МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы III Международной научной конференции
(Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.)

Научный редактор
Е. А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2016

УДК 528.8(063)
ББК 26.0с51я43
Р326

Редакционная коллегия:
Е. А. Ваганов – академик РАН, доктор биологических наук, ректор СФУ;
Г. М. Цибульский – доктор технических наук, профессор, директор ИКИТ СФУ, заведующий кафедрой СИИ; *М. В. Носков* – доктор физико-математических наук, профессор; *В. Б. Кашкин* – доктор технических наук, профессор; *В. И. Харук* – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ГИС;
Ю. А. Маглинец – кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ»

Р326 **Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли** : материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.) / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. М. В. Носков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 364 с.
ISBN 978-5-7638-3535-9

Представлены современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования, рассмотрены модели и методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, мониторинг 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.

УДК 528.8(063)
ББК 26.0с51я43

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

© Институт космических и информационных технологий СФУ, 2016
© Сибирский федеральный университет, 2016

ISBN 978-5-7638-3535-9

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 528.8:52(15)

ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ С РОССИЙСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СЕРИИ «МЕТЕОР-М» НА БАЗЕ СТАНЦИЙ ПРИЕМА МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

О. В. Бекренёв, С. Ю. Домрачев, М. С. Домрачева, С. И. Мартынов, А. В. Табенков
НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы»

В докладе рассматривается опыт создания специалистами НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» глобальной системы мониторинга Земли с российских космических аппаратов серии «Метеор-М» на базе любительских станций приема метрового диапазона. Данная система, кроме задач популяризации ДЗЗ среди радиолюбителей, позволяет решать задачи контроля состояния космических аппаратов и бортовой аппаратуры в квазинепрерывном режиме, а также может быть использована для решения задач глобального наблюдения атмосферы и подстилающей поверхности Земли в реальном масштабе времени в научных, образовательных и других целях.

Ключевые слова: глобальная система мониторинга, космический аппарат (КА), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

В настоящее время на орбите работают два российских космических аппарата «Метеор-М» № 1 и «Метеор-М» № 2, передающие изображения Земли, получаемые прибором МСУ-МР, в международном цифровом формате LRPT в режиме непрерывной передачи в метровом диапазоне длин волн на частотах 137,1 и 137,9 МГц. Эти данные предназначены для обеспечения оперативной гидрометеорологической информацией подразделений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В НЦ ОМЗ в целях контроля состояния работы метрового канала «Метеор-М» № 1 и «Метеор-М» № 2 была создана и функционирует приемная станция метрового диапазона ПК-М. Однако возможность ПК-М по контролю ограничена временем радиовидимости спутника, а также огромным уровнем промышленных помех, мешающим приёму и ещё больше сокращающим время уверенного приёма. Между тем в связи с широким распространением недорогих SDR-приемников, демодулирующего и декодирующего программного обеспечения появилось большое количество радиолюбительских станций, регулярно принимающих информацию со спутников серии «Метеор-М». В связи с этим возникла идея глобальной системы мониторинга на базе сети радиолюбительских станций, которая бы расширяла возможности НЦ ОМЗ по контролю далеко за пределы зоны радиовидимости станции ПК-М. В начале 2015 года работающий прототип системы *AMIGOS (Amateur Meteor Images Global Observation System)*, созданный в инициативном порядке, начал свою работу.

Структурно-функциональная схема *AMIGOS* изображена на рис. 1.

Космическая информация передается со спутников серии «Метеор-М» системой БИС-МВ в цифровом формате LRPT в режиме непрерывной передачи. Приёмные станции участников *AMIGOS*, находящиеся в зоне радиовидимости, принимают сигнал, извлекают из него неповрежденные пакеты данных и через интернет посылают их на сервер *AMIGOS* по UDP-протоколу.

На сервере *AMIGOS* программа сбора пакетов данных принимает все пакеты, поступающие в ее адрес, удаляет повторяющиеся пакеты и в конце 10-секундного интервала записывает накопленные в течение этого интервала и отсортированные по номерам пакеты на диск в файл с уникальным именем, однозначно идентифицирующем данный 10-секундный интервал. К каталогу с данными 10-секундными файлами открыт общий доступ через протокол FTP. Таким образом, в настоящее время все желающие имеют доступ к данным на сервере *AMIGOS* с помощью программы AmigosViewer.exe, позволяющей просматривать принимаемые изображения в режиме реального времени или за указанный пользователем промежуток времени. Кроме этого, на сервере ведётся статистика по количеству пакетов данных, поступивших от участников *AMIGOS*.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема AMIGOS

В настоящее время система *AMIGOS* включает несколько сотен станций приёма по всему миру, из которых более двух десятков работают непрерывно. Охвачена значительная часть северного полушария Земли (Арктика, Европа, северная и центральная части Азии, северная часть Африки, Северная Америка, Карибский регион и др.), а также Австралия в южном полушарии. Однако вне зоны мониторинга все еще остаются значительные территории и акватории Земли.

На рис. 2 показаны примерные зоны мониторинга Земли системой *AMIGOS* на момент написания данной статьи.

Уникальность системы *AMIGOS* заключается в реальном масштабе времени получения космической информации, в использовании сравнительно недорогого оборудования для приёма информации в метровом диапазоне длин волн, в большом охвате поверхности Земли, а также в получении качественных снимков. Высокое качество снимков достигается благодаря формированию результирующего изображения из неповрежденных пакетов данных, поступающих сразу от нескольких станций приёма, находящихся в зоне радиовидимости.

На рис. 3 изображены образцы снимков с космических аппаратов «Метеор-М» № 1 и «Метеор-М» № 2, полученные системой *AMIGOS*.

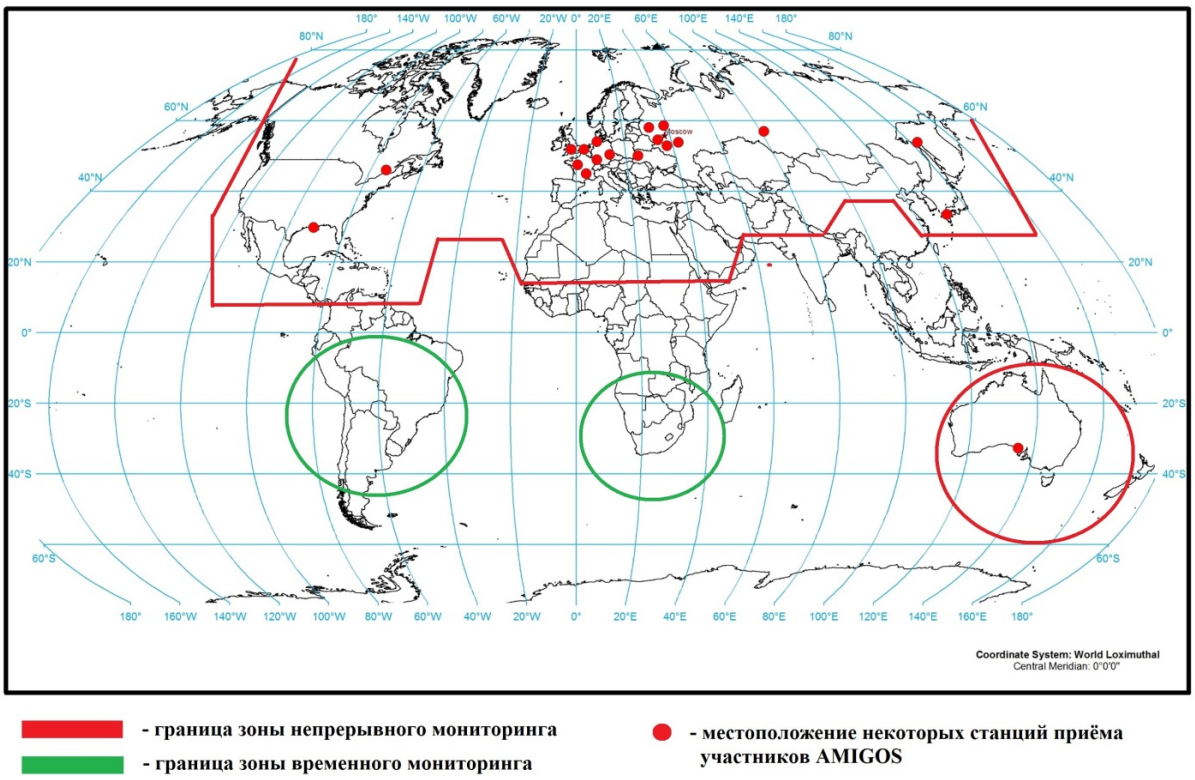
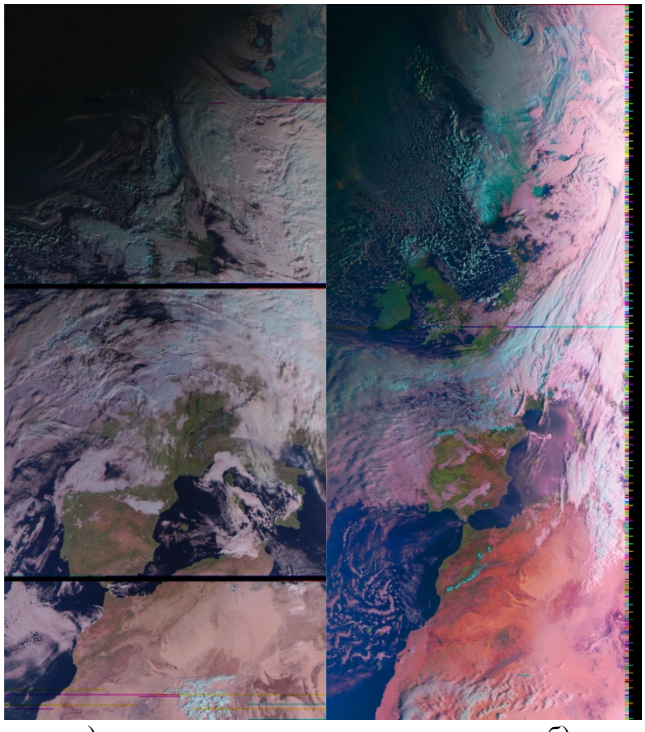


Рис. 2. Зоны мониторинга Земли *AMIGOS* (по состоянию на 09.03.2016)

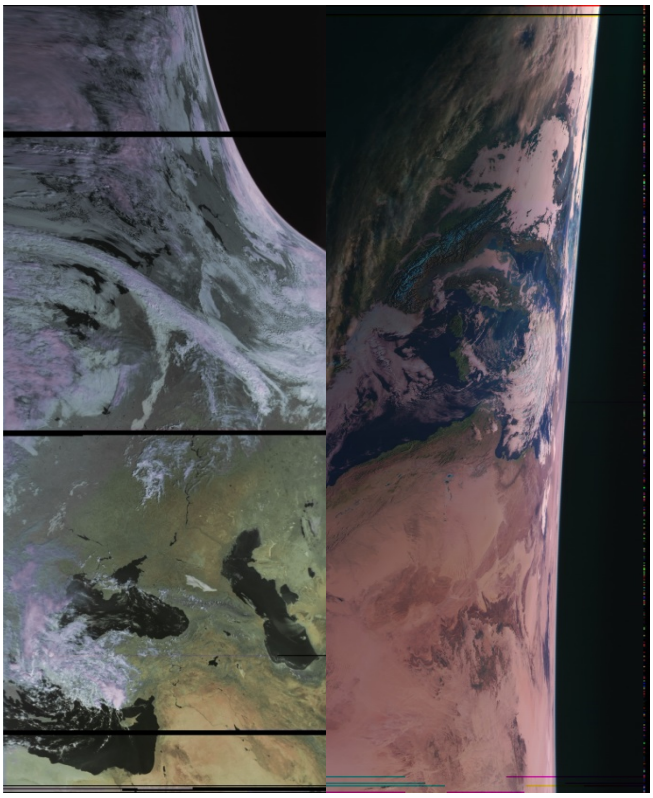


а) б)

Рис. 3. Снимки, полученные системой *AMIGOS*: а) снимок с КА «Метеор-М» № 2 от 10.11.2015 в 09.28 UTC; б) снимок с КА «Метеор-М» № 1 от 23.02.2016 в 08.20 UTC

Важным свойством системы *AMIGOS* является квазинепрерывный контроль состояния бортовой аппаратуры и, например, той ее части, которая отвечает за правильную ориентацию спутника в пространстве. Иногда происходят сбои в работе аппаратуры, и космический аппарат начинает раскачиваться. Это приводит к

искажению снимков или нарушению приёма сигнала. В случае сбоя оборудования специалисты Центра управления полетами могут быстро получить информацию от *AMIGOS* и оперативно устранить неполадки. На рис. 4 изображены космические снимки, полученные *AMIGOS* во время сбоя в работе спутников.



а) б)

Рис. 4. Обнаружение сбоев в работе спутников: а) снимок с КА «Метеор-М» № 2 от 23.09.2015 в 06.55 UTC; б) снимок с КА «Метеор-М» № 1 от 20.12.2015 в 08.05 UTC

В соответствии с Федеральной космической программой России (ФКП-2025) планируется расширить группировку спутников серии «Метеор-М», оснащенных бортовой информационной системой диапазона метровых волн. Развитие глобальной системы мониторинга Земли *AMIGOS* позволит контролировать состояние бортовой аппаратуры спутников серии «Метеор-М» в непрерывном режиме, а также решать задачи глобального наблюдения атмосферы и подстилающей поверхности Земли в реальном масштабе времени в научных, образовательных и других целях.

