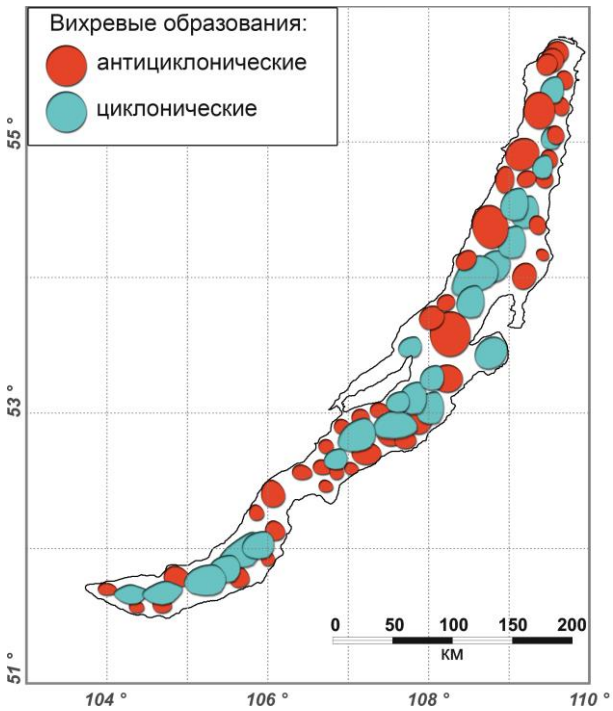



Рис. 2. Локализация антициклонических и циклонических образований, определяемых в поле температуры поверхности воды за 1998–2017 гг. в период охлаждения оз. Байкал

Антициклонические вихревые образования, как в Северной котловине, так и в Центральной, напротив полуострова Святой Нос, а также антициклонические образования более мелких размеров в Центральной и Южной котловинах, как правило, формируются, которые между стрежнем циклонических течений в котловинах и берегом часто за крупными мысами, выступающими в озеро на несколько километров, где вследствие бокового сдвига скорости существуют зона антициклонической завихрённости поля течений.

Показано последовательное уменьшение размеров и повторяемости антициклонических вихрей от Северной котловины оз. Байкал к Центральной, а затем к Южной котловине, что, как представлено выше, ассоциировано с большей устойчивостью и скоростью циклонических поверхностных течений в Центральной и, особенно, в Южной котловине.

Циклонические образования в оз. Байкал по данным тепловой инфракрасной съёмки в целом труднее детектируются из-за меньшего контраста температур внутри и снаружи вихря и из-за менее выраженной спиралевидной структуры на снимках. Циклонические вихри закономерно приурочены к центрам горизонтальных циклонических циркуляций в Южной, Центральной и Северной котловинах оз. Байкал.

*Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 17-29-05045, 17-29-05047.*

**Список литературы**

1. Сутырина Е.Н. Особенности температурного режима оз. Байкал по данным радиометра AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 121–130.

2. Жданов А.А. Горизонтальный перенос и макротурбулентный обмен в озере Байкал: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. Иркутск, 2006. 127 с.

УДК 528.8

**О.А. Томшин[1, 2], В.С. Соловьев[1, 2]**

[1] Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

[2] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

e-mail: tomshinoa@gmail.com

# ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Представлены результаты детектирования гарей в лесах Восточной Сибири по данным проекта LTDR (1984–2016 гг.) с использованием комбинированного подхода, включающего на этапе валидации экспертную оценку достоверности выделенных пороговым алгоритмом гарей. Сравнение результатов детектирования с данными MODIS (продукт MCD64A1 C6, 2001–2016 гг.) и данными проекта GFED-4 (1995–2016 гг.) показало хорошее согласие с коэффициентами корреляции ~0,95, ~0,87 и средними относительными ошибками 16,5 и 40,6 % соответственно. Проведена оценка эмиссий в атмосферу продуктов горения от лесных пожаров за рассматриваемый период.

*Ключевые слова: гари, лесные пожары, дистанционное зондирование, углекислый газ, аэрозоль.*

**Введение.** Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим значительное влияние на окружающую среду. В результате пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество парниковых газов ($CO_2$, CO, $CH_4$, $NO_x$) и аэрозольных дымовых частиц, влияющих на физико-химические процессы в атмосфере, радиационный баланс и в целом на климат [1–5]. Газодымовые выбросы могут переносится на значительные расстояния от очагов сибирских пожаров [6].

Целью работы является детектирование гарей на территории Восточной Сибири по данным LTDR AVHRR (1984–2016 гг.) с помощью комбинированного подхода на основе многопорогового алгоритма и экспертной оценки с привлечением километровых (LAC) и четырёхкилометровых (GAC) снимков AVHRR из архива NOAA CLASS и выделенных на них активных очагов («хотспотов»).

**Данные и методика.** В качестве исследуемого региона была выбрана Восточная Сибирь, большая часть территории которой покрыта бореальными лесами, ежегодно страдающими от лесных пожаров.

В качестве исходного набора данных были использованы данные проекта LTDR v. 5 (Land Long Term Data Record), представленные в виде глобальных дневных композитных снимков AVHRR/NOAA с пространственным разрешением 0,05° (~5 км) и охватывающие период с 1981 г. по настоящее время [7].

В качестве опорных использованы данные MODIS (продукт MCD64A1 C6) и данные проекта Global Fire Emission Database (GFED-4). Продукт MCD64A1 C6 представляет собой ежемесячные карты гарей с пространственным разрешением 500 м, охватывающий временной интервал с 2001 г. по настоящее время [8]. Продукт GFED-4, создан на основе данных ATSR (1995–2001 гг.) и MODIS (MCD64A1 C5.1, 2001–н.в.), имеет пространственное разрешение 0,25° [9].

Снимки AVHRR с километровым (LAC) и четырёхкилометровым (GAC) пространственным разрешением получены из архива NOAA CLASS (URL: https://www.class.noaa.gov/).

© Томшин О.А., Соловьев В.С., 2019

Для расчета инжектированных в атмосферу вследствие ЛП аэрозольных частиц PM10 и углекислого газа использовалась модель Сейлера – Крутцена [10]

$$E = A \cdot B \cdot C \cdot D,$$

где $A$ – площадь гарей, м$^2$; $B$ – плотность сгоревшей биомассы, кг/м$^2$; $C$ – доля сгоревшей биомассы, %; $D$ – удельная масса вещества, выбрасываемая при сгорании, г/кг; $E$ – общая масса вещества, выбрасываемая в результате пожара, г.

За последние два десятка лет было разработано большое количество методов и алгоритмов детектирования гарей лесных пожаров по данным дистанционного зондирования. Однако достоверность дешифрации гарей по космоснимкам зависит не только от технических параметров съемочной аппаратуры, времени и условии съемок, но и во многом – от локальных климатогеографических особенностей и характеристик растительности рассматриваемого региона.

В работе [11] предложена функциональная схема алгоритма детектирования гарей, показавшего хорошие результаты при обнаружении гарей в бореальных лесах. Детектирование гарей с помощью этого алгоритма осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит выделение потенциально выгоревших участков с помощью порогового алгоритма, основанного на определении гарей по наибольшим значениям индекса BBFI (Burned Boreal Forest Index) и по ряду вспомогательных параметров (Global Environmental Monitoring Index, 1-3 каналы AVHRR). На втором этапе осуществляется валидация выделенных участков с помощью заранее обученной на тестовом наборе данных байесовской сети, результаты которой сильно зависят от качества исходного набора данных, на котором происходит её обучение.

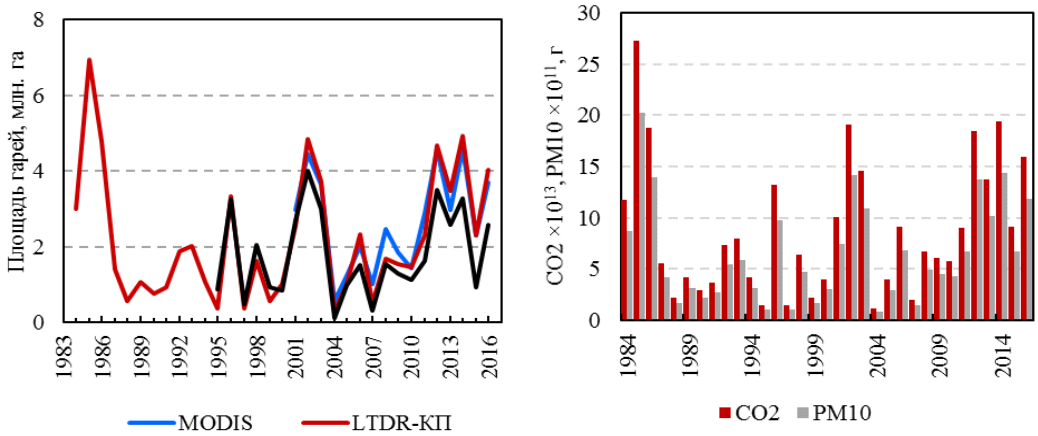
Для территории Восточной Сибири на данный момент отсутствуют наземные данные с результатами достоверного картирования гарей за продолжительный период, поэтому в качестве обучающего набора данных часто используются данные MODIS. Однако, как выяснилось в ходе работы, алгоритм MODIS может выдавать недостоверные гари на местности со сложным рельефом и/или типом подстилающей поверхности, которые в дальнейшем могут быть «унаследованы» байесовской сетью.

Уровень достоверности обнаруженных гарей можно повысить, отсеяв ложные на основе экспертной оценки, сделанной с привлечением дополнительных критериев. Для этого гари, обнаруженные с помощью порогового этапа алгоритма, разработанного по функциональной схеме [11], подвергаются валидации в следующей последовательности. На первом этапе исключаются гари, совпадающие с водными объектами. Далее происходит сопоставление с гарями предыдущего года: на этом этапе отсеиваются гари, не относящиеся к текущему году. На следующем шаге процедуры валидации привлекаются «хотспоты», которые были обнаружены в течение пожароопасного сезона по данным AVHRR с помощью алгоритма [12]. В случае если на участке локализации гари обнаруживаются «хотспоты», то она идентифицируется как достоверная, в противном случае процесс валидации продолжается с использованием снимков 2-го канала радиометра AVHRR (LAC, GAC). Достоверность гари в такой ситуации подтверждается визуально наблюдаемыми на снимке высококонтрастным темным объектом (с низкими значениями альбедо) и/или – характерными дымовыми шлейфами. В наиболее сложных случаях анализируются данные о рельефе подстилающей поверхности, типе растительности и почвы местности, сроков космосъемки и пр. Безусловно, такой подход требует выполнения «ручной» работы, объём которой зависит от размеров обрабатываемой территории, поэтому его применение оправдано в региональных масштабах.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1, *а* представлены результаты обработки данных AVHRR с помощью комбинированного подхода (КП) (красная линия), данные MODIS MCD64A1 C6 (синяя линия) и данные GFED-4 (чёрная линия). Как видно из рисунков, полученные в работе количественные оценки выгоревшей территории хорошо согласуются с данными MODIS в период с 2001 по 2016 г. и данными GFED-4

в период с 1995 по 2016 г. Значения коэффициента корреляции составили 0,98 ($P <$ 0,001) и 0,94 ($P <$ 0,001) для MCD64A1 C6 и GFED-4 соответственно, что позволяет применить комбинированный подход ко всему набору данных AVHRR (LTDR) с 1984 г. Величина средней относительной ошибки (MAPE) для данных MODIS составила 16,5 %, для данных GFED-4 – 40,6 %.

За рассматриваемый период можно выделить несколько наиболее пожароопасных сезонов – 1985–1986, 2002, 2012, 2014, 2016 с площадью гарей от ~4 до ~7 млн га. Из рис. 1, *б* видно, что за наиболее пожароопасные сезоны в атмосферу в среднем было выброшено ~200 Тг CO2, ~1,5 Тг аэрозольных частиц PM10. Суммарные выбросы $CO_2$ и PM10 за весь рассматриваемый период составили ~2 900 Тг и ~21,5 Тг соответственно.




*а* *б*

Рисунок. Межгодовые вариации площади гарей по данным MODIS, GFED-4 и обнаруженных с помощью комбинированного подхода (LTDR-КП) (*а*); выбросы аэрозольных частиц PM10 и углекислого газа от ЛП (*б*)

**Заключение.** С помощью комбинированного подхода, включающего валидацию обнаруженных пороговым алгоритмом гарей на основе экспертной оценки, были детектированы гари лесных пожаров на территории Восточной Сибири по данным AVHRR/NOAA (проект LTDR) за период 1984–2016 гг.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными MODIS и GFED-4: коэффициенты корреляции составили ~0,95 и ~0,87, а средние относительные ошибки 16,5 и 40,6 % соответственно. Заметный процент относительных ошибок во многом обусловлен разницей пространственных разрешений снимков MODIS и AVHRR (LTDR); данные GFED-4 построены по данным MODIS и ATSR.

Предварительный анализ полученных результатов позволил сделать количественную оценку пожароопасности на территории Восточной Сибири в 1984–2000 гг. При этом в наиболее пожароопасные сезоны (1985–1986, 2002, 2012, 2014, 2016 гг.) в атмосферу в среднем инжектировалось ~170 Тг $CO_2$ и ~1,3 Тг аэрозольных частиц PM10.

**Список литературы**

1. Соловьев В.С., Козлов В.И, Муллаяров В.А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии / отв. ред. С.И. Соловьев; ИКФИА СО РАН. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН. 2009. 108 с.

2. Соловьев В.С., Будищев А.А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 626–629.

3. Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 145–150.

4. Tomshin O.A., Solovyev V.S. Study of variations in parameters of atmospheric aerosol due to large-scale forest fires in Central Yakutia (2002) // Atmos. Ocean Opt. 2015. Vol. 28, № 1. P. 95–99. DOI: 10.1134/S1024856015010145.

5. Томшин О.А., Соловьев В.С. Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 7. С. 598–602.

6. Tomshin O.A., Solovyev V.S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, № 15. P. 5742–5749.

7. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS Instruments / J. Pedelty, S. Devadiga, E. Masuoka [et al.] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona. 2007. P. 1021–1025.

8. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product / L. Giglio, L. Boschetti, D.P. Roy [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. P. 72–85.

9. Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth- generation global fire emissions database (GFED4) // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2013. Vol. 118, № 1. P. 317–328.

10. Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Climatic Change. 1980. Vol. 2. № 3. P. 207–247.

11. Burned area mapping time series in Canada (1984–1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters / J.A. Moreno Ruiz, D. Riaño, M. Arbelo [et al.] // Remote Sens. Environ. 2012. Vol. 117. P. 407–414.

12. A review of AVHRR-based active fire detection algorithms: principles, limitations, and recommendations / Z. Li, Y.J. Kaufman, C. Ichoku [et al.] // Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort. Hague: SPB Academic Publishing BV, 2000. P. 199–225.

УДК 528.8, 004.75

**И.А. Уваров, В.В. Марченков, В.А. Толпин**

Институт космических исследований РАН, Москва

e-mail: uvarov@smis.iki.rssi.ru, marvik@smis.iki.rssi.ru, tolpin@smis.iki.rssi.ru

# ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ СЕМЕЙСТВА «СОЗВЕЗДИЕ-ВЕГА»

В информационных системах спутникового мониторинга требуется совместный анализ разнородных данных, включая метеоданные. Для решения этих задач в ИКИ РАН была разработана технология автоматического получения, хранения, представления и анализа метеоданных. Архив метеоданных в ИКИ РАН поддерживается в рамках Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг». Предусмотрено регулярное обновление архива из разных источников, в первую очередь, данными, полученными моделью NCEP. Данные доступны для визуализации на карте различными способами. Построение графиков обеспечивает анализ временных рядов в сопоставлении с другими величинами, такими как вегетационные индексы. Разработанные технологии применены в ряде специализированных информационных систем спутникового мониторинга природных и антропогенных объектов.

*Ключевые слова: метеорологические данные, климат, временные ряды, информационная система, спутниковый мониторинг, базы данных.*

Разработка специализированных тематических информационных систем спутникового мониторинга предполагает обеспечение возможности совместного анализа данных дистанционного зондирования с другими видами данных, одним из которых являются метеорологические данные [1, 2]. Спектр областей применения метеоданных довольно широк: оценка рисков развития природных пожаров, влияние засухи на развитие растений, мониторинг распространения пепловых шлейфов при извержении вулканов, исследование процессов на поверхности океана и многое другое.

Для решения этих задач в ИКИ РАН была разработана технология автоматического получения, хранения, представления и анализа метеоданных [3].

**Используемые данные** в информационных системах включают прогнозные и ретроспективные, полученные из различных источников, значительно различающиеся по набору доступных показателей (метеоэлементов), временному разрешению и пространственной локализации.

Исходные данные обычно локализованы либо в точках расположения метеостанций (в том числе это касается фактических данных) либо в узлах регулярной сетки. Данные, прошедшие статистическую обработку, могут также быть представлены в разрезе единиц пространственного деления, например, административным районам.

На постоянной основе производится обновление архивов данных, полученных с помощью модели Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) NCEP (https://www.ncep.noaa.gov/). Пространственное разрешение данных составляет 0,25°, а частота обновлений – 3 ч. В архивах ИКИ РАН хранятся более двух десятков показателей состояния атмосферы у поверхности Земли, а также вертикальные профили температуры на различных изобарических поверхностях.

Для **отображения метеоданных** в картографическом интерфейсе могут использоваться различные способы. В зависимости от характера данных применяются изолинии, картограммы и значки. Изолинии могут быть использованы для данных любой

© Уваров И.А., Марченков В.В., Толпин В.А., 2019

пространственной локализации, но лучше всего подходят для данных на основе регулярной сетки. При анализе данных, локализованных на метеостанциях, целесообразно применение значков. В этом случае в месте расположения метеостанции изображаются прямоугольные значки, характеризующиеся цветом и числовым значением отображаемой величины. Одновременный анализ нескольких величин возможен путем нанесения в месте расположения метеостанции сложных значков, где числовые значения, снабженные цветовой окраской, расположены в столбик. Данные могут быть визуализированы в разрезе единиц территориального деления. В этом случае используется способ картограмм. Показатели могут быть представлены как в абсолютном, так и в относительном выражении.

**Анализ временной динамики** метеорологических показателей возможен для объектов разного типа: отдельные точки, объекты наблюдения, метеостанции, районы. Специальный пользовательский интерфейс представляет данные в форме графиков. Это делает доступным совместный анализ динамики различных метеорологических показателей и динамики других величин, таких как вегетационные индексы, полученные по временной серии спутниковых наблюдений. Доступен сравнительный анализ внутрисезонной динамики разных лет, а также сопоставление климатических характеристик разных объектов.

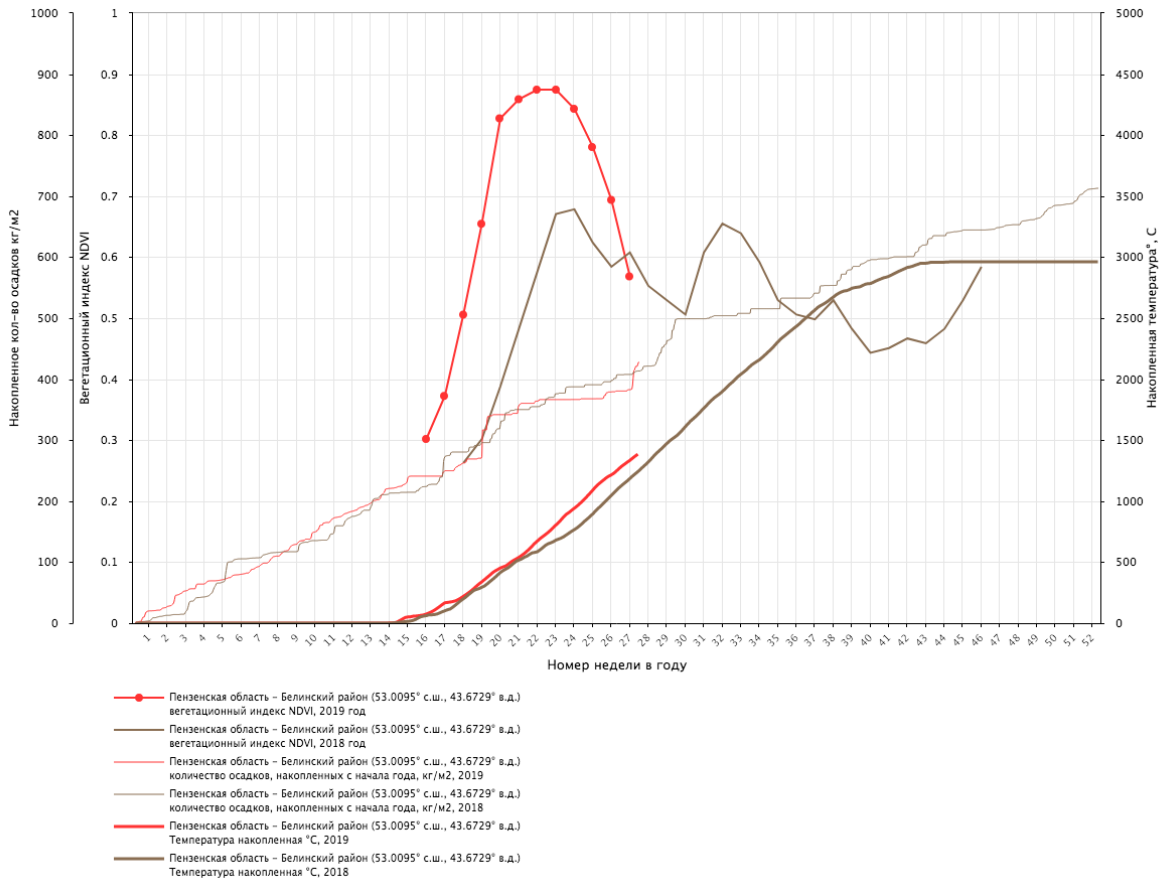



Рисунок. Анализ временных рядов в системе ВЕГА-Science.
Временные ряды накопленных температуры и количества осадков в сопоставлении с индексом NDVI

**Производные показатели** являются результатом статистической обработки климатических данных и предназначены для выявления погодных аномалий на тех или иных природных или антропогенных объектах. В частности, к любому из основных показателей, таких как температура или количество осадков, применяются такие преобразования, как определение среднего многолетнего за данный день года, определение

среднемесячного многолетнего и отклонения текущего от среднего многолетнего, накопление с начала года, региональная норма, сглаживание в скользящем окне и др. Возможен расчет температурных индексов, гидротермического коэффициента. Комбинирование подобных преобразований призвано помочь выделить наиболее существенные факторы при анализе временной динамики климатических данных.

**Заключение.** Предложенные технологии и подходы позволяют разрабатывать инструменты анализа метеорологических данных. Это нашло применение в ряде информационных систем мониторинга природных и антропогенных объектов. Функционирование подсистем архивации и доступа к метеоданным обеспечивается мощностями Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [4].

**Список литературы**

1. Спутниковый сервис «Вега» / В.А. Толпин, И.В. Балашов, Е.А. Лупян, И.Ю. Савин // Земля из космоса. 2011. Вып. 9, Весна. С. 32–37.

2. Возможности и опыт использования спутникового сервиса Вега при организации регионального дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, В.А. Толпин [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 3–6.

3. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга / И.А. Уваров, О.А. Халикова, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 30–45.

4. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263–284.

УДК 630*114.521.7

**С.К. Фарбер[1], Н.С. Кузьмик[2]**

[1] Доктор сельскохозяйственных наук

[2] Кандидат сельскохозяйственных наук

Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, natalia_5791@mail.ru

# ПЛОДОРОДИЕ ЛЕСНЫХ ПОЧВ, ОЦЕНОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Плодородие лесных почв оценивается (измеряться) посредством лесотаксационных показателей древостоев. Материалы массовой таксации содержат всю необходимую для составления уравнений информацию. Содержится в описании таксационного выдела и почвенно-грунтовая характеристика, в том числе наименование (тип) почвы. Формируются уравнения регрессии. В качестве функции используется класс бонитета древостоя, в качестве независимой переменной – показатель, оценивающий лесорастительные условия. Вне зависимости от категории земель (насаждение, гарь, вырубка) получаем количественную оценку плодородия лесных почв и потенциальную продуктивность древесных пород.

*Ключевые слова: лесные почвы, плодородие лесных почв, продуктивность древостоев, лесорастительные условия, данные лесоустройства, атрибутивная таблица таксационных выделов, леса Приангарья.*

Плодородие почв – это способность удовлетворять потребность растений в воде и питательных веществах. Плодородие почв сельскохозяйственного назначения связывается с показателями почв и урожайностью. Оценка производится в баллах, посредством которых отражаются наиболее важные для роста растений признаки [1]. Плодородие лесных почв трактуется упрощенно, как способность обеспечивать рост и продуктивность насаждений [2]. Прогнозная продуктивность древостоев при неопределённо трактуемом плодородии почв становится сомнительной. Цель настоящей работы – разработка количественного измерителя плодородия лесных почв с представлением результата в картографическом виде.

Таксационные показатели насаждений зависят от лесорастительных условий и в определенной степени характеризуют и плодородие почв. Плодородие поэтому также может оцениваться (измеряться) посредством лесотаксационных показателей. Принимается, что класс бонитета древостоя есть производное лесорастительных условий, в перечень которых входит в том числе плодородие лесных почв. Можно записать $B_s = f(S)$, где $B_s$ – класс бонитета древостоя; $S$ – показатель лесорастительных условий, в перечень которых входит и плодородие почв. Класс бонитета древостоя, наименование (тип) почв – фигурируют в описании таксационного выдела. Для получения зависимости $B_s = f(S)$ остается определится с конструкцией показателя лесорастительных условий и далее рассчитать показатель $S$ для каждого таксационного выдела.

Возможность сравнения (измерения) появляется при использовании заранее оговоренной линии отсчёта. В качестве показателя лесорастительных условий ранее было предложено отношение $d / d_o$, где $d_o = f(h)$; $d$, $h$ – диаметр и высота главной породы древостоя [3]. Вообще же преимущество за показателем, варьирующим менее других. Поэтому в качестве измерителя лесорастительных условий лучше использовать не отношение диамет-

© Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., 2019

ров $d$ / $d_o$, а отношение высот $h$ / $h_o$. Тогда в качестве линии отсчета будет выступать усредненная линия роста по высоте ($h_o = f(A)$, где $A$ – возраст древостоя, лет). Посредством введения дополнительного аргумента точность оценок $h_o$ повышается. По признаку наименьшего варьирования в качестве дополнительного аргумента используется диаметр. Тогда $h_o = f(d, A)$, при этом началом отсчета будет уже не линия, а плоскость. При достижении определенного возраста при прочих равных условиях высоты пород деревьев различны. Соответственно будет различен и класс бонитета поэтому сопоставление плодородия почв по шкале бонитетов М.М. Орлова не имеет смысла. Сопоставление возможно относительно отдельных древесных пород. В нашем случае относительно уравнений $h_o = f(d, A)$, для сосны лиственницы кедра и ели. Последовательность оценки:

- составление уравнений регрессии $h_o = f(d, A)$;
- вычисление значений показателя $S = h / h_o$ для лесотаксационных выделов;
- получение для древесной породы и типа почвы средних значений показателя лесорастительных условий $S_i = \sum S / n_i$;
- получение общего для всех пород деревьев и типа почвы средневзвешенных значений показателя лесорастительных условий $S_o = \sum(S_i \cdot n_i) / N$, где $N = \sum n_i$;
- составление для древесных пород уравнений регрессии $B_s = f(S)$;
- вычисление потенциальной продуктивности древесных пород $B_s$ для лесотаксационных выделов;
- картографирование плодородия почв и потенциальной продуктивности древесных пород.