Список сокращений:

КА – космический аппарат
ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
НЦ ОМЗ – Научный центр оперативного мониторинга Земли
БИС-МВ – Бортовая информационная система диапазона метровых волн
МСУ-МР – Многозональное сканирующее устройство малого разрешения
ПК-М – Приёмный комплекс метрового диапазона
ФКП-2025 – Федеральная космическая программа России на 2016–2025 г.
SDR – Software-defined radio
AMIGOS – Amateur Meteor Images Global Observation System
LRPT – Low Resolution Picture Transmission
FTP – File Transfer Protocol
UDP – User Datagram Protocol
UTC – Universal Coordinated Time

УДК 528.852

МАКЕТ ОБЛАЧНОГО WEB-СЕРВИСА ПО ВЫДЕЛЕНИЮ ЛИНЕЙНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А. А. Бучнев, П. А. Ким, В. П. Пяткин, Г. И. Салов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
(ИВМиМГ СО РАН)
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: kim@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru
e-mail: kim@ooi.sscc.ru

A. A. Buchnev, P. A. Kim, V. P. Pyatkin, G. I. Salov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences (ICM&MG SB RAS)
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: kim@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru
e-mail: kim@ooi.sscc.ru

Рассматривается макет Web-сервиса по выделению аномальных (линейных и кольцевых) структур на космических изображениях, который решает новую задачу предоставления услуг обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Макет сервиса реализован на платформе Windows.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, облачные вычисления, линеаменты, кольцевые структуры.

Введение

Программа прикладных дистанционных исследований Земли из космоса обширна и разнообразна [1]. Эффективность дистанционных исследований Земли из космоса во многом определяется используемыми методами тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Функциональные возможности разработанного в ИВМиМГ СО РАН совместно с ФГБУ «НИЦ «Планета» Росгидромета РФ программного комплекса PlanetaMonitoring для обработки данных ДЗЗ дают возможность использовать при их обработке практически функционально-полный набор операций [2]. Одна из важных операций, реализованных в комплексе, – обнаружение объектов заданной формы (линеаментов и кольцевых структур) на космических снимках (программа Lineaments&Coils). Материалы аэрокосмических съемок показали повсеместное распространение линейных и кольцевых образований в структуре земной коры, что обусловило широкий интерес к ним со стороны исследователей, изучающих нашу планету. При обработке космических снимков с целью обнаружения на них объектов, представляющих интерес, в силу целого ряда причин предпочтение отдается статистическому подходу [3–5]. Основная причина состоит в том, что вследствие случайного характера природных процессов данные дистанционных измерений (спектросовмещенные изображения) содержат много случайных вариаций, маскирующих различия значений яркости изображения в точках области объекта и в точках области фона. В подобной ситуации надежные алгоритмы обнаружения могут быть построены только с помощью вероятностного (статистического) подхода. Есть целый ряд задач ДЗЗ, для которых очень важна задача выделения линейных и кольцевых структур на космических изображениях. Прежде

всего, это геологические исследования Земли из космоса. Так, обработка аэрокосмических изображений (АИ) восточной части Сибирской платформы Якутской кимберлитоносной провинции показала геологически значимую корреляцию выделенной статистическим методом системы линейных элементов и типов зон разрывных нарушений. Статистический метод выделения линейных и кольцевых структур на АИ оказался достаточно эффективным при решении ряда задач экологических исследований Земли из космоса. В проблеме космической охраны Земли существует настоятельная необходимость изучения процессов падения небесных тел на Землю и картирование мест их падения. Два исторических космических факта подчеркивают актуальность решения проблемы выделения импактных кратеров на космических снимках. Это, безусловно, падение на Землю Тунгусского метеорита (1908 г.) и столкновение кометы Шумейкера-Леви с планетой Юпитер (1994 г.). Еще одна задача экологической программы исследования Земли из космоса связана с изучением и картированием сейсмоопасных регионов по данным цифровой обработки АИ и комплекса наземных наблюдений. С использованием статистического подхода была проведена автоматизированная обработка космических снимков района Спитакского землетрясения и выделены две новые, крупные дизъюнктивные зоны, не совпадающие с зонами известных глубинных разломов и, по-видимому, играющие более существенную роль в тектонической структуре территории, чем это представлялось ранее. В последнее время алгоритм линеаментного анализа АИ используется в мониторинге ледовой обстановки в полярных районах Земли в практике оперативной работы ФГБУ «НИЦ «Планета» Росгидромета РФ.

В настоящее время становится актуальным использование Internet-технологий для оперативной интеграции информационно-вычислительных ресурсов для решения задач обработки данных ДЗЗ. Новая парадигма облачных вычислений (cloud computing) даёт такую возможность [7]. Основная идея облачных вычислений – технологии распределённой обработки и хранения данных, в которых все необходимые ресурсы предоставляются пользователю как Internet-сервис. Концептуально технологию облачных вычислений делят на предоставление инфраструктуры в качестве сервиса (IaaS, Infrastructure as a Service), платформы в качестве сервиса (PaaS, Platform as a Service) или программного обеспечения в виде сервиса (SaaS, Software as a Service), а также многих придуманных и ещё не придуманных Internet-технологий для удалённых пользовательских вычислений. В данной работе основное внимание будет уделено облачной концепции SaaS (Software as a Service, «программное обеспечение как услуга»). В работе рассматривается разработка макета Web-сервиса по выделению линейных и кольцевых структур, которая решает новую задачу предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS. Макет сервиса реализован на платформе Windows и состоит из следующих компонент: вычислительной компоненты, созданной на основе разработанного ранее Windows-приложения Lineaments&Coils выделения линейных и кольцевых структур на спутниковых изображениях, и Web-интерфейса, выполненного на основе свободного Web-сервера Apache.

1. Вычислительная компонента

Вычислительная компонента облачной технологии выделения линеаментов и кольцевых структур является пакетным вариантом упомянутого выше Windows-приложения Lineaments&Coils. Все необходимые для работы соответствующих процедур данные собраны в текстовом файле, имя которого является фактическим параметром компоненты. Главными из этих данных являются размер выделяемого объекта (длина линеамента либо радиус круга, возможно задание интервала значений), допустимая вероятность ложного обнаружения объекта, расстояние от предполагаемого положения объекта для измерения значений пикселов. Основная часть процедур

состоит в вычислении статистик S^+ и S^- на основе анализа значений пикселов изображения вдоль нормалей к предполагаемому положению объекта [7]. Эти статистики определяются следующим образом. Для $i = 1,...,k$ обозначим через ς_i, ξ_{i1}, ξ_{i2} значения пикселов, наблюдаемых в точках проверяемого положения объекта и на линии *i*-й нормали к объекту слева и справа от него. Тогда $S^+ = \sum_{i=1}^{k} I\{\varsigma_i > \max(\xi_{i1}, \xi_{i2})\}$, $S^- = \sum_{i=1}^{k} I\{\varsigma_i < \min(\xi_{i1}, \xi_{i2})\}$, где $I\{.\}$ – индикаторная функция события $\{.\}$, равная 1 или 0 в зависимости от того, произошло или не произошло событие $\{.\}$. Для каждого возможного положения решение о наличии объекта принимается по результату сравнения посчитанных значений статистик S^+ и S^- с предопределенными пороговыми значениями, полученными на основе входных параметров. При этом предполагается, что количество проверяемых позиций объекта *k* и расстояния вдоль нормалей для получения значений пикселов ξ_{i1} и ξ_{i2} таковы, что все величины могут рассматриваться как статистически независимые в совокупности, когда в поле зрения объект отсутствует. Используемый для построения статистик S^+ и S^- анализ значений пикселов требует больших временных затрат при его последовательном выполнении. В связи с этим разработаны параллельные реализации алгоритмов обнаружения аномальных структур. Реализация достигается средствами ОС Windows на уровне потоков: количество запускаемых потоков равно количеству логических процессоров. Каждый процесс (или поток), зная общее количество процессов и свой номер, определяет горизонтальную полосу изображения для обработки. При этом полосы у соседних процессов перекрываются и глубина этого перекрытия зависит от размера обнаруживаемых объектов.

Вычислительная компонента передает в вызывающую среду код завершения, означающий либо успешное обнаружение объектов, либо ошибочный вызов (как правило, обнаруживаются неверные значения параметров). В случае успешного завершения формируются два файла с одним и тем же изображением обнаруженных объектов: один файл в формате BMP, второй в формате JPEG.

2. Web-интерфейс

Текущая реализация Web-интерфейса продолжает многолетнее развитие разрабатываемой в ИВММГ СО РАН концепции объединения в рамках единой программной оболочки разнородных алгоритмов для обработки изображений. Таким образом, разные вычислительные компоненты опираются на единообразный сетевой интерфейс, предусматривающий возможность реализации таковых компонент на различных архитектурных платформах гетерогенной сети, включая многопроцессорные архитектуры Сибирского суперкомпьютерного центра. Обозначенная идеология успешно укладывается в облачный подход к развитию программного обеспечения, ориентируя на отказ от прямой адресации элементов сети в пользу гипертекстовых ссылок. С учетом разнородности и обширности рынка пользовательских браузеров, используемых в Internet-сети, Web-интерфейс в макетном варианте реализован с применением минимальных средств гипертекстового языка HTML. Сервисная часть выполнена на Apache 2.2, но закладываемая в концепцию «многополярность» распараллеливания процессов не противоречит и другим платформам, типа IIS Windows. Структурно в интерфейсе можно выделить следующие три части: подготовка параметров, вызов вычислителя, просмотр результата. Дальнейшая детализация приведет к более сложным структурам, образующим своего рода интерактивные технологические карты вычислительного процесса. О характере и сложности такой технологической карты можно получить представление на примере выбора

обрабатываемого изображения, которое может оставаться неизвестным пользователю ни в форме представления, ни в масштабе, ни в палитре. Аналогичные трудности встанут перед пользователем и при анализе результатов расчета. В целях упрощения экспериментального эксплуатационного этапа тестирования макета, передача пользовательских изображений производится по анонимному входу в библиотеку сервиса по FTP-протоколу. Таким образом, пользователь имеет возможность вести поиск «скрытых» объектов как по архивным данным, так и по индивидуальным образцам изображений. Естественность высоких требований к уровню сервиса автоматизированных информационных систем приводит к необходимости организации Службы сервиса, что диссонирует с желанием устранить человека из процессов информационной обработки, однако позволяет решить проблему «заторов» при сложившейся технологии пакетной обработки заданий в суперкомпьютерном центре.

Заключение

В заключение отметим, что успешный опыт реализации макета облачного Web-сервиса по выделению аномальных (линейных и кольцевых) структур на космических изображениях будет использован для предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS и по другим программным модулям комплекса PlanetaMonitoring, в частности блока распознавания.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

Список литературы

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

2. Planetamonitoring: программный комплекс обработки спутниковых данных / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.А. Кровотынцев, В.П. Пяткин, Г.И. Салов // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.

3. Салов Г.И. О мощности непараметрических критериев для обнаружения протяженных объектов на случайном фоне // Автометрия. 1997. № 3. С. 60–75.

4. Пяткин В.П., Салов Г.И. Статистический подход к задаче обнаружения некоторых структур на аэрокосмических изображениях // Наукоемкие технологии. 2002. № 3. Т. 3. С. 52–58.

5. Бучнев А.А., Пяткин В.П., Салов Г.И. Выделение кольцевых структур на космических снимках // Тр. IX Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2013», Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. Пленарные доклады. С. 3–9.

6. Kim P.A., Kalantaev P.A., Pyatkin V.P. Cloud Multiagent System for the Database of Natural Resources // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25. № 2. P. 220–222.

7. Салов Г.И. Новый статистический критерий для задач с двумя и тремя выборками, более мощный, чем критерии Вилкоксона и Уитни // Автометрия. 2011. № 4. С. 58–70.

УДК 528.8.04, 528.88

НЕЧЕТКИЕ КЛАСТЕРЫ С ОБЪЕМНЫМИ ПРОТОТИПАМИ В ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. А. Бучнев, В. П. Пяткин
Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

FUZZY CLUSTERS WITH VOLUME PROTOTYPES IN THE THEMATIC PROCESSING OF THE EARTH REMOTE SENSING DATA

A. A. Buchnev, V. P. Pyatkin
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM&MG SB RAS)
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

Рассматривается технология нечеткой кластеризации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) расширенными алгоритмами *C*-средних и Густафсона-Кесселя. Расширения алгоритмов состоят в использовании объемных прототипов и меры сходства кластеров. Объемные прототипы менее чувствительны к шумовым выбросам в распределении данных. Кроме того, использование меры сходства позволяет объединять кластеры в процессе кластеризации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, нечеткая кластеризация, объемные прототипы, степень сходства кластеров.

Одним из основных вопросов тематической обработки (интерпретации) данных ДЗЗ является вопрос повышения качества распознавания. Возникающие трудности обусловлены, в частности, «загрязнением» выборок смешанными векторами признаков, т.е. векторами, которые образуются при попадании в элемент разрешения съемочной системы нескольких природных объектов [1, 2]. Большинство алгоритмов классификации для отнесения векторов признаков классам вычисляют для каждого вектора значения подходящей функции «правдоподобия». В случае зачисления вектора признаков в класс по максимальному значению функции правдоподобия получается так называемая *жесткая* кластеризация (например, так работает классический алгоритм *K*-средних).

Альтернативным подходом является нечеткая кластеризация, которая позволяет каждому вектору признаков принадлежать одновременно всем кластерам с определенной степенью членства (принадлежности) в каждом кластере. Одним из первых алгоритмов нечеткой кластеризации является, вероятно, алгоритм *C*-средних [3]. Вопросы реализации и использования этого алгоритма в обработке данных ДЗЗ освещаются в [4].

Дальнейшим развитием системы нечеткой кластеризации данных ДЗЗ является реализация нечеткой кластеризации расширенными алгоритмами *C*-средних (*Fuzzy C-means – FCM)* и Густафсона-Кесселя (*Gustafson-Kessel – GK*) [5]. В алгоритме *FCM* выбранная метрика, определяющая форму получаемых кластеров, одинакова для всех кластеров и не меняется в процессе работы. Принципиальное отличие алгоритма *GK* от

алгоритма *FCM* состоит в том, что каждый кластер имеет индивидуальную метрику, основанную на нечеткой ковариационной матрице кластера (метрика Махаланобиса). Эта метрика динамически меняется в процессе выполнения итераций алгоритма.

Расширения *FCM*- и *GK*-алгоритмов (получаются *E-FCM*- и *E-GK*-алгоритмы) состоят в следующем [5].

В качестве прототипов кластеров используются объемные прототипы (*volume prototypes*). Объемный прототип является выпуклым и компактным подпространством пространства признаков. В частности, если в алгоритме *E-FCM* используется евклидова метрика, тогда таким прототипом будет гипершар с центром v_i и радиусом r_i для *i*-го кластера. Вектор признаков x_k, для которого расстояние $d_{ik}(x_k, v_i) \leq r_i$, является элементом объемного прототипа и входит в *i*-й кластер с членством 1,0. В алгоритме *E-GK* объемным прототипом кластера является гиперэллипсоид.

Мера расстояния, используемая в расширенных алгоритмах, определяется на основе исходной меры *d*. Для вектора x_k сначала вычисляется значение $d_{ik}(x_k, v_i)$, а затем расстояние до объемного прототипа берется равным $\tilde{d}_{ik} = \max(0, d_{ik} - r_i)$. Таким образом, векторы признаков, лежащие внутри объемного прототипа *i*-го кластера, имеют нулевое значение членства в других кластерах, что уменьшает влияние плотных областей в данных на центры других кластеров. Размеры объемных прототипов определяются на основе объемов кластеров.

Вводится понятие «сходства» (*similarity*) кластеров. Сходство кластеров определяется на основе нечеткой включающей меры. Для двух нечетких кластеров $u_i(x_k)$ и $u_j(x_k)$ нечеткая включающая мера определяется как

$$I_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \min(u_{ik}, u_{jk})}{\sum_{k=1}^{N} u_{ik}}.$$

Здесь *N* – число векторов признаков в наборе данных, u_{ik} – значение членства *k*-го вектора в *i*-м кластере. Включающая мера не является симметрической, но она используется для построения симметрической меры сходства нечетких кластеров $u_i(x_k)$ и $u_j(x_k)$:

$$S_{ij} = \max(I_{ij}, I_{ji}).$$

Начиная с заведомо большего числа кластеров, кластеры, степень сходства которых превышает заданный порог, объединяются в итерационном процессе кластеризации для того, чтобы получить подходящее разбиение данных.

Приведенные ниже рисунки демонстрируют процесс построения карты нечеткой кластеризации алгоритмом *E-FCM*. На рис. 1 приведен фрагмент изображения бассейна Обского водохранилища, полученного 19.04.2011 г. ИСЗ Terra (EOS AM-1), сканер Modis. Рис. 2 содержит изображения нечетких кластеров (всего их 2), соответствующих состоянию водно-ледового бассейна водохранилища. Заметим, что во входных данных было задано 7 кластеров, в результате работы алгоритма все векторы признаков были разбиты по двум кластерам. В качестве начального разбиения векторов признаков по нечетким кластерам используются выходные данные алгоритма *C*-средних.

Включение алгоритмов *E-FCM* и *E-GK* в состав программного комплекса по обработке спутниковых данных PlanetaMonitoring позволяет расширить возможности системы кластеризации комплекса по построению разбиения, наиболее полно соответствующего внутренней структуре данных.

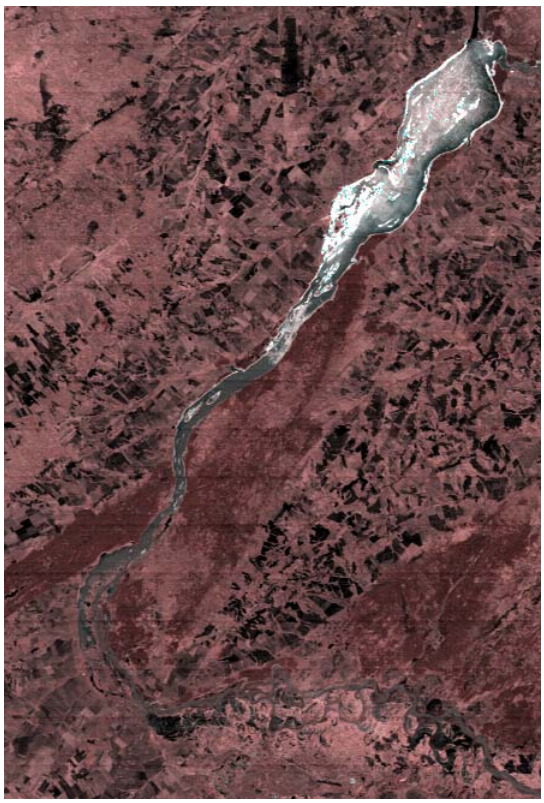


Рис. 1. Фрагмент изображения бассейна Обского водохранилища

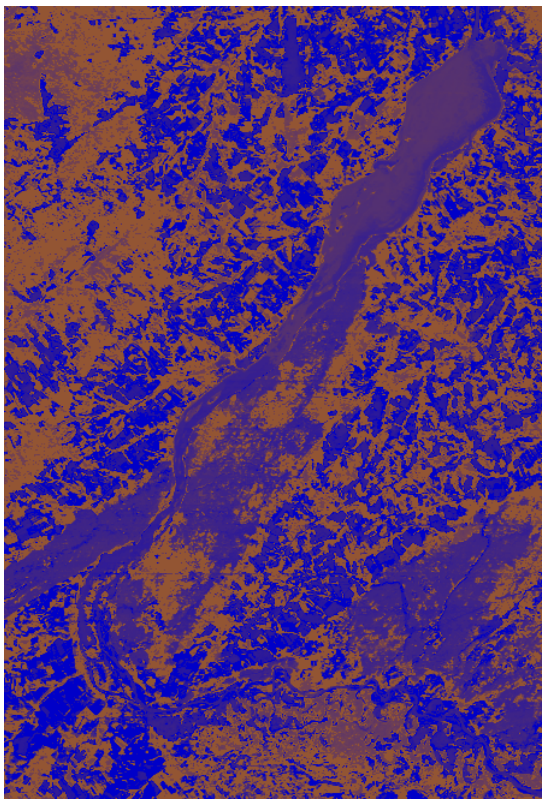


Рис. 2. Изображения нечетких кластеров

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

Список литературы

1. Асмус В.В. Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды: дисс. в виде науч. доклада на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. М., 2002. 75 с.

2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений; пер. с англ. М.: Техносфера, 2010.

3. Bezdek J.C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York, 1981.

4. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Жесткая и нечеткая кластеризация данных дистанционного зондирования Земли // Труды II Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск, 22–25 сент. 2015 г. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015.

5. Uzay Kaimak and Magne Setnes. Extended Fuzzy Clustering Algorithms. ERIM report series ERS-2000-51-LIS. Rotterdam, Netherlands, November 2000, 24 pp.

НОВЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

А. П. Гук[(1)], Л. Г. Евстратова[(2)]
[(1)]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
[(2)]ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»
e-mail: guk_ssga@mail.ru
e-mail: lge_21@mail.ru

NEW STATISTICAL APPROACH OF FOREST IMAGE RECOGNITION

A.P. Guk[(1)], I. G. Yevstratova[(2)]
[(1)]Sibirian state university of geosystem and technology(SSUGT)
[(2)]Moscow State University (MSU)
e-mail: guk_ssga@mail.ru
e-mail: lge_21@mail.ru

Описан новый метод распознавания объектов на снимках, основанный на непараметрическом статистическом методе. В качестве дешифровочного признака используется функция распределения плотности вероятностей яркостей элементов объекта, полученной по тестовым участкам с известными характеристиками определяемых параметров. Распознавание выполняется путем сравнения реальных характеристик с определяемыми. Приводятся практические примеры.

В докладе рассматривается новый статистический метод распознавания объектов на снимках, основанный на статистическим подходе, который базируется на использовании в качестве признака полной информации о вероятностной структуре объекта – функции плотности вероятностей яркостей элементов изображения.

Вероятностные методы широко применяются при распознавании образов на снимках, особенно при дешифрировании многоспектральных снимков. В этом случае в качестве признаков используются спектральные яркости объектов. Для распознавания конкретных объектов необходимо выбрать наиболее значимые признаки и знать их вероятностную структуру.

Выбор признаков выполняется в процессе обучения путем измерений значений яркостей известных опорных объектов, то есть объектов с известными характеристиками и выделенных на снимке.

Традиционный статистический подход, применяемый при распознавании объектов на изображении, использует метод максимального правдоподобия и его модификации. Для реализации этих методов необходимо знать статистические характеристики объектов. Однако, например, байесовский подход эффективен, когда признаки имеют нормальное распределение. Для этого случая введены эффективные критерии принятия решения и признаки разделимости объектов. Методы разработаны и для многомерных случаев, что весьма важно при обработке многоспектральных снимков. В то же время значительное увеличение количества признаков усложняет вычислительный процесс.

В докладе приводятся методы уменьшения количества признаков. Наиболее распространенные основаны на методах линейного преобразования пространства признаков в новые изображения, в которых признаки не коррелированы в той или иной степени. К этим методам относятся в первую очередь метод главных компонент, метод независимых компонент и разработанный специально для многоспектральных изображений метод Tesseld Cap. Причем критерий отбора признаков может быть

различным: значимыми критериями могут считаться признаки с максимальными, минимальными собственными значениями или некоторой линейной комбинацией собственных значений ковариационной матрицы измерений. Такой подход возможен, но достаточно трудоемок и позволяет выбрать признаки только для конкретного набора измерений, то есть на конкретном снимке должны быть тестовые участки.

В докладе приводятся результаты различных вариантов уменьшения количества признаков. Этот этап исследования важен для выбора каналов многоспектрального изображения, которое можно использовать для вычисления предлагаемого в данной работе признака – функции плотности распределения вероятности яркостей изображения.

Другим важным фактором при использовании предлагаемого метода является выделение однородных участков, которые в дальнейшем будут использованы для распознавания. Сегментация определяется рядом параметров, которые опять также задаются оператором. Были исследованы различные методы сегментации различных типов снимков, масштабов и других внешних условий съемки. Было установлено, что масштаб является основным фактором, влияющим на вид функции плотности распределения вероятностей яркостей объекта. Следовательно, эталонные функции плотности вероятностей должны быть определены для каждого масштаба и для каждого объекта. Учитывая, что набор объектов при определении таксационных параметров леса ограничен, а масштаб снимков зависит в основном от типа космической системы, количество используемых систем также ограничено, потребуется не такой уж большой размер исходных признаков-эталонов.

Собственно распознавание объектов на снимках будет содержать следующие этапы.

– Сегментация (автоматическая, полуавтоматическая или ручная) исходных снимков, выделение объектов для распознавания. Определение размера участков (количество элементов) для последующей оценки достоверности распознавания.

– Последовательное сравнение каждого из участков с эталоном (для определенного типа снимков). Вычисление критерия соответствия. В качестве критерия использовались отношение правдоподобия или корреляционная функция признаков объектов. Максимальное значение критерия являлось основанием совпадения объекта и эталона.

– На последнем этапе выполняется оценка достоверности распознавания.

Экспериментальные работы выполнялись по многоспектральным снимкам высокого разрешения Quik Bird, SPOT5, IKONOS. Снимки получены на различные типы лесных массивов, также использовались снимки специальных полигонов, на которых полевым методом получены таксационные характеристики леса. По эталонным участкам определены оптимальные каналы для распознавания и получены характеристики функции плотности распределения яркостей (ФПРВЯ). Для построения ФПРВЯ использовался гистограммный метод. Исследования результатов измерений показали устойчивость ФПРВЯ, кроме того, было изучено поведение этих функций и выделены наиболее информативные их части. Кроме того, выявлен весьма интересный факт – малые изменения имеют весьма существенное влияние на использование ФПРВЯ для распознавания объектов. Этот факт требует дальнейшего изучения и может быть положен в создание новых алгоритмов.

Рисунок, показывающий графики функции плотности вероятностей, поясняет эффективность метода. Действительно, при использовании стандартных методов функции плотности вероятностей, когда при получении решения эти функции аппроксимируются гауссовой кривой, все существенные особенности сглаживаются и, таким образом, теряется важная информация, что приводит к ошибочному решению. При исследовании метода было выявлено еще одно важное свойство: при построении

ФПРВЯ участка снимка можно выявить однородность исследуемого участка, построив ФПРВЯ для более мелких участков.

Практические результаты, выполненные по различным типам снимков, показали, что метод достаточно надежно позволяет определять тип деревьев, возраст, а также в ряде случаев и некоторые друге характеристики. Достоверность распознавания достигает 93 %.

Предлагаемый метод является площадным методом, основанным на сравнении с эталоном. Тем не менее есть принципиальное отличие.

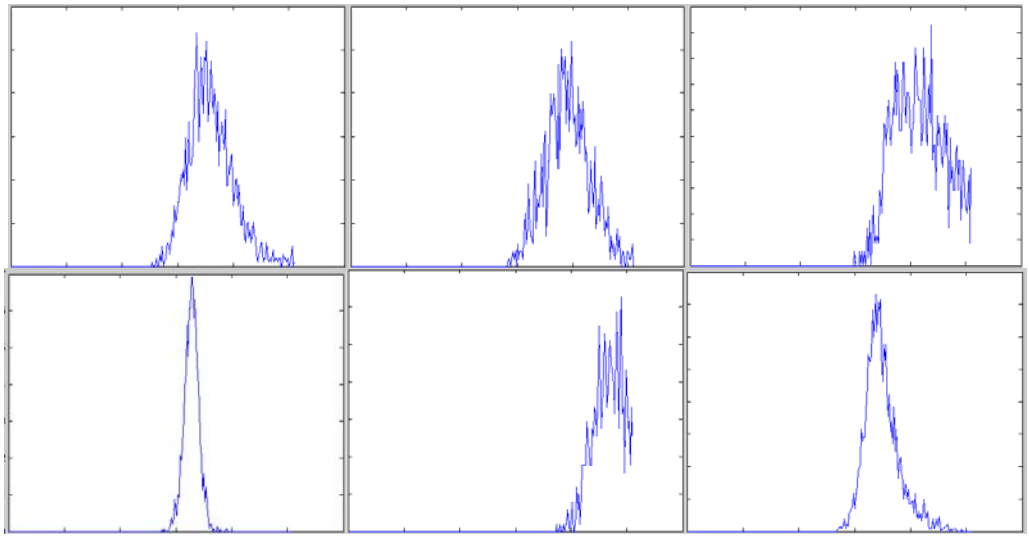


Рис. Графики функции плотности распределения яркостей некоторых типов леса

Таким образом, метод подтвердил свою работоспособность. Однако для практического применения метода необходимо провести дополнительные исследования.