Выявление аналитического вида уравнений регрессии произведено программными средствами STATISTICA. Задан уровень значимости 0,95. Картографирование плодородия почв произведено по величинам показателя $S_o$, потенциальной продуктивности древостоев по величинам показателя $B_s$ средствами ArcGIS Spatial Analyst.

Тестовый участок расположен на территории Терянского лесничества (Верхнетерянское участковое лесничество, квартала 1-53 и Кажимское участковое лесничество квартала 93, 94, 118, 119) (рисунок). Исходные материалы: данные массовой таксации – 1765 описаний таксационных выделов. Из них: количество выделов сосновых древостоев – 219, лиственничных – 731, кедровых – 478, еловых – 93.

Для тестового участка получены зависимости $h_o = f(d, A)$ (табл. 1).

Таблица 1

Аналитический вид зависимости высоты дерева от возраста и диаметра

| Древесная порода | Уравнение регрессии $h_o = f(d, A)$ |
|---|---|
| Сосна | $h_o = -0{,}842 + 1{,}264 \cdot d - 0.017 \cdot d^2$ ($n = 219$, $R = 0{,}872$, $R^2 = 0{,}761$) |
| Лиственница | $h_o = 1{,}387 + 0{,}020 \cdot A + 1.037 \cdot d - 0{,}013 \cdot d^2$ ($n = 731$, $R = 0{,}775$, $R^2 = 0{,}601$) |
| Кедр | $h_o = 5{,}106 + 0{,}708 \cdot d - 0{,}007 \cdot d^2$ ($n = 478$, $R = 0{,}518$, $R^2 = 0{,}268$) |
| Ель | $h_o = 0{,}431 + 1{,}188 \cdot d - 0014 \cdot d^2$ ($n = 93$, $R = 0{,}946$, $R^2 = 0{,}895$) |

Примечание: $n$ – количество наблюдений (выделов), $R$ – коэффициент множественной корреляции, $R^2$ – коэффициент детерминации.

На основе уравнений $h_o = f(d, A)$ рассчитаны значения $S = h / h_o$ и внесены в дополнительное поле атрибутивной таблицы таксационных выделов. Далее последовательно получены показатели лесорастительных условий $S_i$ и $S_o$ (табл. 2). Показатель $Si$ относится к одному наименованию почвы для $i$-й древесной породы. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе $S_i$ возможна только для таксационных выделов $i$-й древесной породы. Показатель $S_o$ привязан к типу почвы. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе $S_o$ уже возможна по наименованию почвы, т.е. для всех таксационных выделов, включая выдела лиственных древостоев (березняки и осинники), а также выдела погибших насаждений, вырубки.

Таблица 2

Распределение $S_i$ и $S_o$ по наименованиям почв

| Название почв | Древесная порода | | | | | | | | | | | | $S_o$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сосна | | | Лиственница | | | Кедр | | | Ель | | | |
| | $n$ | $B_{ср}$ | $S_i$ | $n$ | $B_{ср}$ | $S_i$ | $n$ | $B_{ср}$ | $S_i$ | $n$ | $B_{ср}$ | $S_i$ | |
| Перегнойная, иловато-глеевая, легкосуглинистая, влажная | | | | 4 | 3,25 | 1,05 | 2 | 4,00 | 1,10 | 35 | 3,71 | 1,00 | 1,01 |
| Дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая, свежая | 69 | 3,48 | 1,00 | 345 | 3,03 | 1,00 | 74 | 4,03 | 1,00 | 3 | 4,33 | 0,96 | 1,00 |
| Перегнойная, подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная | | | | | | | | | | 6 | 4,67 | 0,99 | 0,99 |
| Слабоподзолистая, легкосуглинистая, влажная | 1 | 3,00 | 1,03 | 4 | 3,00 | 1,04 | 339 | 4,13 | 1,00 | 13 | 4,92 | 1,00 | 1,00 |
| Слабооподзоленная, легкосуглинистая, сырая | | | | 1 | 4,00 | 0,88 | 10 | 4,30 | 0,95 | 1 | 5,00 | 0,92 | 0,94 |
| Торфянисто подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная | | | | 34 | 3,66 | 0,94 | 1 | 5,00 | 0,83 | 10 | 5,00 | 0,98 | 0,95 |
| Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, сырая | | | | | | | | | | 8 | 5,00 | 1,01 | 1,01 |
| Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная | | | | | | | | | | 9 | 5,00 | 1,00 | 1,00 |
| Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, сырая | | | | | | | | | | 2 | 5,00 | 1,05 | 1,05 |
| Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, влажная | | | | | | | | | | 6 | 5,00 | 1,05 | 1,05 |
| Оподзоленная, легкосуглинистая, свежая | | | | | | | 13 | 3,62 | 1,05 | | | | 1,05 |
| Оподзоленная, легкосуглинистая, влажная | | | | | | | 3 | 3,67 | 1,07 | | | | 1,07 |
| Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, свежая | 136 | 3,55 | 1,01 | 312 | 3,03 | 1,00 | 3 | 4,00 | 1,04 | | | | 1,00 |
| Торфянистая, легкосуглинистая, сырая | | | | | | | 4 | 4,00 | 0,99 | | | | 0,99 |
| Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, влажная | | | | 4 | 3,25 | 0,95 | 3 | 4,33 | 0,97 | | | | 0,96 |
| Слабооподзоленная, легкосуглинистая, свежая | | | | | | | 10 | 4,40 | 0,98 | | | | 0,98 |
| Торфянистая, легкосуглинистая, влажная | | | | | | | 11 | 4,64 | 0,89 | | | | 0,89 |
| Дерново-слабооподзоленная, легкосуглинистая, влажная | | | | 7 | 3,86 | 0,91 | 5 | 4,80 | 0,90 | | | | 0,91 |
| Дерново-оподзоленная, легкосуглинистая, влажная | | | | 18 | 2,94 | 1,03 | | | | | | | 1,03 |
| Торфяно-подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, сырая | | | | 1 | 4,00 | 0,91 | | | | | | | 0,91 |
| Торфяно-перегнойно-глеевая, легкосуглинистая, влажная | | | | 1 | 4,00 | 0,96 | | | | | | | 0,96 |
| Дерново-черноземовидная, легкосуглинистая, свежая | 2 | 3,00 | 1,05 | | | | | | | | | | 1,05 |
| Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, свежая | 2 | 4,50 | 0,90 | | | | | | | | | | 0,90 |
| Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, сухая | 7 | 4,86 | 0,89 | | | | | | | | | | 0,89 |
| Мелкоземная, каменистая, среднесуглинистая, сухая | 2 | 5,00 | 0,80 | | | | | | | | | | 0,80 |

Условные обозначения: $B_{ср}$ – средний класс бонитета; $S_i$ – среднее значение отношения $h / h_o$ для древесной породы; $S_o$ – общее для древесных пород средневзвешенное значение отношения $h / h_o$

Аналитической вид уравнений $B_s = f(S)$. получен по данным классов бонитета древостоев и показателям условий произрастания $S_o$ (табл. 3). В атрибутивную таблицу таксационных выделов внесены расчетные значения $B_s$ для сосны, лиственницы кедра и ели, на основе которых проведено картографирование потенциальной продуктивности древесных пород (рисунок).

Таблица 3

Аналитический вид уравнений $B_s = f(S)$

| Древесная порода | Уравнение регрессии |
|---|---|
| Сосна | $B_s = -13{,}764 - 31{,}597 \cdot S^2 + 48{,}890 \cdot S$ ($n = 219$, $R = 0{,}513$, $R^2 = 0{,}263$) |
| Лиственница | $B_s = 50{,}597 - 87{,}021 \cdot S + 39{,}459 \cdot S^2$ ($n = 731$, $R = 0{,}412$, $R^2 = 0{,}170$) |
| Кедр | $B_s = -10{,}202 - 21{,}751 \cdot S^2 + 36{,}063 \cdot S$ ($n = 478$, $R = 0{,}321$, $R^2 = 0{,}103$) |
| Ель | $B_s = 240{,}110 - 467{,}974 \cdot S + 232{,}201 \cdot S^2$ ($n = 93$, $R = 0{,}378$, $R^2 = 0{,}143$) |

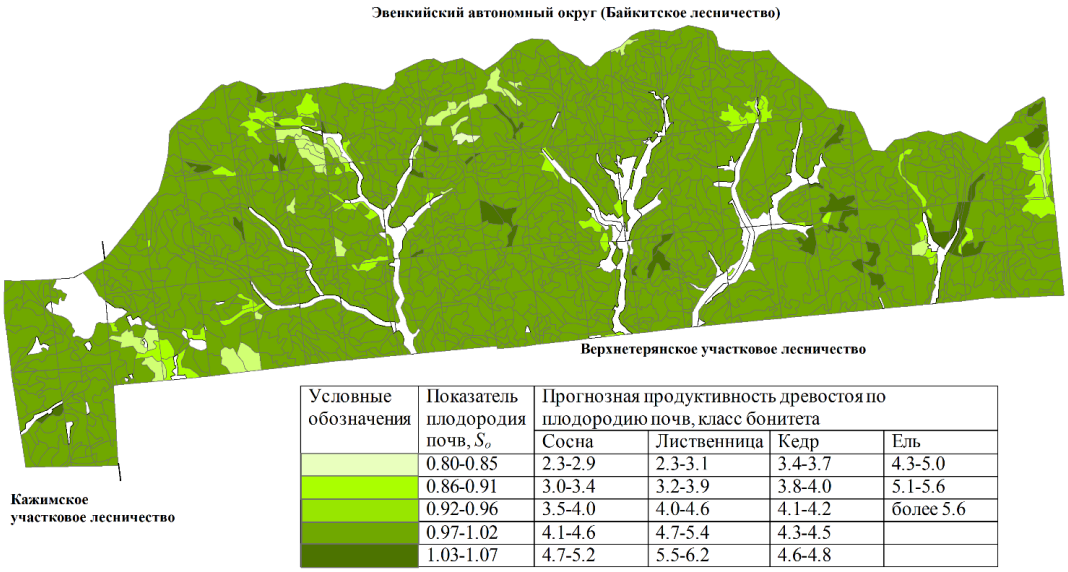



Рисунок. Плодородие лесных почв $S_o$ и потенциальная продуктивность древостоев тестового участка $B_s$. Масштаб 1 : 150 000

Рассматриваемая методика оценки плодородия лесных почв по связям с таксационными показателями древостоев основана на использовании данных лесоустройства и не требует дополнительных трудоемких полевых исследований. Методику отличает конструктивная простота и минимизация трудозатрат при формировании оценочных показателей плодородия почв. В качестве ограничения применимости методики следует отметить условие принадлежности обследуемой территории одному лесорастительному округу, в пределах которого наблюдается характерный набор типов почв.

**Список литературы**

1. Зеликов В.Д. Почвоведение: учебник для техникумов. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 216 с.
2. Ершов Ю.И. Теоретические проблемы лесного почвообразования. Новосибирск: Наука, 2015. 319 с.
3. Фарбер С.К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с.

УДК 004.932:631.9

**Е.В. Федотова[1, 2], А.И. Стародубцев[2], А.Г. Вырвинский[2]**

[1] Кандидат биологических наук,
Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: elfed@ksc.krasn.ru

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ

На основе анализа исследований, проведенных в России и за рубежом, авторами разработана модель прогнозирования урожайности на базе модели EPIC. Для работы модели используются характеристики сельскохозяйственных культур, а также данные об условиях роста (погодные условия, агрономические мероприятия и другие факторы) в текущем году. Поскольку ряд входных параметров не оценивается в полевых условиях, в разработке используются их модельные оценки. В частности, для определения индекса листовой поверхности используются данные дистанционного зондирования. Для оценки NDVI применен метод слияния данных низкого и высокого пространственного разрешения. Результат прогноза сопоставим с реальной урожайностью в 2018 г.

*Ключевые слова: прогноз урожайности, EPIC, ИЛП, данные дистанционного зондирования, слияние данных разного пространственного разрешения.*

В нашей стране рядом авторов [1–3] разработаны модели прогнозирования урожайности. В данной работе используется модель EPIC [4]. Прогноз урожайности в ней проводится путем моделирования ежедневного прироста надземной биомассы. Для этого для каждой культуры необходимы наборы специфических характеристик, а также данные об условиях роста (погодные условия, агрономические мероприятия и другие факторы).

База данных прогнозной системы делится на две части: параметры, не меняющиеся от года к году, и параметры, характерные для текущего года.