Тем не менее, на наш взгляд, метод на настоящий момент является наиболее эффективным и нужно выполнять дальнейшие исследования в этой области и создавать банк данных для различных объектов и снимков. Практически это не потребует существенных материальных задач, как это кажется на первый взгляд. Целесообразно использовать предложенный метод в комплексных методах дешифрирования, а вспомогательный банк данных в любом случае повысит достоверность результата.

УДК 528.8.04, 528.88

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОРОДНОГО И ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ДРЕВОСТОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ САМОКОРРЕКТИРУЮЩИХСЯ КОДОВ

Е. В. Дмитриев[(1)], В. В. Козодеров[(2)], А. О. Дементьев[(1)], А. А. Соколов[(3)]
[(1)]ФГБУН «Институт вычислительной математики РАН»
e-mail: yegor@mail.ru
e-mail: adementyev@bk.ru,
[(2)]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
e-mail: vkozod@mail.ru
[(3)]Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère
Université du Littoral Cote d'Opale
e-mail: mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr

RECOGNITION OF FOREST SPECIES AND AGES USING ALGORITHMS BASED ON ERROR-CORRECTING OUTPUT CODES

E. V. Dmitriev[(1)], V. V. Kozoderov[(2)], A. O. Dementyev[(1)], A. A. Sokolov[(3)]
[(1)]Institute of Numerical Mathematics RAS
e-mail: yegor@mail.ru
e-mail: mailto:adementyev@bk.ru
[(2)]Lomonosov Moscow State University
e-mail: vkozod@mail.ru
[(3)]Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère
Université du Littoral Cote d'Opale
e-mail: mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr

Представлена базовая модель распознавания таксационных характеристик древостоев по спектральным признакам в проблеме обработки гиперспектральных авиационных изображений. Основу модели составляет алгоритм многоклассовой обучаемой классификации с использованием самокорректирующихся кодов. В качестве необходимого метода бинарной классификации используется метод опорных векторов. Описана методика использования выделов со смешанным породным составом для построения обучающего ансамбля. Приведен пример восстановления породного и возрастного состава для выбранного тестового участка по данным гиперспектральных измерений. Оценка точности восстановления породного состава соответствует точности наземных данных лесотаксации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спектральная классификация, гиперспектральные измерения.

Одной из важных задач современного управления лесным хозяйством является получение и актуализация данных лесотаксации и соответствующей картографической продукции. Основным и наиболее точным источником информации являются данные наземных обследований. Получение такого рода информации сопряжено с существенными временными затратами и финансовыми расходами. Таким образом, в последние годы активно развиваются дистанционные методы инвентаризации лесов. Существующая программа развития лесного хозяйства предполагает, что дистанционными методами будет получено порядка 80 % лесотаксационных данных. Для осуществления мониторинга растительного покрова обычно используются мультиспектральные и гиперспектральные аэрокосмические изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

Наибольшее количество приложений относится к обработке мультиспектральных изображений аппаратуры низкого и среднего пространственного разрешения (от 500 до 30 м). Значительная часть исследований идет по направлению создания и модификации вегетационных индексов, которые используются для изучения фотохимических процессов, связанных с фотосинтетической активностью и эффективностью использования света растением для оценки содержания пигментов в листьях. Несмотря на все усилия, возможности использования вегетационных индексов существенно ограничены. В ряде работ показано, что существующие индексы не являются однозначной мерой содержания пигментов и далеко не всегда чувствительны к параметрам, описывающим состояние растительности.

С увеличением пространственного и спектрального разрешения аппаратуры аэрокосмического зондирования возникла задача сегментации крон отдельных деревьев и точной классификации пород. Пространственное разрешение космических гиперспектрометров в связи с техническими ограничениями не превышает 30 м. Для получения более детальной региональной информации применяют гиперспектрометры, установленные на воздушные летательные аппараты. Относительно низкая высота полета (обычно 1–2 км) обеспечивает возможность совмещения высокого пространственного и спектрального разрешения и позволяет существенно уменьшить искажающее влияние атмосферы.

В рамках данной работы рассматривается задача распознавания породного и возрастного состава древостоев на основе гиперспектральных изображений на территории Савватьевского лесничества (Тверской лесхоз), полученных в августе 2011 г. в ходе кампании авиационных измерений с помощью отечественной гиперспектральной аппаратуры производства НПО Лептон (г. Зеленоград, г. Москва). Используемый гиперспектрометр АВ-ВД имеет полосу захвата в 500 пикселей и позволяет получать изображения в 287 спектральных каналах в диапазоне 401–1017 нм. Спектральное разрешение каналов редуцируется до 5 нм, что соответствует 87 объединенным каналам. Полет проходил на высоте около 2 км, таким образом, пространственное разрешение поперек траектории полета составляет 1,1 м. Породный состав леса на тестовой территории представлен древостоями сосны, березы, осины и ели. Более подробное описание указанной измерительной кампании приводится в работе [1].

Для решения задачи распознавания породного и возрастного состава древостоев применялся алгоритм обучаемой классификации, основанный на технике самокорректирующихся кодов [2]. Данная методика использует некоторые положения из теории кодирования информации для формализации объединения бинарных классификаторов в многоклассовый.

Пусть $x \in R^M$ – признаки классов, а $y \in R^1$ – наименования классов. Введем матрицу $C = \left(c_{ij}\right)$ (в дальнейшем будем называть ее «кодовой матрицей»), столбцы которой соответствуют различным способам обучения некоторого бинарного классификатора (или, лучше сказать, некоторым задачам бинарной классификации, построенным на основе имеющихся классов), а строки – распознаваемым классам. Элементы матрицы принимают значения: «1» – объект, «–1» – альтернатива, «0» – прочие объекты, не участвующие в классификации. Таким образом, каждому классу ставится в соответствие некоторый код (строка матрицы C). В связи с этим при построении матрицы C имеют место следующие ограничения:

– допустимые значения элементов только числа –1, 0 и 1;

– каждый столбец содержит как минимум один элемент 1 и один элемент –1;

– все различные векторы-столбцы не лежат на одной прямой;

– все различные векторы-строки не совпадают;

– для любых двух классов должен существовать столбец, в котором эти классы разделяются.

Пусть у нас имеется некоторое обучающее множество из N пар элементов x_i и y_i, $(i = 1,...,N)$ и ставится задача классифицировать новое измерение x. Для используемого бинарного классификатора введем функцию $s(x)$, определяющую вычисление баллов для измерения x в соответствии с рассматриваемой бинарной задачей. Обычно $s(x)$ указывает на удаленность измерения x от дискриминантной поверхности в область класса 1. Введем также функцию потерь $g(y_k, s(x))$ для некоторого класса y_k из исходного списка. Тогда можно построить многоклассовый алгоритм классификации, который будет иметь следующий вид

$$a(x) = \arg\min_{y_k} \frac{\sum_{j=1}^{L} \left| c_{kj} \right| g(y_k, s_j(x))}{\sum_{j=1}^{L} \left| c_{kj} \right|},$$

где L – число используемых способов обучения бинарного классификатора (столбцов кодовой матрицы). Таким образом, для заданного измерения x выбирается класс, соответствующий минимальным в среднем потерям.

Результат данного алгоритма будет зависеть от выбора кодовой матрицы. Так, например, матрица

$$C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

будет соответствовать известной стратегии «один против всех» применительно к задаче распознавания некоторых трех классов, а матрица

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

будет в той же задаче соответствовать стратегии «каждый против каждого». Одним из перспективных подходов к построению оптимальных кодовых матриц является метод случайных матриц, который состоит в следующем. Выбирается число L (обычно пропорционально логарифму числа классов) и случайным образом генерируется большое число кодовых матриц в соответствии с указанными выше правилами. Из полученных матриц выбирается такая, которая имеет максимально большое минимальное попарное расстояние между строками в смысле метрики Хемминга, т. е.

$$D(k_1, k_2) = 0.5 \sum_{j=1}^{L} \left| c_{k_1 j} \right| \left| c_{k_2 j} \right| \left| c_{k_1 j} - c_{k_2 j} \right|.$$

В настоящей работе в качестве бинарного классификатора выбран нелинейный метод опорных векторов (МОВ). Линейный МОВ позволяет найти максимально удаленные параллельные гиперплоскости, разделяющие заданную пару классов, проходящие через область граничных точек (опорных векторов) распределения

признаков этих классов. Если уравнения разделяющих гиперплоскостей представить как $(w, x_i) - w_0 = y_i$, то оптимизационная задача МОВ с «мягким» зазором может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(w,w) + C\sum_{i=1}^{N} \xi_i \to \min\limits_{w, w_0, \xi} \\ y_i((w, x_i) - w_0) \geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, \ldots, N \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{1}{2}(w,w) + C\sum_{i=1}^{N} \xi_i \to \min\limits_{w, w_0, \xi} \\ y_i((w, x_i) - w_0) \geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, \ldots, N, \end{cases}$$

где параметры $\xi_i \geq 0$ представляют собой штрафы за ошибочную классификацию граничных точек. Алгоритм линейного МОВ имеет вид

$$a(x) = sign\left(\sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i (x_i, x) - w_0 \right).$$

Обучение состоит в получении оценок параметров λ (или связанного с ним w) и w_0. МОВ легко обобщается на случай нелинейных разделяющих поверхностей с помощью преобразования скалярного произведения на $K(x, y)$. В этом случае алгоритм классификации имеет вид

$$a(x) = sign\left(\sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i K(x_i, x) - w_0 \right).$$

В данной работе используется гауссовское ядро $K(a,b) = \exp\left(-\frac{\|a-b\|^2}{2\sigma^2} \right)$.

В качестве функции баллов бинарного МОВ используется

$$s(x) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i K(x_i, x) - w_0,$$

а в качестве функции потерь

$$g(y, x) = \max\{0, 1 - y \cdot s(x)\} / 2.$$

Признаковое пространство было редуцировано в соответствии с методикой и результатами отбора наиболее информативных спектральных каналов, представленных в работе [3].

Указанная методика была отработана на тестовом участке, расположенном на территории Савватьевского лесничества вблизи Красногорского песчаного карьера. Имеющаяся наземная информация по распределению породного и возрастного состава представлена стандартными табличными и картографическими данными лесотаксации. Для построения обучающего ансамбля в первую очередь использовались однородные древостои с сомкнутым пологом. Однако такие участки можно найти не для всех имеющихся пород и возрастов. Для расширения обучающего набора данных мы использовали также выделы со смешанным породным и возрастным составом древостоев.

Использовались выделы с преобладанием интересующей нас породы и наличием в субдоминанте пород деревьев с существенно отличающимися от основной породы спектрами отражения. Данные ограничения накладывались для уменьшения вероятности попадания в обучающую выборку не соответствующих ей элементов. Исключение граничных пикселей и пикселей с малыми значениями индекса NDVI

также позволило нам уменьшить ошибки из-за привязки аэрофотоснимков к лесотаксационным картам, исключить из обучающей выборки пиксели других пород и прочих объектов (водоемы, дороги, дома и т. д.). Для выбора таких участков использовались карта лесотаксации Савватьевского лесничества и спутниковые изображения высокого разрешения, на которых видны характерные тени и силуэты древостоев. Для улучшения вводилась дополнительная априорная информация о характерных размерах и спектрах отражения (в диапазоне от 400 до 100 нм) крон произрастающих на территории данного лесничества пород деревьев на основе обучающих выборок, сделанных на чистых выделах Савватьевского лесничества и базе данных по спектрам природных объектов (http://gis-lab.info/).

Изображения лесного полога имеют характерную текстуру, которую составляют перемежающиеся освещенные и затененные участи крон, а также межкроновые просветы. Спектральные характеристики указанных элементов, как правило, существенно различаются. Освещенные и затененные участки кроны могут быть разделены на основе значений интегральной яркости. Для полученных обучающих выборок были рассчитаны интегральные яркости и разделены на три градации с помощью процентных интервалов. Таким образом, участки лесного полога были разделены на освещенные, полуосвещенные и затененные.

Результаты обработки гиперспектрального изображения тестового участка приведены на рис. 1. Пространственное распределение основных типов объектов представлено на рис. 1, *а*. Белыми линиями обозначены границы выделов, а белые цифры внутри выделов означают их номера. На рис. 1, *б* показаны результаты распознавания породного состава на основе описанной выше методики. Ошибка классификации породного состава с учетом упомянутых выше градаций освещенности лесного полога вычислялась по формуле

$$\varepsilon(i) = \sqrt{\frac{(p(i)_{pine} - \hat{p}(i)_{pine})^2 + (p(i)_{birch} - \hat{p}(i)_{birch})^2}{2}},$$

где i – номер єсоответствующего выдела; p_{pine} и p_{birch} – проценты содержания сосновых и березовых пород в данном выделе в соответствии с данными лесотаксации; $\hat{p}_{pine}$ и $\hat{p}_{birch}$ – процентные содержания пород, полученные по результатам распознавания.

Оценки ошибок восстановления породного состава в выделах представлены на рис. 2. Черная кривая (расположенная ниже других) представляет естественный уровень ошибок, возникающий из-за наличия граничных пикселей. На рисунке представлены ошибки для освещенных, полуосвещенных и полностью затененных частей лесного полога, а также общая ошибка. Можно видеть, что выделам с преобладанием березы соответствуют большие ошибки. Также мы можем видеть присутствие осиновых древостоев в 16-м выделе, информация о которых отсутствует в данных лесотаксации. Общая ошибка для рассматриваемой сцены, с учетом площади соответствующих выделов, может быть представлена как

$$\varepsilon_{total} = \sum_{i=1}^{18} \varepsilon(i) W(i),$$

где $W(i) = \dfrac{\text{Площадь выдела } i}{\text{Общая площадь выделов}}$ – весовые коэффициенты. Общая средневзвешенная ошибка составляет 9,1 %, для затененных частей – 9,3 %, для

полуосвещенных – 11 % и для полностью освещенных – 8 %. Пиксели, ошибочно классифицированные как осина, составляют 0,9 % от общего числа пикселей, соответствующих древостоям. Полученные оценки ошибок восстановления породного состава смешанных древостоев по результатам классификации соответствуют ошибкам данных лесотаксации.

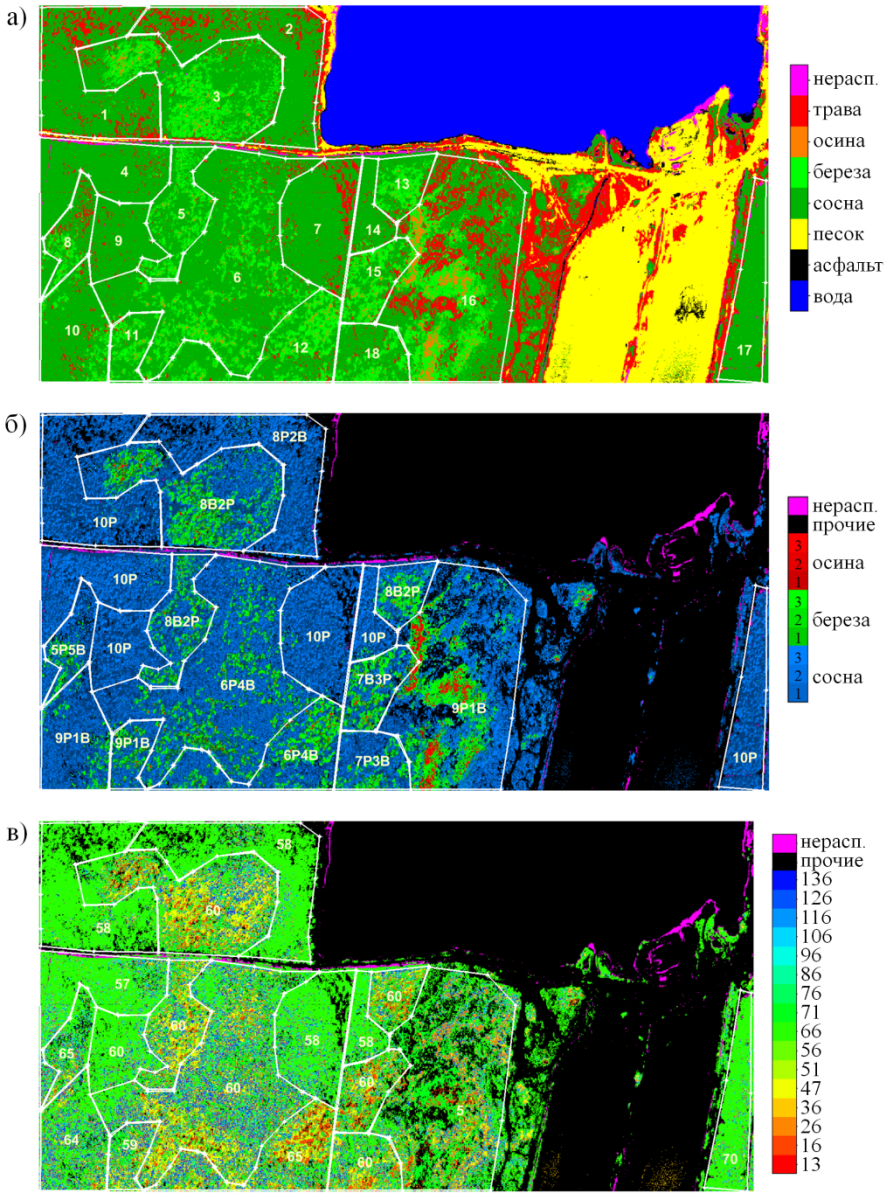


Рис. 1. Результаты классификации: а) базовые классы, цифрами обозначены номера выделов; б) породный состав (с учетом градаций освещенности лесного полога), внутри выделов обозначен породный состав согласно данным лесотаксации, Р – сосна, В – береза; в) возрастной состав, цифрами обозначены средние возраста

Результаты распознавания возрастного состава, представленные на рис. 1, *с*, в существенно меньшей степени соответствуют данным лесотаксации, чем в случае распознавания породного состава. Так, в частности, распознаваемый возраст древостоев, соответствующих выделам 4, 7 и 9, имеет небольшой разброс и соответствует указанному в данных наземных измерений, однако, с другой стороны, для смешанных древостоев, например выделы 6, 8, 10–12, характерны большой разброс

и завышение возраста для пикселей, классифицированных как сосна. Соотношение возрастов березовых древостоев можно представить следующим образом: 23 % пикселей соответствует березе в возрасте 16 лет, 19 % – возрасту 51 год и 58 % – возрасту 71 год. Таким образом, имеет место недооценка приспевающих березовых древостоев и переоценка спелых.

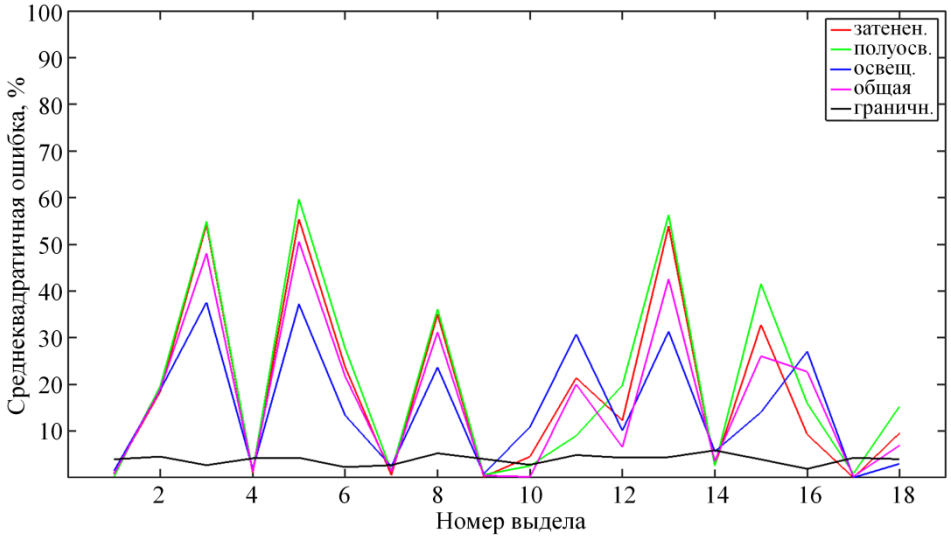


Рис. 2. Ошибка классификации для различных выделов с учетом градаций освещенности лесного полога

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-00007) и РФФИ (проекты № 14-05-00598 и 14-07-00141).

Список литературы

1. Дмитриев Е.В. Классификация лесного покрова Тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.

2. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes // Journal of Articial Intelligence Research. 1995. V. 2. P. 263–286.

3. Retrieval of forest stand attributes using optical airborne remote sensing data / V.V. Kozoderov, T.V. Kondranin, E.V. Dmitriev, A.A. Sokolov // Optics Express. 2014. V. 22. № 13. P. 15410–15423.

УДК 528.8.04, 528.88

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Е. А. Лупян, И. В. Балашов, М. А. Бурцев, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий,
Д. А. Кобец, Ю. С. Крашенинникова, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров, А. А. Прошин,
И. Г. Сычугов, В. А. Толпин, И. А. Уваров, Е. В. Флитман
Институт космических исследований РАН
E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

NEW IN DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS DESIGN TECHNOLOGIES

E. A. Loupian, I. V. Balashov, M. A. Burtsev, V. Yu. Efremov, A. V. Kashnitsky,
D. A. Kobets, Yu. S. Krasheninnikova, A. A. Mazurov, R. R. Nazirov, A. A. Proshin,
I. G. Sychugov, V. A. Tolpin, I. A. Uvarov, E. V. Flitman
Space Research Institute (IKI), Moscow
E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

В настоящее время возможности спутниковых систем наблюдения Земли используются для решения достаточно большого числа научных и прикладных задач. В последние годы одной из наиболее значимых сфер их применения стало создание различных специализированных информационных систем дистанционного мониторинга, ориентированных на постоянное получение информации о различных процессах, явлениях и объектах.

В настоящей работе на основе опыта, накопленного в ИКИ РАН, анализируются основные особенности и тенденции развития современных систем дистанционного мониторинга. Обсуждаются особенности построения основных блоков и подсистем. Сформулированы возможности использования современных технологий для их построения. В работе также представлены текущие возможности разработанных в ИКИ РАН технологий, ориентированных на создание различных элементов современных систем дистанционного мониторинга. Представляемые технологии используются во многих системах дистанционного мониторинга, эксплуатирующихся в настоящее время в России.

Ключевые слова: автоматизированные информационные системы, спутниковые системы наблюдения Земли, системы мониторинга, технологии автоматизированной обработки данных, данные дистанционного зондирования, распределенные информационные системы, сверхбольшие архивы данных.

Введение

Развитие в последние десятилетия возможностей информационных технологий, компьютерных, коммуникационных и спутниковых систем позволило начать создание и достаточно широкое внедрение различных систем дистанционного мониторинга (СДМ) различных явлений, объектов и ресурсов. При этом в последние годы происходил быстрый, практически взрывной рост возможностей спутниковых систем наблюдения Земли, в том числе объемов и частоты поступающей от них информации [1, 2], который потребовал создания новых подходов и методов организации работы с данными дистанционного зондирования (ДЗЗ) [3] и развития технологий построения СДМ.

Работы по созданию таких технологий в России активно ведутся в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) начиная с середины девяностых годов прошлого века. Основные возможности созданных ИКИ РАН технологий представлялись нами в различных публикациях. Обзор их основных

элементов представлен, в частности, в работах [4, 5]. Следует отметить, что с использованием данных технологий сегодня создано и развивается более десятка крупных СДМ [6–11].

Основные изменения в сфере работы с данными ДЗЗ, влияющие на создание и эксплуатацию СДМ, произошедшие в последние годы

Для того чтобы оценить основные направления развития СДМ в последние годы, следует сначала остановиться на кратком обсуждении основных изменений, которые, на наш взгляд, произошли в области, связанной с использованием данных спутникового дистанционного зондирования при решении различных научных и прикладных задач. На наш взгляд, наиболее важными изменениями, которые существенно влияют на технологии создания и использования СДМ, являются следующие:

- Как уже отмечалось, произошли резкие изменения в возможностях спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В первую очередь, за счет увеличения числа космических аппаратов ДЗЗ выросли частота и объемы информации, которая может поступать в СДМ. Это привело к тому, что стало возможно организовывать мониторинг процессов, протекающих достаточно быстро.
- Также возросло число спутниковых систем ДЗЗ, обладающих «измерительными» свойствами, т. е. обеспечивающих получение не только качественной, но и хорошо калиброванной количественной информации о различных объектах, процессах и явлениях. Это позволило не только использовать данные ДЗЗ для качественной оценки ситуации, но и получать на их основе количественные оценки и строить прогнозы развития различных процессов и явлений, необходимых, в частности, для оперативной реакции на них.
- Повысился уровень доступности информации. Данные многих спутниковых систем стали свободно распространяться. Это позволило начать массово использовать их в различных СДМ без существенных финансовых затрат. Поэтому естественно, что во многих случаях стало более рентабельно создавать СДМ, чем развивать наземные и авиационные системы наблюдения.
- Рост объемов спутниковой информации и развитие требований и стоимости систем их приема и первичной обработки привели к усилению наблюдающейся с начала этого столетия тенденции перехода от использования локальных систем приема к услугам по получению информации из крупных специализированных центров.
- Доступность информации ДЗЗ и рост ее объемов привели к необходимости существенно улучшить технологии работы с данными ДЗЗ в ряде различных аспектов, в том числе в плане повышения уровня автоматизации процессов получения и обработки данных, оптимизации ведения собственных архивов данных и использования возможностей внешних систем, обеспечивающих ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и предоставляющих различные вычислительные ресурсы для работы с ними.
- Необходимость оптимизации систем обработки данных в различных СДМ привела к тому, что в конкретной системе стало невыгодно создавать и поддерживать весь цикл обработки данных. В первую очередь это коснулось проведения стандартной первичной обработки и формирования базовых информационных продуктов [3, 12, 13], для производства которых уже сейчас требуются значительные вычислительные ресурсы. Это, в свою очередь, привело к тому, что многие СДМ стали в основном ориентироваться на получение достаточно стандартизованных, стабильных, хорошо откалиброванных и привязанных базовых продуктов.
- Появились новые технологические возможности, позволяющие организовать принципиально новые схемы работы с данными, в том числе эффективно работать с распределенными сверхбольшими архивами и различными вычислительными ресурсами.

- Существенное расширение задач, решаемых системами мониторинга, и числа задействованных в их работе специалистов потребовало создания новых доступных инструментов работы со спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на их основе, позволяющими использовать в том числе и возможности различных распределенных вычислительных ресурсов.

Обобщенная схема организации работы с данными в современных системах дистанционного мониторинга

В настоящее время общая схема организации процессов обработки данных ДЗЗ (жизненный цикл) является достаточно устоявшейся. В соответствии со своим жизненным циклом спутниковая информация проходит сложившиеся основные блоки процедур обработки и анализа данных (прием, архивацию, первичную и тематическую обработку и т. д.), состав которых практически не меняется в последние годы. В то же время, если на первых этапах развития СДМ при построении конкретной системы в ней приходилось реализовывать все этапы обработки данных ДЗЗ и полностью создавать для этого специальную инфраструктуру, то появившиеся в настоящее время возможности позволяют этого избежать. Кроме того, как уже отмечалось, появились возможности задействовать в интересах конкретной системы различные «внешние» информационные и вычислительные ресурсы.

Основной особенностью данной схемы является то, что в интересах СДМ создаются и поддерживаются только те блоки, которые обеспечивают работу с данными ДЗЗ для решения специальных задач, характерных для конкретной системы. В этом случае в СДМ нет необходимости дублировать информационные и технические возможности центров сбора, обработки, архивации и распространения спутниковой информации. Имеющиеся сегодня технологии позволяют эффективно задействовать ресурсы таких центров для решения задач построения различных блоков и подсистем конкретной СДМ. Все это позволяет упростить процессы создания и поддержки СДМ и сделать их менее ресурсоемкими. При таком подходе в интересах конкретной СДМ создаются следующие основные блоки и подсистемы:

- подсистема обработки данных;
- подсистема ведения архивов данных;
- подсистема представления и анализа данных;
- блок управления и контроля работоспособности.