К первой группе данных относятся, например:

- сумма температур, необходимых для роста сельскохозяйственных культуры PHUj, в текущих расчетах взята равной $PHUj$ = 1 600 °C;
- минимальная температура роста культуры $Tbj$ = 4 °C;
- индекс урожайности $HIj$ = 0,2;
- специфичный для сельскохозяйственной культуры коэффициент конвертации энергии в биомассу $BEj$ = 30 кг/мДж.

Ко второй группе параметров относятся, например, данные:

- минимальная и максимальная ежедневная температура воздуха;
- индекс листовой поверхности ИЛП;
- количество облаков.

Ниже на рис. 1 приведён алгоритм работы программы. После указания данных о географическом положении поля, часовом поясе и временном интервале производится расчёт урожайности для указанного интервала времени.

Для оценки суточного прироста биомассы использовались модули расчета долготы дня для данного местоположения, приходящей суммарной солнечной радиации.

© Федотова Е.В., Стародубцев А.И., Вырвинский А.Г., 2019

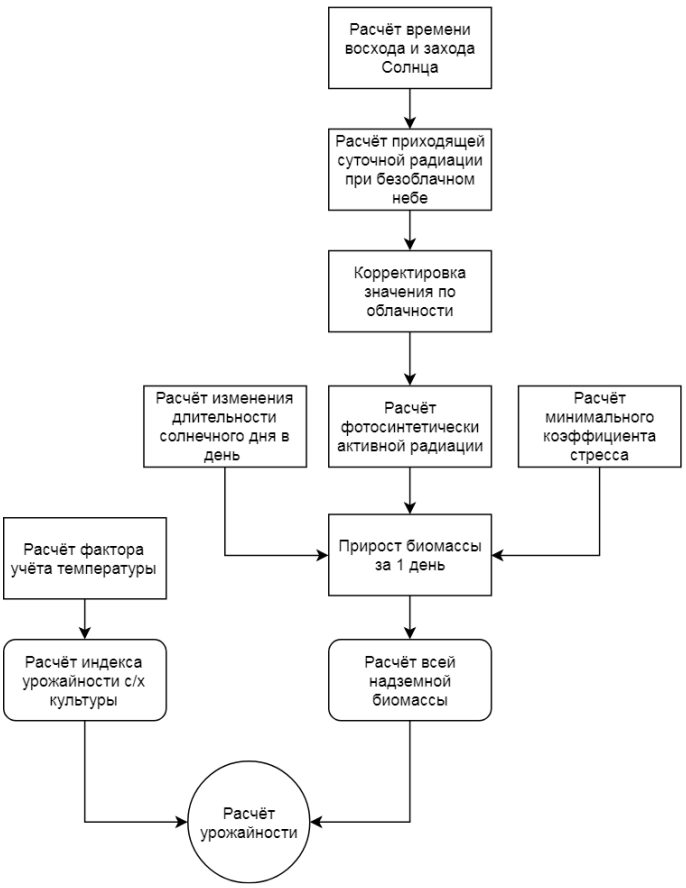



Рис. 1. Схема работы программы прогноза урожайности

Для определения надземной биомассы и ее ежедневного прироста используется показатель фотосинтетически активной радиации. Её оценка выполняется по значению индекса листовой поверхности (ИЛП). Определение ИЛП в полевых условиях не производится. По этой причине проводится оценка ИЛП по спутниковым изображениям. Для расчета использована формула [5]

$$LAI = (0{,}108 \cdot NDVI - 0{,}009) \cdot (1 + 38{,}859 \cdot \exp(0{,}667 \cdot NDVI)),$$

где NDVI – вегетационный индекс нормированной разности.

Для получения наиболее точных значений урожайности проектируемый ряд индекса сопоставлялся с приблизительными датами роста и развития сельскохозяйственных культур (зерновых хлебов):

- 01.05 – боронование;
- 05.05 – посев;
- 05.06 – всходы;
- 16.06 – химическая прополка;
- 22.06 – кущение;
- 07.07 – выход в трубку – начало колошения (или выметывания у овса);
- 15.07 – колошение (или выметывание у овса) – начало цветения;
- 25.07 – цветение – молочная спелость;
- 11.08 – восковая спелость;
- 21.08 – твердая спелость (начало уборочной);
- 10.09 – вспашка.

Таким образом, необходимо построение рядов NDVI и ИЛП на период с середины мая по конец сентября с временной дискретизацией в одну неделю, а также с учетом важных дат по фазам развития растений.

Для исследуемой области – Сухобузимский район Красноярского края – были выбраны доступные спутниковые снимки аппаратов Landsat-8 OLI и Sentinel-2, по которым возможно вычисление NDVI (область интереса (сельскохозяйственные поля) не закрыта облаками). Недоступные для получения индекса даты были отмечены как необходимые для моделирования изображения на основе данных MODIS. При построении динамики NDVI в ходе вегетационного периода выявились два недостатка.

Первый недостаток – из-за разных характеристик спутникового оборудования и используемых методов предварительной обработки данных значения индекса различаются в зависимости от источника. Для корректировки полученного ряда и приведения всех значений к одному порядку была использована линейная зависимость:

$$NDVI' = NDVI_x + k,$$

где $NDVI_x$ – индекс, вычисленный на основе снимка x; $k$ – коэффициент, определяемый как разность между значением индекса эталонного продукта и значением индекса снимка $x$.

Второй недостаток – съемка среднего пространственного разрешения (Sentinel-2, Landsat-8 OLI) отсутствовала для некоторых дат, важных для построения динамики NDVI. В этом случае использовалось моделирование значений более высокого пространственного разрешения Sentinel-2 по данным ежедневной съемки низкого пространственного разрешения MODIS.

На рис. 2 представлена динамика NDVI, на рис. 3 – динамика ИЛП для полей ячменя в результате вычисления и моделирования NDVI (значения усреднены в пределах трех полей с помощью инструмента зональной статистики).

Рис. 2. Динамика изменения NDVI для поля ячменя

Рис. 3. Динамика изменения ИЛП для поля ячменя

Таким образом, удалось построить временной ряд значений ИЛП для проведения моделирования роста надземной биомассы и прогноза урожайности. В результате апробации модели получены данные об урожайности, сопоставимые с урожайностью сельскохозяйственных культур в Сухобузимском районе Красноярского края.

**Список литературы**

1. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В. Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности// Интерэкспо Гео-Сибирь. 2005. Т. 5. С. 218–222.

2. Брыксин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири// Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2007. Т. 5, № 2. С. 20–26.

3. Брыксин В.М. Разработка. математической модели и программных средств оценки урожайности зерновых культур в условиях Западной Сибири: дис. … канд. техн. наук. Ханты-Мансийск, 2009. 152 с.

4. EPIC & APEX Models//Texas A&M AgriLife Research. URL: https://epicapex.tamu.edu/epic/.

5. Estimating leaf area index of paddy rice from rapideye imagery to assess / Sang-Il Na, Suk Young Hong, Yi-Hyun Kim [et al.] // Korean J. Soil Sci. Fert. 2013. Vol. 46, № 4. P. 245–252.

УДК 004.932.2

**А.М. Цуцкарев[1], А.В. Пятаева[2]**

[1] Магистрант, [2] Кандидат технических наук
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: atsutskarev@gmail.com

# СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛЕСОПАТОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Одним из способов оценки достоверности данных лесопатологических обследований является сравнение актов ЛПО с данными государственного лесопатологического мониторинга – реестров ГЛПМ. Вследствие большого объема данных в реестрах ручная проверка и коррекция данных требуют существенных временных затрат, что может привести к возникновению ошибок. Для решения этой задачи в настоящей работе представлена система хранения и обработки данных реестров ГЛПМ. Разработанная система позволяет выявлять ошибки в ведении реестров, оперативно их устранять и актуализировать данные.

*Ключевые слова: лесопатологический мониторинг, база данных, контроль корректности данных, актуализация информации.*

Оценка состояния здоровья лесов в настоящее время является темой множества научных работ, так как имеет высокую практическую значимость. Так, в работе [1] показана связь между состоянием леса и пылью с рудников по добыче угля. Авторы [2] исследуют влияние патогенных микроорганизмов и загрязнения окружающей среды на состояние лесных массивов. В статье [3] предлагаются методы дистанционного мониторинга состояния лесов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов. В статье [4] с помощью пространственно-временного анализа характеристик ущерба изучается влияние насекомых-вредителей и различных болезней на лесные территории северо-востока США. В соответствии с Лесным кодексом РФ [5] выявление и предотвращение отклонений от норм санитарного состояния лесов осуществляется посредством проведения лесопатологического обследования (ЛПО) и обследования очагов вредных организмов с составлением всех необходимых документов. Одним из инструментов оценки достоверности данных ЛПО является сравнение актов ЛПО с данными ГЛПМ (реестры ГЛПМ). Контроль актов ЛПО включает в себя выявление некорректных данных, внесенных в акты ЛПО, необоснованно назначенных мероприятий (например, рубки леса), проверку достоверности сведений актов ЛПО. Данные реестров ГЛМП аккумулируются в электронных таблицах Excel, проверяются на корректность и своевременно актуализируются при поступлении обновленной информации. Также для составления отчетов о результатах проведенных работ и сверки данных с данными, содержащимися в актах ЛПО, используются реестры лесных участков, занятых поврежденными и погибшими лесными насаждениями и реестры участков, на которых рекомендуется проведение мероприятий по защите лесов [6]. Вследствие большого объема данных в реестрах, ручная проверка и коррекция данных требуют существенных временных затрат и может привести к возникновению ошибок. Таким образом, задача проверки достоверности сведений актов о состоянии здоровья леса и обоснованности санитарно-оздоровительных мероприятий является актуальной.

**Система хранения и обработки данных ЛПМ.** Разрабатываемая система хранения и обработки данных ЛПМ состоит из базы данных для хранения реестров, клиентского приложения для взаимодействий с пользователями и реализованных в СУБД PostgreSQL функций по загрузке, проверке и актуализации информации. Структура базы данных приведена на рисунке.

© Цуцкарев А.М., Пятаева А.В., 2019

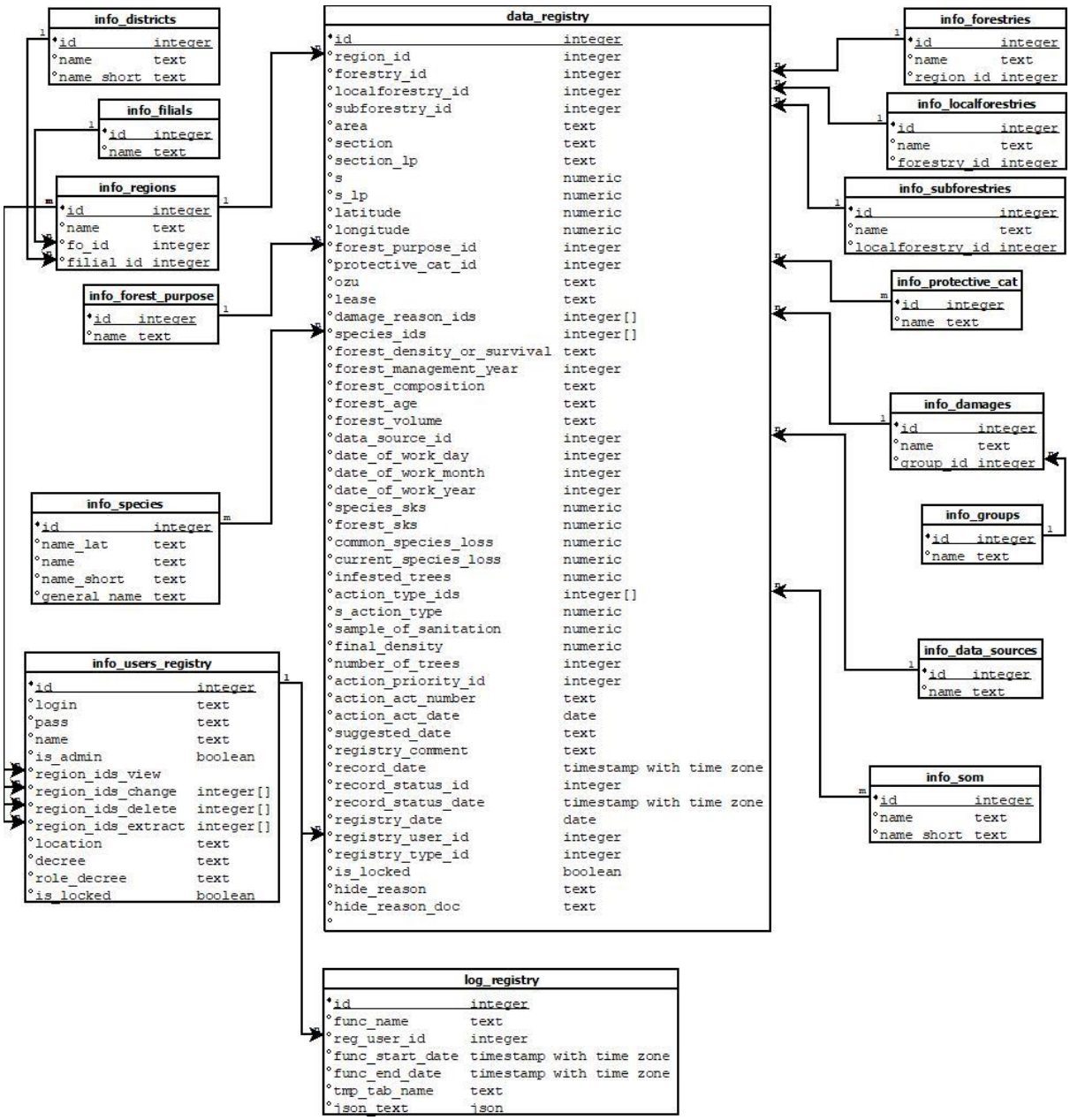



Рисунок. Структура базы данных

На первом этапе пользователь загружает предварительно сформированный с помощью программы Excel файл с реестром. При загрузке сверяется субъект РФ и дата формирования реестра. Прежде чем загруженный реестр визуализируется на интернет портале он проходит ряд проверок, для этого он сначала загружается во временную таблицу, где проходит проверку по ряду полей.

Результатом работы второго этапа системы является заполнение столбца ошибок во временной таблице с описанием ошибок, из-за которых дальнейшая обработка строк невозможна. Функция проверки состоит:

- из очистки файла от автоматически добавляемых кавычек при экранировании существующих кавычек или пустых полей;
- кодирования части адресной информации в соответствии со справочниками;
- проверки строк на наличие дублирования по адресной части;
- контроля строк на корректность выделения ЛП выделов в выделе;

- блока проверок ещё «чистых» строк (по которым предыдущие проверки не нашли ошибок) по типу и содержимому;
- проверки ещё «чистых» строк на предмет наличия ошибок в связанных по выделу участках;
- проверки «чистых» строк на не превышение площади выдела суммарной площадью ЛП выделов;
- сравнения площади выдела «чистых» загружаемых и уже хранящихся в системе участков.

На третьем этапе происходит финальная обработка данных. Данные, прошедшие проверку и не имеющие ошибок, переносятся из временной таблицы в постоянную. В зависимости от того, загружает ли пользователь участки по целому выделу (В) или участки, разбитые на ЛП выделы, и при сравнении между хранящимися и загружаемыми участками по этим параметрам и по данным (Д), возможны различные варианты действий, которые отображены в таблице (апостроф показывает различия в данных). При спорных ситуациях пользователю выдается запрос с выбором дальнейшего действия. В результате действий пользователя пропущенные или ошибочные строки соответствующим образом отмечаются во временной таблице в графе ошибок.

Таблица

Варианты действий системы

| Загружаемые данные | Хранящиеся данные | Алгоритм действий |
|---|---|---|
| В + Д | – | Внести новые данные |
| В + Д | В + Д | Обновить дату актуальности хранящихся данных |
| В + Д | В + Д' | Внести новые данные, заблокировать хранящиеся |
| В + Д | В +{ЛП}+{Д} | Запрос пользователю:<br>1) пропустить внесение новых данных;<br>2) внести новые данные и заблокировать хранящиеся |
| В+{ЛП}+{Д} | – | Внести новые данные |
| В+{ЛП}+{Д} | В + Д' | Запрос пользователю:<br>1) пропустить внесение новых данных;<br>2) внести новые данные и заблокировать хранящиеся |
| В+{ЛП}+{Д} | В +{ЛП}+{Д} | Обновить дату актуальности хранящихся данных |
| В+{ЛП}+{Д} | В+{ЛП}'+{Д}' | Если в новых данных есть строки с таким же адресом, что и в старых, но есть различия в данных – Запрос пользователю:<br>1) пропустить внесение новых данных;<br>2) внести новые данные и заблокировать хранящиеся;<br>3) внести совпавшие по адресу строки под новым ЛП выделом.<br>Иначе: проверка сумма хранящихся и новых площадей ЛП выделов не превышает площади выдела:<br>1) в случае прохождения проверки – внести строки с новыми ЛП выделами и обновить дату актуальности хранящихся данных, совпавших по адресу и данным;<br>2) в случае не прохождения проверки – прописать ошибку в возвращаемом пользователю файле |

Четвертый этап реализуется в случае необходимости загрузки или актуализации данных на основании ответов пользователя на запрос системы на предыдущем этапе и осуществляется в соответствии с алгоритмом действий из таблицы. При выборе пользователем решения в соответствии с вариантом 8.3, а именно при внесении новых наименований ЛП выделов, происходит дополнительная проверка. При совпадении наименования измененного ЛП выдела с любым другим наименованием ЛП выдела в соответствующих выделах хранящихся или загружаемых данных прописывается

ошибка во временной таблице для всех строк выдела, в который входит ошибочный ЛП выдел. В завершение, если во временной таблице нет ошибочных строк, пользователю выдается сообщение об удачной загрузке реестра. Иначе пользователю предлагается выгрузить из системы файл в первоначальном формате для контроля ошибочных строк.

**Заключение.** Разработанная система позволяет выявлять ошибки в ведении реестров, оперативно их устранять и актуализировать данные. На основании загруженных пользователями данных администраторы имеют доступ к статистике ведения реестров и имеют возможность реализовывать необходимые отчеты для дальнейшей работы с данными. В дальнейшем предполагается добавление дополнительных форм отчетов, разработка и интеграция в систему адаптивного территориального справочника, а также наглядное отслеживание истории изменений участков.

**Список литературы**

1. Forest health assessment for geo-environmental planning and management in hilltop mining areas using Hyperion and Landsat data / N. Kayet, K. Pathak, A. Chakrabarty [et al.] // Ecological Indicators. 2019. Vol. 106. P. 1041–1054.

2. Meyer K., Botsch K. Do forest and health professionals presume that forests offer health benefits, and is cross-sectional cooperation conceivable? // Urban Forestry & Urban Greening. 2017. Vol. 27. P. 127–137.

3. Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images / B.P. Reis, S.V. Martins, E.I.F. Filho [et al.] // Ecological Engineering. 2019. Vol. 127. P. 178–186.

4. Spatiotemporal patterns of forest damage and disturbance in the northeastern United States: 2000–2016 / A.M. Kosiba, G.W. Meigs, J.A. Dumncan [et al.] // Forest Ecology and Management. 2018. Vol. 430. P. 94–104.

5. Статья 60.5. Государственный лесопатологический мониторинг: Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 18.12.2018). URL: http://docs.cntd.ru/document/902017047.

6. О разработке программного обеспечения для автоматизированной сверки данных, содержащихся в актах лесопатологического обследования, с данными, содержащимися в реестрах государственного лесопатологического мониторинга: приказ ФБУ «Рослесозащита» от 01.08.2018 № 135-р.

УДК 528.88

**А.Н. Шихов[1], А.В. Чернокульский[2], И.О. Ажигов[3]**

[1] Кандидат географических наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, e-mail: shikhovan@gmail.com

[2] Кандидат физико-математических наук, Институт физики атмосферы им А.М. Обухова РАН, Москва, Россия, e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

[3] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия e-mail: gfrimen174@gmail.com

# СОЗДАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ВЕТРОВАЛОВ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО СНИМКАМ LANDSAT

Рассмотрены создание картографической базы данных случаев крупных ветровалов на территории Европейской России за период действия спутников серии Landsat. Помимо снимков Landsat для наполнения базы данных использован комплекс дополнительных материалов. Для каждого случая ветровала определена причина возникновения, дата (или диапазон дат) и основные геометрические характеристики. База данных в настоящее время включает 543 случая ветровала на общей площади свыше 268 тыс. га. Не менее половины всех случаев ветровалов вызваны смерчами, однако свыше 80 % площади приходится на ветровалы, вызванные шквалами.

*Ключевые слова: ветровалы, картографическая база данных, европейская часть России, снимки Landsat.*

Ежегодно значительные площади лесов России подвергаются воздействию экстремальных погодных явлений: засух и вызванных ими лесных пожаров, а также штормовых ветров, сильных снегопадов и гололеда. Увеличение площади нарушений лесного покрова, в том числе ветровалов, вызванных шквалами и смерчами, считается одним из существенных негативных последствий современного изменения климата. Для территории России имеются лишь общие оценки ущерба от ветровалов, согласно которым в последние годы площади ветровалов имеют тенденцию к росту (Potapov et al., 2015). Наиболее подвержены ветровалам леса севера европейской территории России (ЕТР) и Западного Урала, которые являются важной сырьевой базой лесной промышленности страны.

Целью настоящего исследования является создание картографической базы данных ветровалов в лесной зоне европейской части России на основе полного архива спутниковых снимков Landsat (за 1984–2017 гг.). Также использованы данные Global Forest Change (Hansen et al., 2013), Eastern' Europe forest cover change (Potapov et al., 2015) и снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов.

За период с 2001 по 2017 г. контуры ветровалов в большинстве случаев были получены автоматически на основе данных Global Forest Change в соответствии с методикой (Shikhov et al., 2019). Оценки, приведенные в работе (Hansen et al., 2013), показывают высокую точность выделения нарушений лесного покрова в бореальной зоне по этим данным – свыше 99 %. Экспертная верификация включала разделение перекрывающихся участков ветровалов и рубок и была выполнена для каждого случая.

Для обнаружения ветровалов за период с 1986 по 2000 г. использовались данные Eastern' Europe forest cover change (Potapov et al., 2015). Однако в этих данных шаг по времени, с которым выделены нарушения лесного покрова, составляет от 6

© Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ажигов И.О., 2019

до 12 лет, в то время как в Global Forest Change – 1 год. С приемлемой точностью контуры ветровалов могли быть выделены только в тех случаях, когда они не перекрывались с вырубками или гарями, произошедшими в предыдущие или последующие годы.

Ветровалы, расположенные в районах активной лесозаготовки, были выделены по разновременным снимкам Landsat. Небольшие по площади объекты были оцифрованы вручную, а крупные ветровалы, имеющие сложную веерную форму – выделены по методике, основанной на использовании разности вегетационного индекса SWVI (Крылов, Владимирова, 2011). За период до появления данных Eastern' Europe forest cover change (1984–1986 гг.) были выделены только самые крупные ветровалы, связанные с известными штормовыми событиями, в частности со вспышкой смерчей 9 июня 1984 г. (Chernokulsky, Shikhov, 2018).

Для каждого ветровала был определен тип вызвавшего его явления погоды – шквал, смерч, штормовой ветер или сильный снегопад. Ветровалы, вызванные смерчами, были выделены на основе методики (Shikhov, Chernokulsky, 2018), с привлечением снимков сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. Их основными признаками является соотношение протяженности и ширины (в большинстве случаев 10:1 и более), линейный характер (иногда со сменой направления движения в пределах 10–20°) и преобладание сплошного нарушения лесного покрова. В свою очередь, шкваловые ветровалы характеризуются веерной формой и значительной площадью несплошных повреждений лесного покрова. Ветровалы, вызванные неконвективными явлениями (штормовыми ветрами или сильными снегопадами), в России случаются крайне редко в отличие от стран Западной Европы. Однако их площади весьма существенны. Всего было выявлено три таких случая: 7 августа 1987 г. в Новгородской области, 6 июня 1995 г. на Среднем Урале и 8 октября 2015 г. на Северном Урале.

Для каждого ветровала были определены основные геометрические характеристики (площадь, протяженность, средняя и максимальная ширина). Стоит отметить, что распределение ветровалов по площади крайне неравномерно, на 10 % наиболее крупных ветровалов приходится свыше 70 % от их общей площади.

Наибольшее значение для анализа условий возникновения ветровалов имеет определение дат их прохождения. Для этого использовались все доступные снимки Landsat, а также комплекс дополнительных данных – данные метеостанций, обзоры опасных явлений погоды из журнала «Метеорология и гидрология» сведения из СМИ и данные реанализа. В результате удалось установить даты более 40 % выявленных случаев ветровалов. Определены даты возникновения для 46 из 50 случаев крупных ветровалов (на площади свыше 1 000 га), поскольку эти случаи часто упоминаются в СМИ, либо штормовые события, вызвавшие ветровал были зафиксированы метеостанциями. Отдельной задачей является оценка скоростей ветра, при которых происходят крупные ветровалы. Получены данные о порывах ветра, зафиксированных метеостанциями, попавшими в области ветровалов. Число таких случаев невелико (всего 11), а зафиксированные скорости ветра в порывах составляют от 23 до 38 м/с.

В настоящее время завершен сбор данных о ветровалах для территории Северо-Западного, Приволжского федеральных округов и Костромской области. Созданная база данных включает 543 случая ветровала на общей площади 268 тыс. га, что составляет приблизительно 0,2 % от площади лесопокрытой территории. Наибольшие площади ветровалов относительно лесопокрытой территории (свыше 1 %) выявлены в Новгородской и Костромской областях, а также на Северном Урале. Более половины выявленных случаев ветровалов вызваны смерчами, однако на них приходится всего 11,5 % от общей площади ветровалов. Свыше 80 % общей площади приходится на ветровалы, вызванные шквалами. Наиболее катастрофические ветровалы вызываются так называемыми «деречо» – шквалами с большим охватом территории и протяженностью полосы разрушений свыше 300 км. Подобные события наблюдались на ЕТР в 2009, 2010

(2 случая) и 2012 гг., причем площадь вызванных ими ветровалов в изучаемом регионе составляет свыше 145 тыс. га.