Базовые элементы технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга, созданные в ИКИ РАН

В ИКИ РАН более пятнадцати лет ведутся работы по созданию технологий, позволяющих унифицированным образом создавать различные СДМ. Для решения таких задач были созданы следующие базовые технологии:

- технология, обеспечивающая автоматизированный прием и/или получение спутниковых данных из специализированных центров;
- технология автоматизированного ведения архивов спутниковых данных;
- технология автоматизированной обработки спутниковых данных;
- технология представления спутниковых данных и результатов их обработки пользователям;
- технология контроля и управления различными элементами систем дистанционного мониторинга.

Список литературы

1. Budget Activity: National Environmental Satellite, Data, and Information Service. 2012. http://www.corporateservices.noaa.gov/nbo/fy13_presidents_budget/7_NESDIS.pdf

2. Ramapriyan H.K. Development, Operation and Evolution of EOSDIS – NASA's major capability for managing Earth science data. Presented at CENDI/NFAIS Workshop on Repositories in Science & Technology: Preserving Access to the Record of Science November 30. 2011.

3. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач / Е.А. Лупян, В.П. Саворский, Ю.И. Шокин, А.И. Алексанин, Р.Р. Назиров, И.В. Недолужко, О.Ю. Панова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21–44.

4. Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач / Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, Р.Р. Назиров, А.А. Прошин, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 81–88.

5. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, Р.Р. Назиров, А.А. Прошин, Е.В. Флитман, Ю.С. Крашенинникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.

6. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) / С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Г.Н. Коровин, Р.В. Котельников, Е.А. Лупян, В.Е. Щетинский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.

7. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.

8. Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» / В.Ю. Ефремов, О.А. Гирина, Л.С. Крамарева, Е.А. Лупян, А.Г. Маневич, Д.В. Мельников, А.М. Матвеев, А.А. Прошин, А.А. Сорокин, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155–170.

9. Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана / Е.А. Лупян, А.М. Матвеев, И.А. Уваров, Т.Ю. Бочарова, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–262.

10. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «ПЛАНЕТА» / Е.А. Лупян, О.Е. Милехин, В.Н. Антонов, Л.С. Крамарева, М.А. Бурцев, И.В. Балашов, В.А. Толпин, В.И. Соловьев // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97.

11. Перспективы комплексного использования современных спутниковых, информационных и коммуникационных технологий для решения задач отраслевой системы мониторинга рыболовства / В.В. Марченков, В.Н. Пырков, В.Н. Черных, А.В. Солодилов, В.В. Ермаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 299–306.

12. Asrar G., and Greenstone R., 1995. MTPE EOS Reference Handbook. NASA Goddard Space Flight Cente.

13. Interoperable Catalogue System Valids, CEOS/WGISS/ICS/Valids, Issue: 1.2, April 2005, 55 p.

УДК 528.854.2; 004.93'11

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ

П. В. Мельников, И. А. Пестунов, С. А. Рылов
Институт вычислительных технологий СО РАН
e-mail: pvlvlml@gmail.com
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru
e-mail: rylovs@mail.ru

EXPERIMENTAL COMPARISON OF SPECTRAL-SPATIAL CLASSIFICATION METHODS OF HIGH SPATIAL RESOLUTION HYPERSPECTRAL IMAGES

P. V. Melnikov, I. A. Pestunov, S. A. Rylov
Institute of Computational Technologies of SB RAS
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

В докладе рассматриваются три метода классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения: 1) попиксельная классификация с последующей фильтрацией получаемой картосхемы, 2) спектрально-текстурная классификация на основе геометрических моментов и 3) спектрально-текстурная классификация на основе предварительной сегментации. Приводятся результаты экспериментального сравнения указанных методов на данных, полученных с помощью авиационного гиперспектрометра.

Ключевые слова: гиперспектральное изображение, локальный контекст, спектрально-текстурная классификация.

Введение. В области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли наблюдается активное внедрение гиперспектральных систем, обеспечивающих съемку в видимом и инфракрасном диапазонах спектра [1, 2]. Поэтому в настоящее время появились потенциальные возможности использования высокоинформативных гиперспектральных изображений (ГСИ) для решения широкого круга научных и практических задач. Однако существенным сдерживающим фактором для реализации этих возможностей является отсутствие приемлемого инструментария для их автоматизированного анализа.

К главным особенностям ГСИ относятся высокое спектральное разрешение (порядка нескольких нанометров) и большое количество (до нескольких сотен) спектральных каналов, что порождает так называемую проблему «проклятия размерности», из-за которой многие традиционные классификаторы становятся непригодными. Кроме того, попиксельная классификация ГСИ высокого пространственного разрешения часто приводит к получению шумовых картосхем, которые практически не поддаются интерпретации [3].

В данном докладе приводятся результаты экспериментального сравнения трех методов классификации ГСИ, учитывающих как спектральные, так и пространственные признаки: 1) попиксельная классификация с последующей фильтрацией получаемой картосхемы, 2) спектрально-текстурная классификация на основе геометрических моментов и 3) спектрально-текстурная классификация на основе предварительной сегментации. Для экспериментов использовались два изображения, полученные

в 2011 г. с помощью авиационного гиперспектрометра, разработанного НПО «Лептон» (г. Зеленоград) [4]. Перед классификацией производится выделение некоррелированных систем спектральных признаков с помощью метода главных компонент (МГК) и его модификации – метода минимизации шумовых помех (Minimum Noise Fraction, MNF) [5]. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при обработке гиперспектральных данных и позволяют на порядок сократить число спектральных признаков, не ухудшая при этом качества классификации [6].

Описание методов классификации ГСИ

Первый метод классификации, использованный в экспериментах, подробно описан в работе [6]. Он заключается в попиксельной классификации ГСИ и последующей фильтрации полученной картосхемы с помощью мажоритарного фильтра (МФ). При применении этого фильтра каждому обрабатываемому пикселю присваивается номер того класса, к которому принадлежит большинство пикселей в некоторой заданной его окрестности. Для попиксельной классификации использовался метод максимального правдоподобия (ML) и метод опорных векторов (SVM).

Второй и третий методы классификации основаны на использовании информации о текстуре изображения. Единого определения текстуры в настоящее время не существует. Применительно к мульти- и гиперспектральным изображениям текстуру можно интерпретировать как характер распределения векторов спектральных яркостей по области изображения объекта, обусловленный взаимным закономерным расположением неоднородных составляющих объект элементов.

Второй метод классификации заключается в выделении текстурных признаков с использованием геометрических моментов и последующей классификацией полученных векторов признаков. Геометрические моменты широко применяются для определения текстурных характеристик объектов на полутоновых изображениях [7]. Геометрический момент $m_{p,q}$ порядка p,q для цифрового изображения $I(i,j)$ размером $M \times N$ определяется как $m_{p,q} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} i^p j^q I(i,j)$. При текстурном анализе геометрические моменты вычисляются не по всему изображению, а по окну размером $l \times l$ с центром в рассматриваемом пикселе. Для гиперспектральных изображений вычисление моментов для нескольких наборов p,q существенно увеличивает число признаков, тем самым только усугубляя проблему «проклятия размерности». Поэтому в данной работе использовался только один момент $m_{0,0}$, представляющий собой сумму значений спектральных яркостей пикселей в окне размером $l \times l$ (при этом для каждого пикселя текстурный признак определялся по формуле $Avg(i,j) = m_{0,0}(i,j) \big/ l^2$. Как и в первом методе, классификация по полученному набору признаков выполнялась с помощью методов ML и SVM.

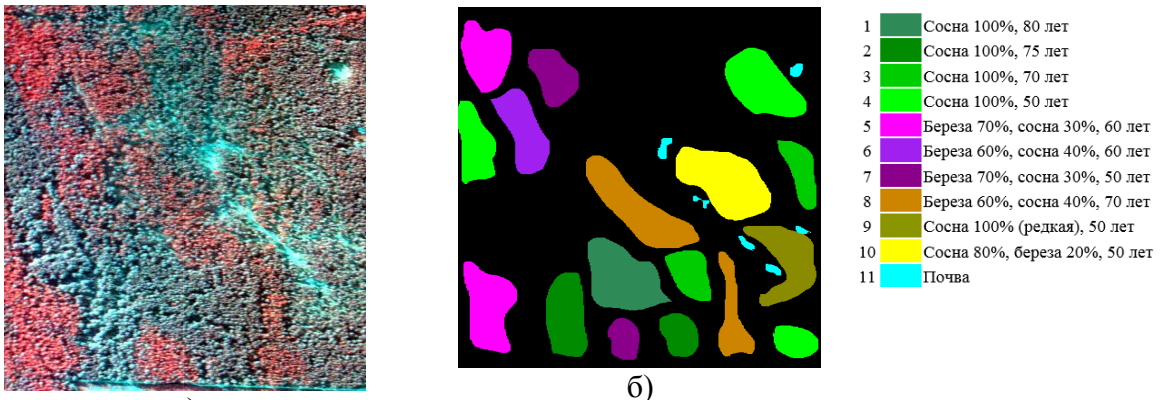
Третий метод классификации описан в работе [8] и основан на предварительной сегментации ГСИ по спектральным признакам. Основная идея этого метода заключается в следующем. Если произвести кластеризацию пикселей текстурного изображения только по спектральным признакам, то ее результат будет представлять чрезмерно раздробленную шумовую картину. Но в заданной локальной области изображения для текстур одного и того же типа процентное содержание пикселей из разных кластеров будет примерно одинаково, а для текстур разных типов будет отличаться. Эта закономерность справедлива для большинства текстур, соответствующих объектам природного происхождения (например, лесным, болотным,

тундровым, дюнным и другим ландшафтам). Такой подход успешно применялся для текстурной сегментации мультиспектральных изображений на основе сеточных алгоритмов кластеризации [9]. Достоинство данного метода заключается в том, что для него не требуются обучающие выборки большого объема, достаточно задать всего несколько представителей для каждого класса.

Результаты экспериментальных исследований

В экспериментах использовались два изображения размером 600×420 и 1000×350 пикселей, содержащих по 87 спектральных каналов в диапазоне 404–1016 нм. RGB-композиты исходных изображений приведены на рис. 1, *а* и 2, *а*. Пространственное разрешение составляло приблизительно 1 м. На изображениях представлены участки Савватьевского лесничества в Тверской области.

Для этих изображений имелись эталонные картосхемы, полученные по результатам наземных лесотаксационных обследований. На картосхемах был представлен видовой и возрастной составы лесных выделов. К моменту съемки картосхемы значительно устарели, поэтому специалистами было выполнено их уточнение при помощи визуального анализа изображений (рис. 1, *б* и 2, *б*). Сомнительные пиксели на границах классов были отнесены к фону (на рисунке выделены черным цветом) и при оценке точности классификации не учитывались.



а) б)

Рис. 1. RGB-композит (каналы 81, 19, 10) (а) и эталонная картосхема (б) изображения 1

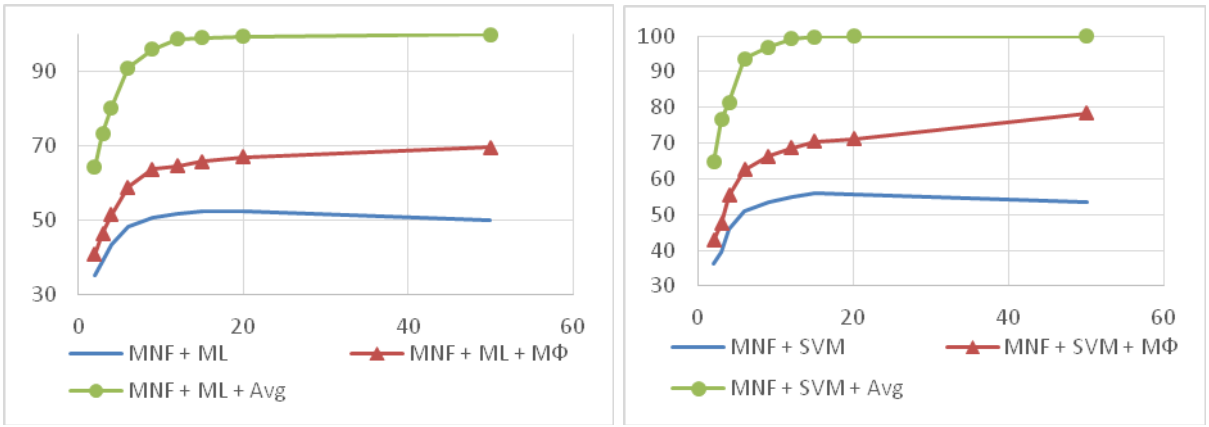
Для оценки качества классификации использовались контрольные выборки. Обучающие выборки включали по 1000 случайно выбранных точек каждого класса. Результаты классификации усреднялись по пяти независимым запускам процедуры. Для мажоритарного фильтра (МФ) использовалось окно размером 5×5 пикселей, а для вычисления признака Avg – размером 21×21 пикселей.

Результаты классификации изображений с использованием различных наборов признаков и методов классификации представлены на рис. 3 и 4. Для сравнения, на рисунках приведены также графики точности попиксельной классификации по спектральным признакам. Точность спектрально-текстурной классификации изображения 2 на основе предварительной сегментации представлена на рис. 5. В качестве признаков использовались четыре главные компоненты.