Поскольку крупные ветровалы являются редкими событиями, их межгодовое распределение крайне неравномерно (рис. 2). Наибольшие площади ветровалов зафиксированы в 2010 г., а наибольшее число штормовых событий – в 2009 г. В то же время в отдельные годы (1994, 1997, 2002, 2011) крупные ветровалы не зафиксированы

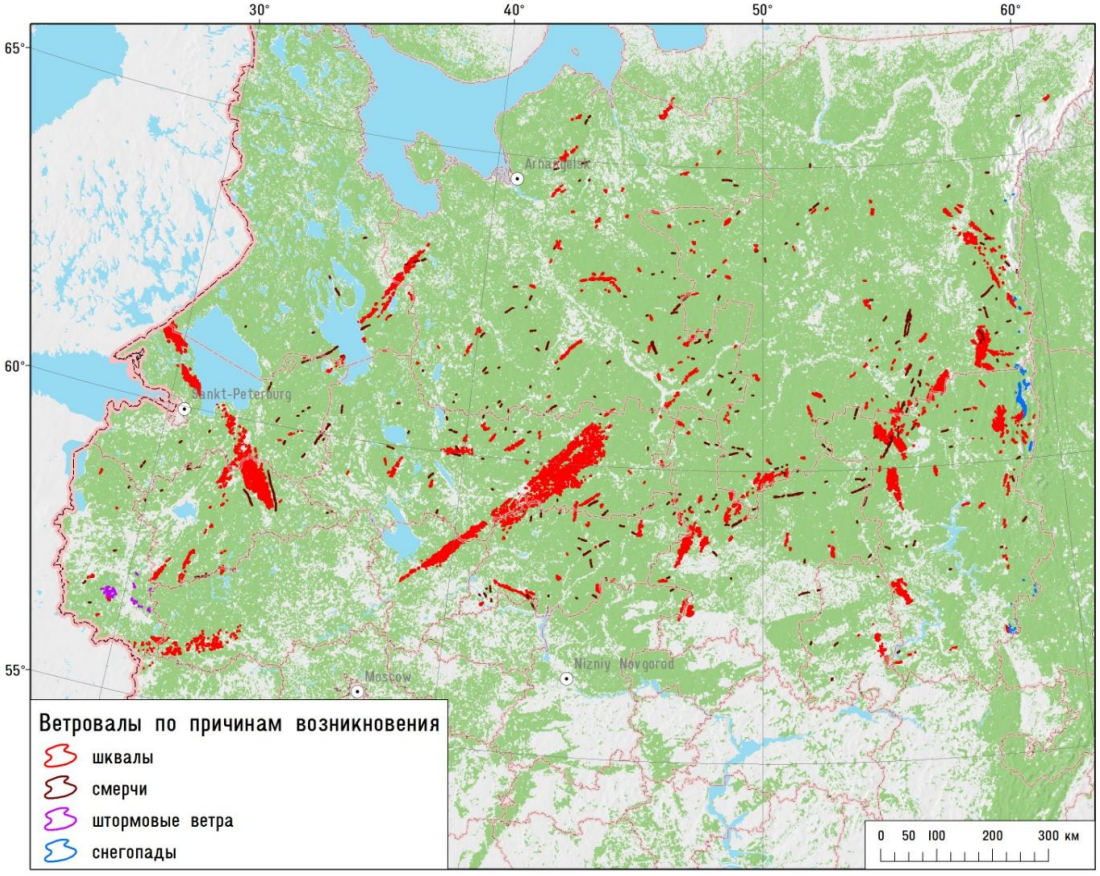



Рис. 1. Пространственное распределение ветровалов в северной части Европейской России за период 1986–2017 гг.

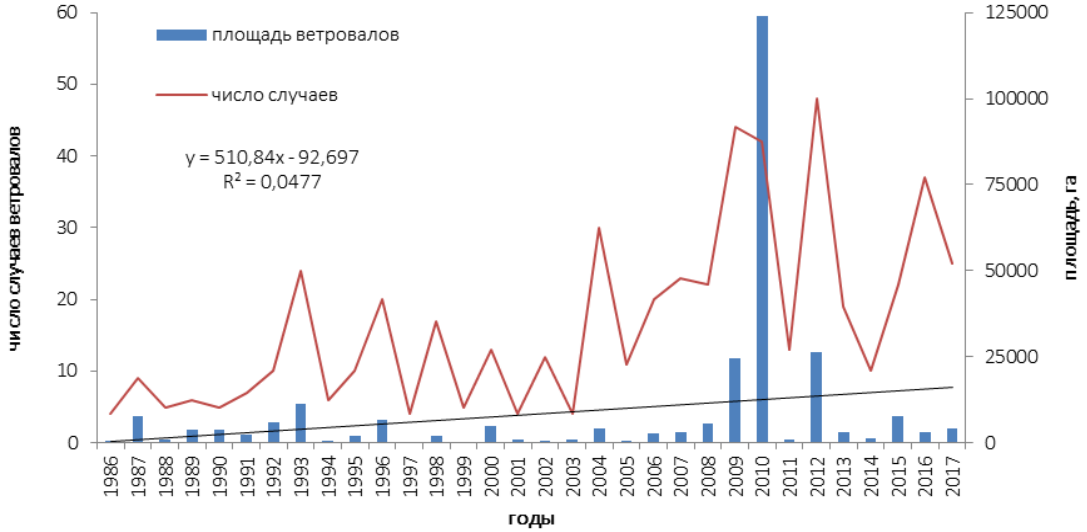



Рис. 2. Межгодовая изменчивость количества случаев и площади ветровалов за период 1986–2017 гг.

*Исследование проведено при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00046-а)*

**Список литературы**

1. Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика. 2011. № 3. С. 53–58.

2. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Researchю 2018. Vol. 207. P. 111–121.

3. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change / M.C. Hansen, P.V. Potapov, R. Moore [et al.] // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.

4. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive / P.V. Potapov, S.A. Turubanova, A. Tyukavina [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 159. P. 28–43.

5. Shikhov A.N., Perminova E.S., Perminov S.I. Satellite‐based analysis of the spatial patterns of fire and storm‐related forest disturbances in the Ural region, Russia // Natural Hazards. 2019. URL: https://doi.org/10.1007/s11069-019-03642-z.

6. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 204. P. 553–567.

УДК 528

**Javier Rodriguez Utrilla[1], Álvaro Nogues Palenzuela[1], María Fernanda[2] Maradiaga-Marín, Paloma Cariñanos[2]**

[1] Agroforestry responsible in Garnata Drone SL. 18013 Granada, Spain
[2] Department of Botany, University of Granada, 18071, Granada, Spain
e-mail: jrodriguez@garnatadrone.com

# DESIGN OF URBAN GREEN AREAS THROUGH THE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES

The design of urban green areas starts from the assessment of ecosystem services, such as air quality and mitigating the effects of urban heat islands, and disservices, such as the emission of volatile organic compounds (VOC). 136 tree species distributed in up to 25 green areas were inventoried. The species having a greater input in air quality by reducing maintenance requirements and increasing longevity, as well as by their effects on the elimination of pollutants and low emission of volatile organic compounds (VOC), were identified.

*Keywords: ecosystem services, ecosystem disservices, green areas, land use.*

**Introduction.** The assessment of environmental services (benefits) and disservices (negative effects) is an essential field of study to provide environmental managers a scientific basis on the potential of the benefits of the urban forest, as well as the approaches that can be taken to face the challenges that nature-based solutions present in urban areas at an appropriate level, scale and context [1, 2].

Spain is a country that is investing resources and efforts to improve the environmental services that urban green areas provide in the maintenance and preservation of natural resources and the quality of life of its inhabitant by creating strategies and environmental policies focused on the mitigation and adaptation of climate change.

Following this line of approach of land use planning, this report shows the environmental assessment of the green infrastructure of the Autonomous City of Ceuta, Spain (southern Mediterranean), as an example of how the assessment of ecosystem services can help in the design of urban green areas. The analysis includes the environmental services offered by the elements of this urban ecosystem, such as tree-lined avenues and the set of vegetation in urban parks and gardens, as well as the considerations that should be taken when designing and restoring these areas green. The purpose is that the open areas of Ceuta are integrated as part of the planning of urban green infrastructure, and areas where they can potentially increase, and improved delivery of ecosystem services are identified.

**2. Material and Methods**

***2.1. Study Site.*** This research is a case study that was carried out within the administrative boundaries of the Autonomous City of Ceuta, Spain, which is situated in the northeastern end of the African continent in the Tingitana peninsula (35 ° 55'-35 ° 32'N and 01 ° 35' -01 ° 41 'in length) (Ministry of Defense, 2012). It consists of ~ 20 km2 of coastline in the Strait of Gibraltar, in the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea [3].

***Selection of urban green areas.*** A total of 25 urban green areas of Ceuta were selected, of which 14 belong to urban parks and gardens and 11 to tree-lined avenues. The urban parks and gardens are 1) Gardens of Argentina (11,921.99 $m^2$), 2) Santa Catalina Park (33,490.76 $m^2$), 3) Gardens of Rosende (5,065.17 $m^2$), 4) Huerta Rufino Park (3,144.47 $m^2$), 5) Carmen Cerdeira Park (255.41 $m^2$), 6) Jose Luis Chávez Park (803.13 $m^2$), 7) Maritime Park (5,600 $m^2$), 8) San Amaro Park (12,128 $m^2$), 9) Africa Plaza (3,438.39 $m^2$), 10) Constitution Plaza

© Javier Rodriguez Utrilla, Álvaro Nogues Palenzuela, María Fernanda, Maradiaga-Marín, Paloma Cariñanos, 2019

(666.7 $m^2$), 11) Los Reyes Plaza (2,226.60 $m^2$), 12) España Plaza (1,981.37 $m^2$), 13) Paz- Baño Arabe Plaza (1,024.47 $m^2$), 14)Teniente Ruiz Plaza (/ 267.54 $m^2$). The tree-lined avenues are 1) Old Train Station (1,000 $m^2$), 2) España Av. (3,577.24 $m^2$), 3) Nuestra Señora de Africa Av. (1,856.64 $m^2$), 4) Otero Av. (7,777.89 $m^2$), 5) Regulares Av. (1,949.31 $m^2$), 6) Foso (506.32 $m^2$), 7) Teniente Reinoso Roundabout (1,381.96 $m^2$), 8) Paseo Benítez (5,141.32 $m^2$), 9) Paseo Palmeras (1,555.95 $m^2$), 10) Paseo Marina Española (1,555.95 $m^2$), 11) Green Zone Access to the Cemetery (3,218.79 $m^2$).

***Inventory of vegetation.*** The identification and quantification of the tree species in the urban green areas of Ceuta was carried out *in situ*. The number of individuals per species, size and structure (individual trees, vegetation screens, tree alignment) were considered in the inventory, which is necessary to calculate indices for the valuation of ecosystem services and disservices [4].

***Emission of VOCs and the urban trees' ability to reduce atmospheric pollution***. To model the ecological functions of the emission of volatile organic compounds (VOC), the air pollution mitigation capacity and the carbon sequestration capacity of the vegetation present in the urban green areas, the i-Tree Species software (formerly UFORE) model, which provides tools for analysis and evaluation of urban and rural forest benefits, was used. This software allows the most appropriate species to be selected based on the environmental services they provide in relation to the climate conditions of the study area, by ranking tree species based on their environmental benefits at maturity.

***Urban Tree Canopy Assessment.*** To assess the current amount of tree canopy and the amount that could exist (plantable space) and improve the tree cover to reduce summer peak temperatures and reinforce resilience to climate change impacts, the i-Tree Canopy software (also of the UFORE model) was used. To evaluate the percentage of the type of coverage of the defined area, i-Tree Canopy uses Google Maps aerial photography at random points to conduct a cover assessment within a defined area.

**Results.** A total of 2,673 trees were recorded, after carrying out a tree survey in 25 urban green spaces of Ceuta, corresponding to 136 species identified from 48 different families. The most abundant species (more than 50 individuals) were *Washingtonia filifera*, *Phoenix* sp., *Tamarix Africana*, *Phoenix dactylifera*, *Trachycarpus forunei*, *Nerium oleander*, *Platanus x hispanic*a, *Cycas revoluta*, *Lagunaria patersonii*, *Olea europea*, *Pittosporum tobira*, *Yucca elephantipes* and *Jacaranda mimosifolia*.

In terms of number of individuals, the Maritime Park stands out. However, the species richness is higher in San Amaro Park, due to its historical botanical garden nature. Two of the spaces that stand out because of their monospecific nature or low diversity are Carmen Cerdeira and Plaza de España parks, which have 1 and 2 species for parks and gardens, respectively. In tree-lined avenues, the most notable are Paseo Marina Española and Paseo Benítez, with 453 and 119 individuals respectively, the first one having the greatest diversity with 18 different species.

The model generated a list of tree species with the best environmental performance, based on their capacity to improve air quality and on their low VOC emission levels. This result is based on the study of the combined effects on the absorption of different pollutants and VOC emissions for adult trees. This case study included 45 of the species present in green areas.

A total of 219,073.76 $m^2$ of land cover across the green areas were analyzed and classified with the i-Tree Canopy model, of which 132,414 $m^2$ belong to parks and gardens, and 86,659.76 $m^2$ to tree-lined avenues. In the case of parks and gardens, 36 % of the coverage was found to be tree cover, followed by a 34 % impervious surface, which refers to surfaces paved or covered with a certain type of material that prevents water from permeating into the ground. In addition, 13 % of the cover belongs to shrubs, followed by 12 % of grass or potentially plantable soil, 4 % of grey infrastructure, which refers to buildings or any type of constructions, and finally 1 % of water elements, such as fountains or artificial water bodies (Figure 1).

**Table**

Top-rated plant species for improving air quality. The relationship between plant species in urban green areas in Ceuta, according to their contribution on the combined effects of pollution removal and VOC emissions. (** Species susceptible to pollution)

| | | Species | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| + | Scale of Contribution to Air Quality | 0-10% | *Jacaranda mimosifolia* | *Lagerstroemia indica* | *Lagunaria patersonii* | *Ligustrum lucidum* | *Quercus suber* | | | | |
| | | 10-20% | *Arbutus unedo* | *Crataegus monogyna* | *Cupressus sempervirens* | *Eriobotrya japonica* | *Hibiscus rosa-sinensis* | *Hibiscus syriacus* | *Melia azederach* | | |
| | | 20-30% | *Ceiba speciosa* | *Citrus aurantium* ** | *Pinus halepensis* | *Schefflera sp.* | *Schefflera actinophylla* | *Schefflera arboricola* | | | |
| | | 30-40% | *Brachychiton populneus*** | *Ilex aquifolium* | | | | | | | |
| | | 40-50% | *Albizia julibrissin* | *Erythrina crista-galli* | *Schinus molle* | *Schinus terebinthifolius* | | | | | |
| | | 50-60% | *Araucaria sp.* | *Araucaria excelsa*** | *Araucaria heterophylla* | *Brungmansia arborea* | *Euphorbia sp* | | | | |
| | | 60-70% | *Erythrina caffra* | *Grevillea robusta* | | | | | | | |
| – | | 70-80% | *Ceratonia siliqua* | *Euphorbia tirucalli* | *Ficus australis* | *Ficus benjamina* | *Ficus carica* | *Ficus drupacea* ** | *Ficus elastica* | *Ficus heterophylla* | *Ficus microcarpa* ** |
| | | 80-90% | *Acacia sp.* | *Ficus rubiginosa* | | | | | | | |
| | | 90-100 % | *Casuarina cunninghamiana*** | *Eucalyptus sp.* | *Quercus ilex. Subsp. Rotundifolia* | | | | | | |

**4. Discussion.** In the green infrastructure elements of Ceuta, 136 species of trees were found distributed in 25 green areas. Most of the species found were exotic, favored by the subtropical temperatures that allow the incorporation of a great array of species, from a wide range of hardiness zone.

The i-Tree Species model provides information about urban trees, identifying those species of trees that play a greater role in air purification. These species are mostly exotic in Ceuta. This selection of tree species are species that adapt to local conditions, which will reduce the mortality rate of tree species during the stages of establishment of new individuals and will have low management costs [5, 6]. In addition, these selected species are expected to have the potential to provide a wide range of ecosystem services. But above all, priority has been given to the elimination of pollutants and low VOC emissions [7, 8]. Some of the best characteristics of trees to improve air quality generally include large foliar surfaces at maturity, leaf characteristics susceptible to collection of particulate matter (PM) (pubescence, sticky), low VOC emissions and / or relatively high transpiration rates [9].

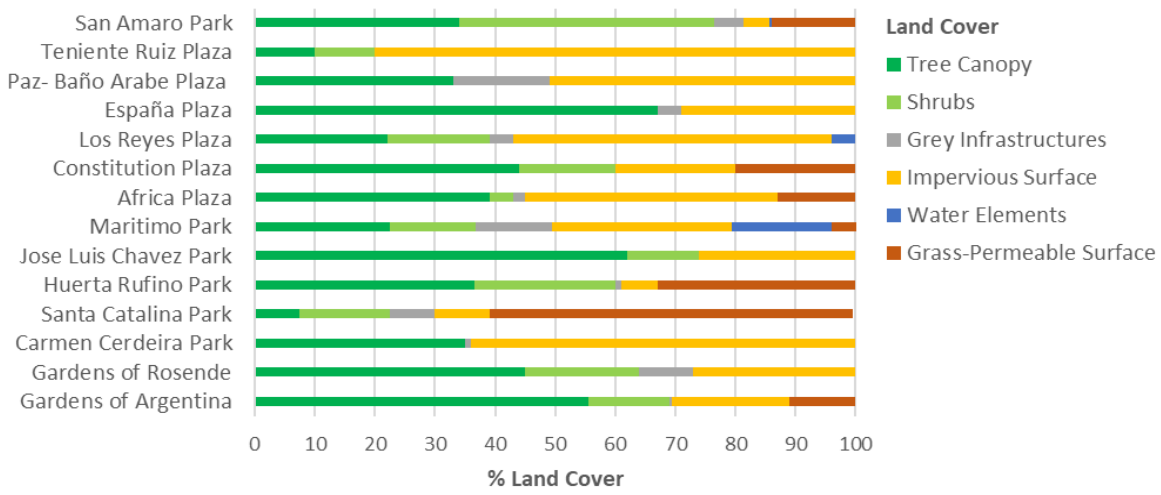



Figure 1. Relative proportion of the types of land cover of each of the parks and gardens of Ceuta

The 11 tree-lined avenues analyzed, 67 % correspond to impervious surfaces, such as paved surfaces, 14 % to tree canopy cover, 7 % to grey infrastructures, 6 % of shrub cover (which was usually accompanied by tree cover), and 6 % of grass or potentially plantable soil, with no water being found within these areas (Figure 2).

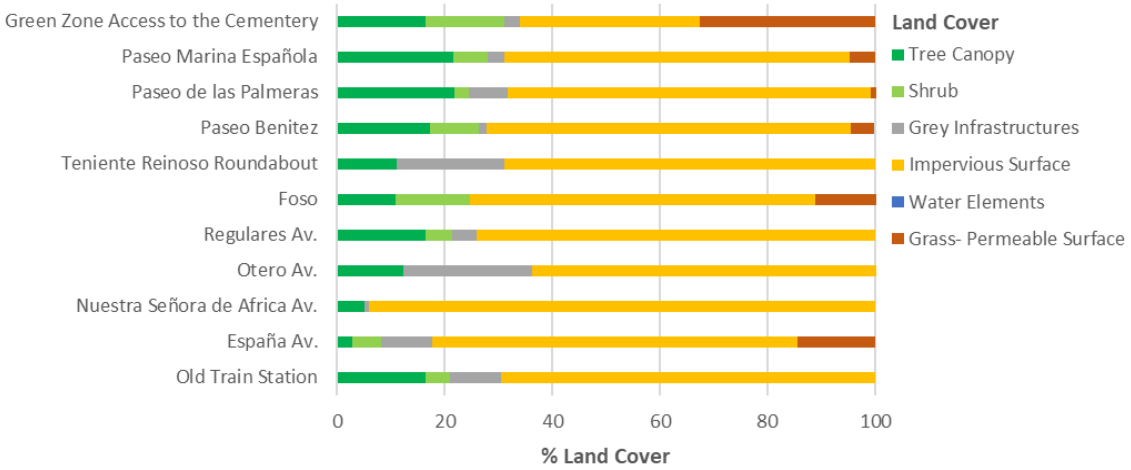



Figure 2. Relative proportion of the types of land cover of each of the tree-lined avenue of Ceuta

Pollution-sensitive species were also identified by the i-Tree Species model and are often found in urban green areas, such as *Citrus aurantium, Brachychiton populneus, Araucaria excelsa, Ficus drupacea, Ficus macrocarpa and Casuarina cunninghamiana* (Table 1). These tree species can be considered as non-ideal species to implement near the thermal power station of the port area, areas of automobile traffic and residences. However, in the case of *Araucaria excelsa, Ficus drupacea* and *Ficus macrocarpa*, they are considered as emblematic species and are situated within the historical parks of Ceuta, such as San Amaro Park and Argentina garden near sources of pollution, what makes them vulnerable, if air pollution levels increase.

Other ecosystem services considered in this environmental assessment are the contribution of urban vegetation in the processes of thermal regulation, estimated on this study from the different types of land coverage existing in green spaces. This analysis also allows impermeable surfaces that are potentially replaceable by tree canopy cover to be identified. Currently, the General Urban Planning of Ceuta intends to increase urban green areas from ~219,073.76 $m^2$ to 385,000 $m^2$ [10].

**5. Conclusion.** The assessment of urban ecosystems and their services in the City of Ceuta provide an estimate of the current contribution of urban forests to city air quality, and allow implications to be drawn and recommendations for decision-making to be made, such as the replacement of species that are sensitive to pollution and are often found near busy avenues.

The study shows that there are factors to be considered in urban green space design strategies with the aim of improving air quality: (i) Physiology of the species: dimensions at maturity, growth rate, longevity, and maintenance needs; (ii) increasing the number of native species that are better adapted to the environmental conditions of Ceuta; (iii) Increasing the number of species with low VOC emissions that help to reduce the formation of tropospheric ozone and (iv) including species that are tolerant to atmospheric pollution, especially in areas near sources of pollution, such as the thermal power station in the port area, areas of automobile traffic and residences.

The available soil surfaces that are potentially plantable and allow water filtration to the subsoil were identified using the i-Tree Canopy model. This will have three consequences: (i) it will help regulate the temperature within urban areas, resulting in lower VOC

emission dependent on temperature and therefore lower ozone concentration; (ii) it will allow water filtration to the subsoil and will reduce the risk of flooding in urban areas, especially in torrential rainy season, and (iii) will increase structural connectivity between the Ceuta's protected areas.

Finally, the environmental analysis of green areas provides relevant information to decision-makers, which contributes to prioritizing the actions and the management of environmental policies to be carried out in existing green areas, as well as supporting the design planning of new potential green areas. This type of analysis promotes positive synergies between nature preservation and land management policies based on criteria that are adequate for each context to ensure long-term sustainability. The advantage of this study methodology is that it can be transferred to any place that desire to manage urban green areas to increase the benefits of ecosystem services and reduce those considered as disservices.

**Acknowledgements.** Garnata Drone for the assessment in management of green areas. Funding: This work was supported by the Institute of Ceuta Studies, through a Research Grant in the 2015 Call for the project "Valuation of Environmental and Ecosystem Services of the Urban Green Zones of the City of Ceuta".

**References**

1. TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. UNEP and la Comisión Europea.

2. EC (European Commission), 2015. Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions and re-naturing cities. Final Report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities (full version). Brussels. URL: http://doi.org/10.2777/765301.

3. EC (European Commission), 2002. Ciudad Autónoma de Ceuta. In: L. Lázaro Araujo (Eds.), Las acciones estructurales comunitarias en España y sus comunidades autónomas. Periodo 2002–2006 Madrid: Comisión Europea (1ra ed). P. 225–243

4. Cariñanos P., Casares-Porcel M., Quesada-Rubio J.M. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain // Landscape Urban Plan. 2014. № 123. P. 134–144. URL: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009.

5. Trees in towns II – a new survey of urban trees in England and their condition and management / C. Britt, M. Johnston, A. Riding [et al.]. No. Research for Amenity Trees No. 9. Myerscough College, London: Department for Communities and Local Government. 2008.

6. James S., Jaluzot A. Trees in the townscape: a guide for decision makers // Trees & Design Action Group. 2012. http://www.tdag.org.uk/uploads/4/2/8/0/4280686/tdag_trees-in-the-town scape_november2012.pdf (accessed 14/06/2016).

7. Conway T.M., Vander-Vecht J. Growing a diverse urban forest: species selection decisions by practitioners planting and supplying trees // Landscape and Urban Planning, 2015. № 138. P. 1–10. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015. 01.007.

8. Kuser J.E. Handbook of urban and community forestry in the northeast. Kluwer Academic Publishers, New York, 2000. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4191-2.

9. Nowak, D.J. Tree species selection, design, and management to improve air quality. Construction Technology: Annual meeting proceedings of the american society of landscape architects. 2000. P. 23–27.

10. PGOU (Plan General de Ordenación Urbana de Ceuta), 2008. Avance del Planeamiento, Municipio de Ceuta 1–95. España.

# СОДЕРЖАНИЕ

**ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ ..... 3**

*М.А. Бурцев, А.В. Кашницкий, Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, И.С. Пустынский, Е.И. Холодов*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРОССКАЛИБРОВКИ МЕТОДОМ СОПОСТАВЛЕНИЯ ГИСТОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ «КАНОПУС-В-ИК» ..... 3

*А.П. Гук, Л.Г. Евстратова*
ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ (С БПЛА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЕКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ..... 9

*Е.В. Дмитриев, В.В. Козодеров, С.А. Донской, П.Г. Мельник, С.А. Зотов*
ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСОВ ..... 12

*В.А. Заичко, П.А. Лошкарев, С.В. Пушкарский*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЕДИНОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА В РЕГИОНАЛЬНОМ РАЗВИТИИ ..... 19

*В.С. Мурадян, Г.О. Тепаносян, Ш.Г. Асмарян, А.А. Овсепян, А.К. Сагателян*
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ NDVI И КЛИМАТИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ В ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ НА ПРИМЕРЕ СЮНИКСКОГО РЕГИОНА, АРМЕНИЯ ..... 22

*Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев*
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫХ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ ЕСТЕСТВЕННОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ..... 30

*А.Г. Терехов, А.А. Пак*
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО АВТОНОМНОГО РАЙОНА КНР ..... 34

*Javier Rodriguez Utrilla, Álvaro Nogues Palenzuela, Domingo Alcaraz Segura, Emilio Guirado Hernandez*
HOW TO APPLY REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR PRECISION FARMING: 2 PRACTICAL CASES BY GARNATA DRONE ..... 37

**СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ..... 42**

*С.А. Бронов, Н.А. Никулин, П.В. Авласко, Е.А. Степанова, Д.Д. Кривова, А.М. Пичковский, Е.П. Чумакова*
МОДЕЛИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ..... 42

*Д.В. Емельянов, Н.О. Мальчиков, Т.Н. Демьяненко, А.П. Шевырногов*
РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ ..... 45