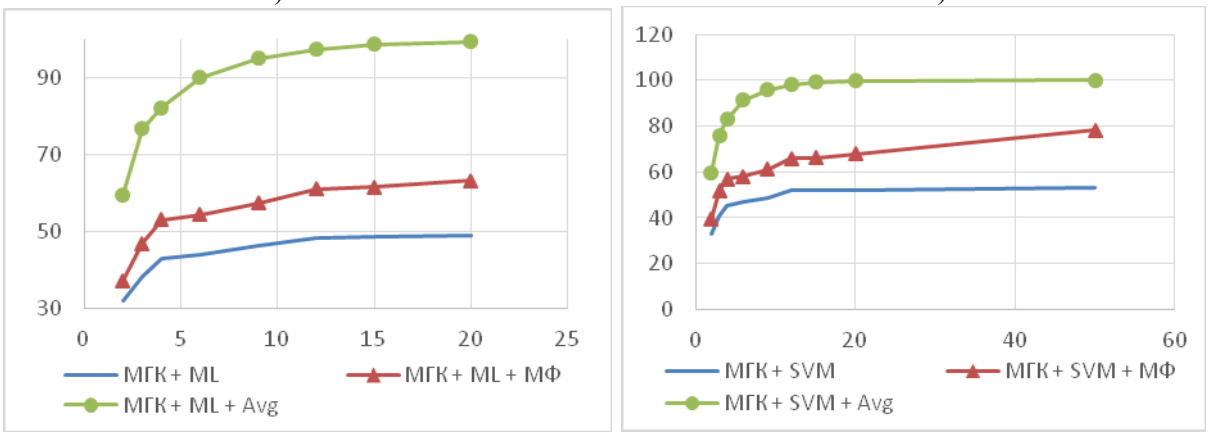


а) б)

Рис. 2. RGB-композит (каналы 81, 19, 10) (а) и эталонная картосхема (б) изображения 2



а) б)



в) г)

Рис. 3. Точность классификации (%) изображения 1 с использованием различных наборов признаков и методов классификации в зависимости от числа признаков

Анализ результатов показывает, что учет пространственной информации позволяет достичь существенного улучшения качества классификации (на 5–50 %) по сравнению со спектральной попиксельной классификацией. Наилучший результат обеспечивает классификация на основе геометрических моментов, для тестовых изображений качество классификации приближается к 100 %.

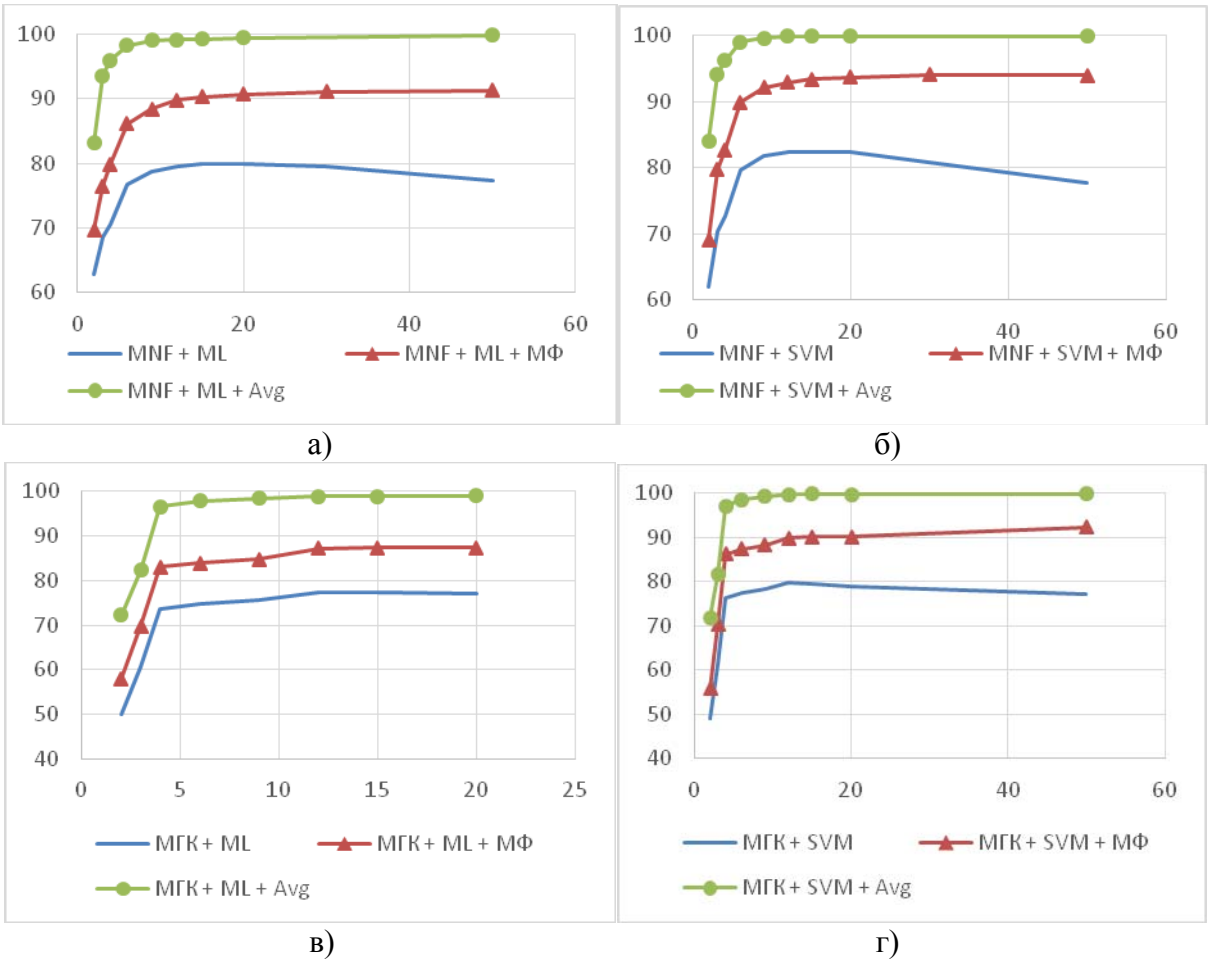


Рис. 4. Точность классификации (%) изображения 2 с использованием различных наборов и методов классификации в зависимости от числа признаков

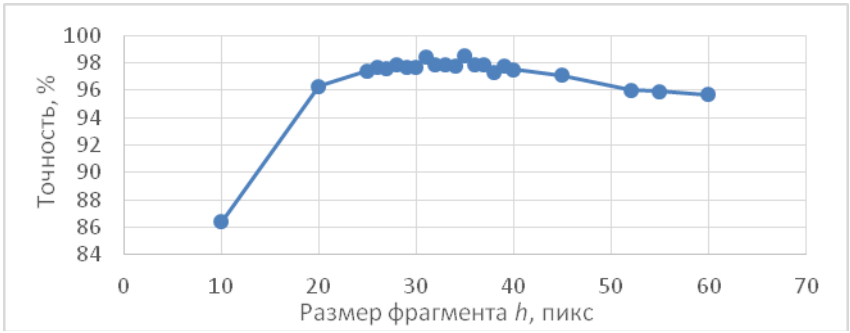


Рис. 5. Точность спектрально-текстурной классификации изображения 2 на основе предварительной сегментации

Таким образом, подробная информация о спектральном составе объектов, содержащаяся в ГСИ, позволяет достичь высокого качества классификации даже при использовании относительно простых текстурных признаков, таких как геометрические моменты нулевого порядка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00249-а).

Список литературы

1. Дворкин Б.А., Дудкин С.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16–21.

2. Дмитриев Е.В., Козодеров В.В. Проблемы гиперспектрального авиационного мониторинга почвенно-растительного покрова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: матер. междунар. науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова. Красноярск: СФУ, 2014. С. 28–31.

3. Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles / M., J.A. Benediktsson, J. Chanussot, J.R. Sveinsson // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2008. Vol. 46(11). P. 3804–3814.

4. Bayesian classifier applications of airborne hyperspectral imagery processing for forested areas / V.V. Kozoderov, T.V. Kondranin, E.V. Dmitriev, V.P. Kamentsev // Advances in Space Research. 2015. Vol. 55(11). P. 2657–2667.

5. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal / A.A. Green, M. Berman, P. Switzer, M.D. Craig // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1988. Vol. 26 (1). P. 65–74.

6. Комплексная обработка гиперспектральных изображений на основе спектральной и пространственной информации / С.М. Борзов, П.В. Мельников, И.А. Пестунов, О.И. Потатуркин, А.М. Федотов // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 1. С. 25–39.

7. Kumar B., Onkar D.O. Spectral–spatial classification of hyperspectral imagery based on moment invariants // IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. 2015. Vol. 8(6). P. 2457–2463.

8. Рылов С.А., Мельников П.В., Пестунов И.А. Спектрально-текстурная классификация гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. матер. в 2 т. Т. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. С. 80–86.

9. Пестунов И.А., Рылов С.А. Алгоритмы спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Вестник КемГУ. 2012. Вып. 4/2 (52). С. 104–110.

УДК [551.507:551.524]:550.34

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Л. Г. Свердлик, С. А. Имашев
Кыргызско-Российский Славянский университет
e-mail: lsverdlik@istc.kg; l.sverdlik@mail.ru
e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

Представлены результаты, полученные с использованием разработанной методики диагностирования аномалий температуры и основанные на ретроспективном анализе процессов трансформации профилей температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы над эпицентрами землетрясений энергетического класса K > 13,0, произошедших в 2003–2015 гг. Аномальные возмущения температуры наблюдались примерно в 70 % случаев за 1–5 дней до основного сейсмического события.

Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, профили температуры, тропопауза, аномалии, уходящая длинноволновая радиация.

Введение. Взаимодействие двух крупных горных систем, Тянь-Шаня и Памира, определяют сложный характер геодинамических процессов и высокий уровень сейсмической активности в Центральной Азии и, соответственно, проведение многочисленных геофизических и геологических исследований с помощью наземных наблюдений и средств космической геодезии (*GPS*). В то же время диагностике связанных с землетрясениями возмущений в атмосфере уделяется недостаточное внимание. Так же как и использованию спутникового дистанционного зондирования, к достоинствам которого можно отнести глобальность охвата, включая горные районы, и регулярность получения данных [1]. Мы представляем методику и результаты ретроспективного анализа спутниковых измерений, которые позволили выявить аномальные вариации температуры в верхней тропосфере как вероятные предвестники сильных сейсмических событий в регионе.

Используемые данные. Исследование потенциальных возможностей спутникового мониторинга применительно к выявлению аномалий температуры атмосферы проведено на примере 15 наиболее сильных землетрясений, которые произошли на территории, ограниченной координатами 39÷43 °*N*, 71÷79 °*E* в 2003–2015 гг. и характеризовались энергией сейсмических волн (К) от 13,0 до 14,8. Сведения о сейсмических событиях взяты из каталога землетрясений Института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке, составленного по данным сейсмологической сети *KNET* [2].

Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы использовались данные спутниковых измерений (*MERRA 3D*) на 23 изобарических уровнях (p_k) от 800 до 10 *hPa* (http://giovanni.gsfc.nasa.gov/). Вертикальные профили температуры $T(p_k)$ были восстановлены над каждым участком размером ±1º от эпицентра землетрясения для временных периодов, составляющих 45–60 дней до и 30–45 дней после каждого из рассматриваемых событий. Выбранное время регистрации (00:00 и 12:00 *UTC*) и дискретность измерений (Δt = 12 часов) позволили ослабить суточную составляющую и сохранить особенности временной изменчивости температуры.

Карты пространственного распределения уходящей длинноволновой радиации (*OLR*) построены по данным *NOAA/ESRL* (http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/).

Методика анализа временных рядов температуры атмосферы. Несмотря на специфические особенности волновых проявлений в динамике развития температурных

аномалий накануне различных сейсмических событий, предлагаемая методика позволила определить основные закономерности изменения температуры, характерные для большей части произошедших сильных землетрясений. На рис. 1 представлены графики, иллюстрирующие все этапы применения методики к временным рядам температуры атмосферы в марте–апреле 2011 г.

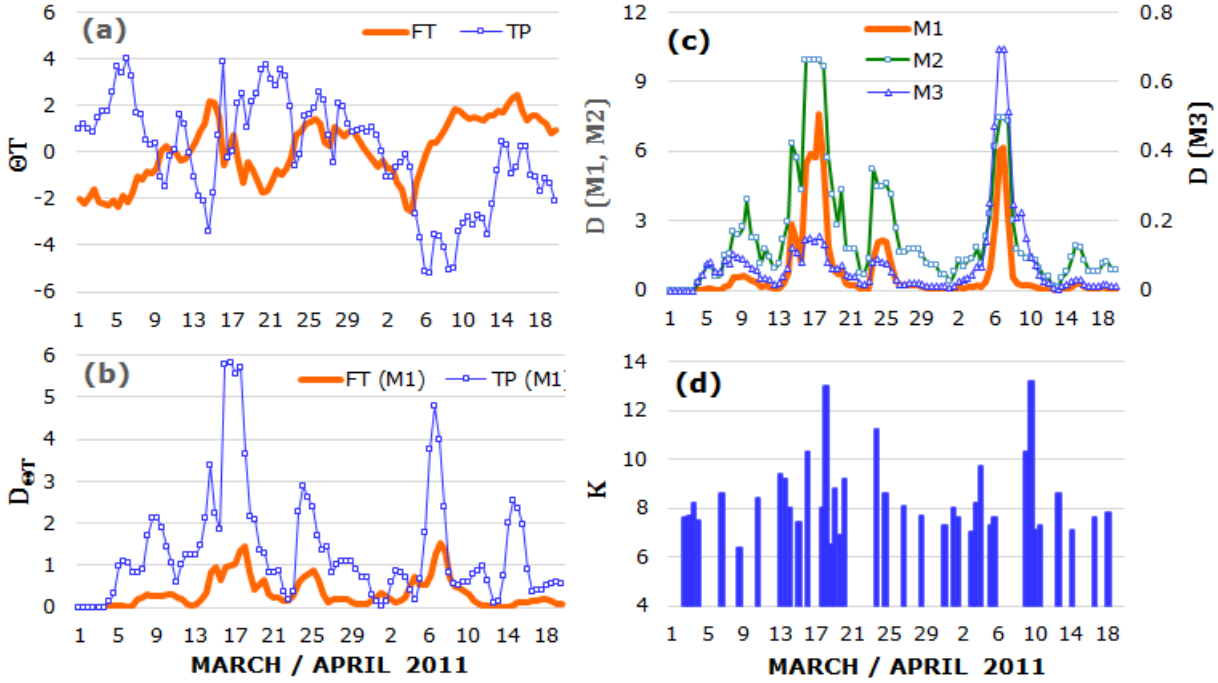


Рис. 1. Временная динамика аномалий средних значений температуры (a) и скользящей дисперсии (b) в слоях 600–300 и 200–150 *hPa*; параметра *D* (c), вычисленного с использованием среднего квадрата отклонений (*Method 1*), размаха (*Method 2*) и коэффициента вариации (*Method 3*); сейсмическая активность в марте–апреле 2011 (d)

На начальном этапе были сформированы непрерывные временные ряды, содержащие значения температуры на всех высотных уровнях атмосферы. Временная динамика аномалий температуры (ΘT) рассчитывалась как отклонение текущего значения температуры от среднемесячного уровня, нормированное на среднеквадратичное отклонение, а именно:

$$\Theta T(x,y,n,t,p) = \frac{T(x_i,y_j,n,t,p_k) - \langle T(x_i,y_j,p_k)\rangle}{\sigma_T(x_i,y_j)} = \frac{\Delta T(x_i,y_j,n,t,p_k)}{\sigma_T(x_i,y_j)},$$

где n – день измерения; t – время измерения; x – широта, y – долгота; i, j – обращение к точкам сетки координат (2°×2°); $T(x_i,y_j,t,p_k)$ – текущее значение температуры на каждом уровне (p_k); $\langle T(x_i,y_j,p_k)\rangle$ – среднее значение температуры; $\sigma_T(x_i,y_j)$ – среднеквадратическое отклонение.