*А.В. Корнилаева, Р.В. Брежнев, Г.М. Цибульский*
РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИНТЕРФЕЙСА ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИКИТ СФУ ..... 49

*С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий*
СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА НАЛИЧИЕ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА ..... 53

*А.Г. Терехов, А.А. Пак*
РЕКОНСТРУКЦИЯ 3D-МОДЕЛИ ЧАШИ ЖАРЫНТАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ КАШ (КНР) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И DEM ..... 56

*М.В. Титович, А.В. Рубцов, Р.Е. Акимов, А.Г. Усынина*
РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ БВА CAMIRGREEN ДЛЯ ЗАДАЧ КАРТИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ..... 59

*В.А. Хамедов*
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ (НА ПРИМЕРЕ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА) ..... 63

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ..... 66**

*А.И. Алексанин, В. Ким*
ОБНАРУЖЕНИЕ РУБОК ДЕРЕВЬЕВ ПО ТЕНЯМ ..... 66

*О.С. Артемьев*
ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ЛАНДШАФТНОЙ ТАКСАЦИИ ЛЕСОПАРКОВЫХ ЛЕСОВ ..... 69

*Б.И. Борде*
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КАМПУСА ..... 72

*Е.В. Волкова, А.А. Косторная*
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ СКАНЕРОВ МСУ-МР (КА МЕТЕОР-М № 2) И AVHRR (КА NOAA-18, 19, METOP-B) НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ..... 75

*П.Н. Дагуров, А.В. Дмитриев, С.И. Добрынин, Т.Н. Чимитдоржиев*
ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА РАДАРНОЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ..... 78

*И.М. Данилин, Р.А. Зиганшин, И.А. Целитан*
ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ЛАНДШАФТНОЙ ОСНОВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ..... 82

*И.М. Данилин, И.А. Целитан*
АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ..... 86

*Л.Г. Евстратова*
СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ..... 92

*Е.А. Ерофеев, В.Н. Катаев*
МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ОЦЕНОЧНОГО КАРСТОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ ПЕРМСКОГО КРАЯ ..... 96

*С.В Иванов, О.В. Кушнырь, А.В. Комаров, А.С. Рыбкин, В.Б. Серебряков, П.А. Тищенко , К.В. Вахрушев, В.М. Сидоренков*
ВЕБ-ГИС И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИНТЕРЕСАХ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ..... 102

*А.В. Картушинский*
ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ..... 106

*А.В. Качаев, Е.А. Дроздовский*
РАЗРАБОТКА WEB-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ РОССИИ ..... 109

*М.А. Корец, О.А. Антамошкина, А.С. Прокушкин*
МЕТОД ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ И РЕГУЛЯРНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОСТАХ РОСГИДРОМЕТА НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ЕНИСЕЙ ..... 111

*А.А. Кузнецова, К.В. Раевич, Ю.А. Маглинец*
ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ЗАДАЧАХ СТРУКТУРИЗАЦИИ ЗНАНИЙ О ЗЕМЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ..... 114

*М.А. Марьин*
СЕГМЕНТАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЛАЧНОСТИ НА ДАННЫХ SENTINEL-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ..... 117

*Ж.Ж. Мовланов, Л.А. Абдуллаев*
РАЦИОНАЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ БЛАГОПРИЯТНЫХ ПОЗИЦИЙ НА РАЗМЕЩЕНИЕ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В СЕВЕРНОМ НУРАТАУ ..... 120

*А.В. Моисеев, Д.А. Швец*
ПОСТРОЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ СНИМАЮЩЕЙ КАМЕРЫ ПО АЭРОФОТОСНИМКАМ..... 123

*Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, Е.В. Волкова, Е.В. Василенко*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ В МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМОВ ОБШИРНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РЕГИОНА ..... 127

*М.В. Носков, В.С. Тутатчиков*
ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГА АЛГОРИТМА КУЛИ – ТЬЮКИ ДВУМЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СНИМКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ФИКСИРОВАННОМ ФОРМАТЕ 4K ..... 131

*Д.А. Перфильев*
СТРАТЕГИЯ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ..... 134

*О.А. Попова*
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ..... 137

*М.Г. Разакова, А.Г. Кузьмин, Ж.Ж. Айнакулов, И.О. Федоров, Р.К. Ергалиев*
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБЪЕМА СЕЛЕВОГО ВЫНОСА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ..... 141

*Н.К. Резник, А.П. Раевич*
ИССЛЕДОВАНИЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧАХ ДЕШИФРАЦИИ ДАННЫХ ..... 145

*А.Ж. Саринова, А.М. Амангелді*
ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОТЕРЯМИ ..... 149

*А.Ж. Саринова, Г.Е. Егамкулова*
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ..... 153

*А.Ж. Саринова, Н.Ш. Есенбай*
АЛГОРИТМ СЖАТИЯ БЕЗ ПОТЕРЬ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЁТОМ КОРРЕЛЯЦИИ И ГРУППИРОВКИ КАНАЛОВ ..... 157

*А.Ж. Саринова, К.К. Жакупов*
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИИ ..... 161

*В.Б. Стецюк, А.В. Пятаева*
УДАЛЕНИЕ ДЫМКИ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИИ МЕТОДОМ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕМНОГО КАНАЛА ..... 163

*Anastasiia Safonova, Emilio Guirado, Siham Tabik, Domingo Alcaraz-Segura, Yuriy Maglinets*
MASK R-CNN FOR SEGMENTATION OF OLIVE TREES ..... 167

**МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ..... 173**

*А.В. Артюшина, Т.Б. Журавлева*
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА MERRA-2 ..... 173

*О.П. Архипкин, Г.С. Сагатдинова, Ж.А. Бралинова*
СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ РАДАРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ВОДОХРАНИЛИЩ ..... 177

*А. Ю. Белоносов, А. Е. Кудрявцев, С. А. Шешуков, Д. В. Борисов*
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ..... 181

*И. Ю. Ботвич, Т.И. Письман, Д.В. Емельянов, А.П. Шевырногов*
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАПОВЕДНИКА СТОЛБЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ..... 186

*В.И. Бышев, В.Г. Нейман, А.Н. Сидорова, И.В. Серых, М.В. Анисимов*
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА ..... 189

*Е.В. Варламова, В.С. Соловьев*
ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ NDVI РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ AVHRR/NOAA ..... 193

*И.П. Вершинина*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ ТОМЬ ..... 197

*А.Е. Воронова*
МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В НОВОСИБИРСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ ..... 202

*А.С. Гаченко, А.Е. Хмельнов*
ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ОЗЕРА БАЙКАЛ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ ..... 205

*О.Л. Гиниятуллина, Л.С. Миков*
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ..... 208

*А.А. Гостева, С.П. Ильина*
ИНТЕГРАЦИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА ..... 214

*М.Ю. Грищенко, М.И. Варенцов, П.Г. Михайлюкова*
АНАЛИЗ ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ РАЗНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТОВ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ..... 217

*М.Ю. Грищенко, Е.Ю. Сарычев*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО КОМФОРТА ..... 220

*Р.Ю. Данилов, О.Ю. Кремнева, В.Я. Исмаилов,*
*В.А. Третьяков, А.А. Ризванов, В.В. Кривошеин*
РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТОДОВ ФИТОСАНИТАРНОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АГРОЭКОСИСТЕМ ..... 223

*Н.И. Добротворская, А.В. Чернов*
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЧВЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЗЗ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ..... 227

*Е.А. Дунаева*
ВОЗМОЖНОСТИ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ..... 232

*Е.Ю. Жукова, Н.В. Кутькина, А.А. Жуков*
ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОЦЕНОЗОВ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ ХАКАСИИ ПО ДАННЫМ TERRA MODIS ..... 236

*А.С. Заварзина, Е.Н. Кулик*
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРОСЪЕМКИ С БПЛА ..... 239

*В.В. Занозин, А.Н. Бармин*
ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ОПТИЧЕСКОГО И РАДИОДИАПАЗОНА В ЦЕЛЯХ АНАЛИЗА АНТРОПОГЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ..... 242

*С.Т. Им, В.И. Харук, В.Г. Ли*
ДИНАМИКА ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СРЕДНЕЙ СИБИРИ В XXI В.
И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ .....246

*Е.В. Карнаухова, Ю.Я. Симкин*
СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ
МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРОД САЯНОГОРСК .....249

*В.Б. Кашкин, Р.В. Одинцов, Т.В. Рублева, К.В. Симонов, Ю.А. Цуп*
РЕАКЦИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
СУЛАВЕССКОГО ФЕНОМЕНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ..... 252

*В.Г. Коновалов, В.А. Рудаков, О.Ю. Калашникова, A. Gafurov, W. Hagg*
РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ СТОКА РЕК СНЕГОВО-ЛЕДНИКОВОГО ТИПА ПИТАНИЯ .....256

*В.А. Кочнев*
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА .....260

*К.В. Краснощеков, А.В. Дергунов, Е.И. Пономарев, Е.Г. Швецов*
НАРУШЕННОСТЬ ЛЕСНОГО ПОКРОВА СИБИРИ И ПОСЛЕПОЖАРНЫЕ
АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ .....263

*Х.Б. Куулар*
ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ХРЕБТА
ЗАПАДНЫЙ ТАННУ-ОЛА ПО ДАННЫМ LANDSAT.....267

*Н.О. Мальчиков, А.С. Шушпанов*
АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДИ ШЕЛЬФОВОГО ЛЕДНИКА ФИМБУЛ НА ФОНЕ
ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.....270

*В.Г. Маргарян, А.С. Кочарян*
ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В МОНИТОРИНГЕ ПОГОДНЫХ
УСЛОВИЙ .....273

*Г.П. Метакса*
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ
БИОСИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....276

*В.Ф. Мочалов, Д.В. Жуков, Е.И. Астахова*
ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМА ВЫБОРКИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ
ЛАНДШАФТА .....280

*Д.Ю. Панов, Е.Ю. Сахарова, А.Е. Воронова*
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ .....284

*В.Г. Подопригора, А.В. Сорокин, Д.С. Макаров, Д.В. Харламов*
АНИЗОТРОПИЯ КРОН ДРЕВОСТОЯ И РАССЕЯНИЕ СИГНАЛОВ
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1 .....287

*В.А. Пуртов, Н.С. Ремень, Е.М. Гуземина, Е.И. Чупина, Д.В. Борисов*
МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ОБЪЕКТОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРА
С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....291

*В.А. Рогов, Н.В. Кравченко, О.И. Багаева*
АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ
МЕГАПОЛИСА И ПРИГОРОДНЫХ ЗОН ЛЕСНОГО МАССИВА ..... 295

*В.Ю. Ромасько*
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КАРТИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
СО СПУТНИКОВ TERRA И SNPP ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ ..... 298

*И.В. Рублев, А.Е. Воронова*
ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОПОРТАЛА «МЕТЕО-СИБИРЬ» ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ ..... 301

*Л.Г. Свердлик*
ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ
В ПЕРИОДЫ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ ..... 304

*Л.Г. Свердлик, Э.Ю. Зыскова*
СВЯЗЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ
С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В АТМОСФЕРЕ ..... 308

*Б.Т. Сериков, Е.С. Ауелхан*
МОНИТОРИНГ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ
ПРОЦЕССОВ ВДОЛЬ ЧИЛИСКОГО РАЗЛОМА ..... 311

*К.В. Симонов, М.А. Курако, А.С. Кругляков, А.Н. Мацулев*
АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАРТ МАКСИМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ
НА ОСНОВЕ ШИАРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ..... 314

*А.А. Синюткина*
ОЦЕНКА ГИДРОМОРФНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГЕОСИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ LANDSAT ..... 319

*Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев, Ю.М. Ильин, М.В. Семенова, Б.З. Цыдыпов*
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР
НА ПРИМЕРЕ ОВСА ..... 322

*А.В. Сорокин, А.Н. Остыловский, А.Н. Борисов, В.В. Иванов, Д.С. Макаров, Д.В. Харламов*
ОЦЕНКА ОБЪЕМА БИОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ СИГНАЛОВ
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1 ..... 326

*Е.Н. Сутырина*
ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ
ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ РАДИОМЕТРОМ AVHRR ..... 330

*О.А. Томшин, В.С. Соловьев*
ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ..... 333

*И.А. Уваров, В.В. Марченков, В.А. Толпин*
ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ
В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ СЕМЕЙСТВА «СОЗВЕЗДИЕ-ВЕГА» ..... 337

*С.К. Фарбер, Н.С. Кузьмик*
ПЛОДОРОДИЕ ЛЕСНЫХ ПОЧВ, ОЦЕНОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ..... 340

*Е.В. Федотова, А.И. Стародубцев, А.Г. Вырвинский*
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ ..... 344

*А.М. Цуцкарев, А.В. Пятаева*
СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛЕСОПАТОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....347

*А.Н. Шихов, А.В. Чернокульский, И.О. Ажигов*
СОЗДАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ВЕТРОВАЛОВ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО СНИМКАМ LANDSAT.....351

*Javier Rodriguez Utrilla, Álvaro Nogues Palenzuela, María Fernanda, Maradiaga-Marín, Paloma Cariñanos*
DESIGN OF URBAN GREEN AREAS THROUGH THE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES .....355

Научное издание

# РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы VI Международной научной конференции
Красноярск, 10–13 сентября 2019 г.

Научный редактор
**Ваганов** Евгений Александрович

Корректура и компьютерная верстка *А.А. Быковой*

Подписано в печать 28.08.2019. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 21,4. Тираж 100 экз. Заказ № 9106

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; http://bik.sfu-kras.ru
e-mail: publishing_house@sfu-kras.ru