На основании полученных данных вычислялись средние значения температурных аномалий в слоях атмосферы 600–300 и 200–150 *hPa* (рис. 1a), которые примерно соответствуют свободной тропосфере (ΘT_{FT}) и области, расположенной между тропической и полярной тропопаузой (ΘT_{TP}). Особенность теплового режима выбранных высотных интервалов заключается в различии поведения градиента температуры ($\gamma_{FT} = \Delta T / \Delta p < 0$; $\gamma_{TP} = \Delta T / \Delta p > 0$).

Анализ временных рядов ΘT_{FT} и ΘT_{TP} проводился с использованием метода скользящего «окна», который основан на представлении каждого члена ряда в виде

среднего m предыдущих наблюдаемых значений. В качестве параметров, объективно характеризующих особенности изменчивости температурных аномалий перед сильными землетрясениями, использовались: дисперсия $D_{\Theta T}$ (*Method 1*); размах $R_{\Theta T}$ (*Method 2*) и коэффициент вариации $V_{\Theta T}$ (*Method 3*). Сопоставление данных показало преимущество применения параметра $D_{\Theta T}$ (рис. 1b). При наличии достаточного числа элементов временного ряда ($n = 120 \div 180$) размер «окна» составлял $m = 6$, что позволило анализировать присутствующие в спектре колебаний температуры 5–6-дневные квазипериодические компоненты [3]. Обусловленные литосферными процессами относительно быстрые ($n = 2$–3 дня), аномальные ($\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k) > \sigma_T(x_i, y_j)$) и коррелированные ($D_{\Theta T}^{FT} \geq 1$ и $D_{\Theta T}^{TP} \geq 1$) изменения температуры на двух высотных уровнях атмосферы определялись как произведение значений дисперсии температуры:

$$D = D(\Theta T_{FT}) \cdot D(\Theta T_{TP}) = D_{\Theta T}^{FT} \cdot D_{\Theta T}^{TP}$$

Параметр D значительно превышает единицу при больших значениях $D_{\Theta T}$ (рис. 1c), но существенно меньше единицы в отсутствии флуктуаций температуры, когда естественная изменчивость не выходит за пределы среднемесячных значений: $\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k) < \sigma_T(x_i, y_j)$, или при воздействии случайных факторов ($D_{\Theta T}^{FT} \leq 1$ или $D_{\Theta T}^{TP} \leq 1$).

На рис. 4 приведены совмещенные графики динамики изменения параметра D и сейсмической активности ($K \geq 6{,}0$) в январе–феврале 2004 г. и марте–апреле 2011 г. Явно выраженные аномалии температуры над эпицентральной областью предстоящего сильного землетрясения ($K \geq 13{,}0$) наблюдались примерно за 1–5 дней до начала события в 9 из 12 исследованных случаев.

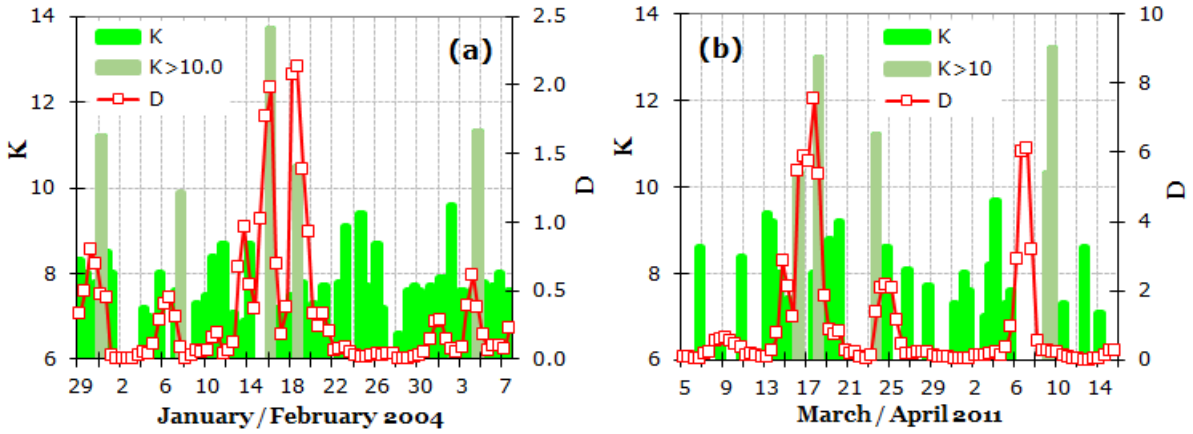


Рис. 2. Динамика изменения параметра $D_{\Theta T}$ и сейсмической активности ($K \geq 6{,}0$) в январе–феврале 2004 г. (a) и марте–апреле 2011 г. (b)

Результаты диагностирования аномалий пространственного распределения температуры атмосферы и уходящей длинноволновой радиации. Для локализации области подготовки землетрясений использовались следующие подходы. Во-первых, по профилям температуры $T(p)$ определялась высота термической тропопаузы и были идентифицированы случаи наличия двойной тропопаузы на основе критериев ВМО [4]. Разность температур (ΔT) между изобарическими поверхностями 250 *hPa* (T_{250hPa}) и 70 *hPa* (T_{70hPa}), которые соответствуют уровням полярной и тропической тропопаузы, определялась с помощью специально разработанной техники построения разностных карт распределения температуры. Это позволило установить пространственное расположение области минимума ΔT и, соответственно, область максимального перекрытия двух тропопауз (рис. 3a) вокруг эпицентра землетрясения:

$$\Delta T = \left| T_{250hPa}(x_i, y_j, t, n) - T_{70hPa}(x_i, y_j, t, n) \right|,$$

где n – дни; t – время измерения; x – широта, y – долгота; i, j – точки сетки координат исследуемой области с разрешением 1,25° × 1,25°.

Далее для каждого пиксела (2,5º×2,5º) определялась зональная аномалия уходящей длинноволновой радиации (*OLR_dE*), представляющая собой отклонение текущего значения *OLR* от среднемесячного уровня за многолетний период. Критерием аномалии *OLR* являлось превышение текущего значения уходящей длинноволновой радиации за выбранный день относительно основного поля *OLR* на уровень 2σ (рис. 3b).

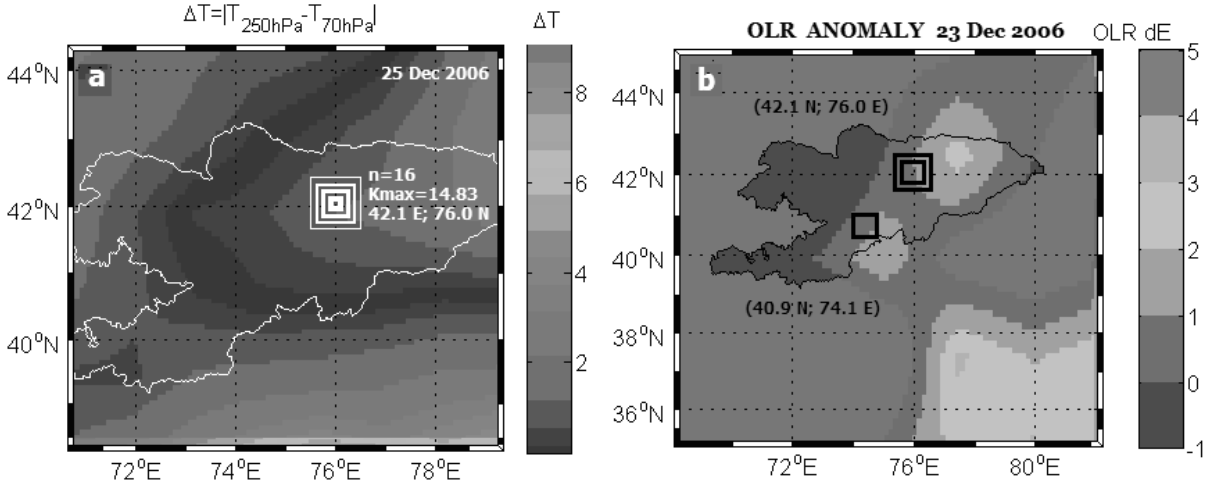


Рис. 3. Пространственное распределение разности температур *ΔT*, наблюдаемое 25 декабря 2006 г. (a), и аномалии *OLR* вблизи эпицентров землетрясений, произошедших 24 декабря (K = 14,8; 42,1 °N и 76,0 °E) и 25 декабря 2006 г. (K = 9,3; 40,9 °N и 74,1 °E) (b)

Разработанная методика и алгоритмы анализа аномальных вариаций температуры атмосферы и уходящей длинноволновой радиации в периоды сейсмической активности доведены до программной реализации в среде *MATLAB*.

Заключение. Анализ спутниковых данных показал, что возникновению большинства наиболее сильных сейсмических событий, произошедших в рассматриваемом регионе в 2003–2015 гг., предшествовало резкое изменение температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы. Разработанная методика и средства программного обеспечения позволяют исследовать особенности трансформации вертикальной термической структуры атмосферы, закономерности ее пространственно-временной изменчивости и выявить аномалии температуры и уходящей длинноволновой радиации в периоды подготовки землетрясений.

Список литературы

1. Кашкин В.Б., Симонов К.С., Григорьев А.С. Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Инженерная экология. 2011. № 2. С. 38–54.

2. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.

3. Имашев С.А., Свердлик Л.Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 15–19.

4. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 23–27.

УДК 551.509.68

ТАЕЖНЫЕ ЛЕСА В МЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ: ДИНАМИКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В. И. Харук[1, 2], Е. И. Пономарев[2]
[1]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru
e-mail: evg@ksc.krasn.ru

TAIGA FOREST IN THE CHANGING CLIMATE: WILDFIRES DYNAMICS

V. I. Kharuk[1, 2], E. I. Ponomarev[2]
[1]FGAOU VO “Siberian Federal University”
Institute of Space and Information Technologies
[2]Sukachev Institute of Forest RAS SO RAN
e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru
e-mail: evg@ksc.krasn.ru

Установлено климатически индуцированное возрастание горимости лиственничников Сибири в последние десятилетия. Межпожарный интервал (МПИ) возрастает от 80 лет на 62° с.ш. до ~200 лет на широте полярного круга и ~300 лет на северном пределе лиственничников. МПИ и тесно связан с длительностью пожароопасного периода (ДПП) (r = –0,69). ДПП, горимость и МПИ тесно связаны с инсоляцией (r = 0,97, 0,81 и –0,95, соответственно).

Ключевые слова: лиственничники, лесной пожар, межпожарный интервал, горимость, изменения климата.

Леса с преобладанием лиственницы (*Larix spp.*) представляют важнейшую составляющую бореальной зоны России, простираясь от Енисейского кряжа до Тихого океана и от Байкала до 73° северной широты. Из ежегодной площади лесных пожаров в России (составляющей, согласно различным оценкам, от 0,55–2,4 до 2–10 млн га) большая часть (70–90 %) приходится на леса Сибири, из них >90 % находится в зоне доминирования лиственницы. В лиственничниках, особенно северных, преобладают низовые пожары. Северные лиственничники, включая экотон лесотундры, рассматриваются как зона стока углерода. Однако возрастание температуры воздуха в XXI столетии повлечёт увеличение уровня горимости бореальных лесов. Имеющиеся данные указывают на возрастание горимости лесов Сибири в последние десятилетия [4]. Дальнейшее повышение частоты и увеличение площади пожаров будет сопровождаться ростом эмиссии углерода, что может трансформировать лиственничники из стока в источник парниковых газов (IPCC, 2014). Поскольку большинство (≥ 90 %) пожаров в северных лиственничниках естественного происхождения, параметры горимости лиственничников представляют индикатор климатических воздействий.

Цель работы — анализ пространственно-временной динамики горимости лиственничников Центральной Сибири. Исследования выполнялись по трансекте «юг–север» (рис. 1). Территория трансекты была разделена на шесть зон протяженностью по 5° географической широты.

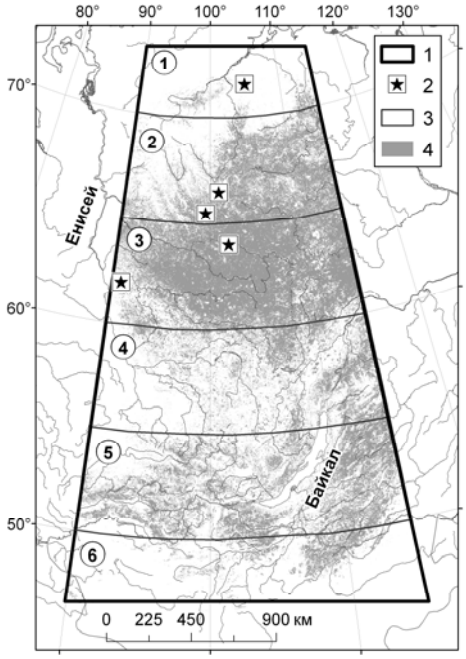


Рис. 1. Исследуемый регион (трансекта «юг–север»):
1 – граница трансекты; 2 – точки наземных обследований; 3 – границы секторов;
4 – территории с преобладанием лиственничников

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обнаружение пожаров, определение количественных характеристик горимости и геопространственный анализ горимости выполнялись на основе спутниковой съемки NOAA/AVHRR, Terra/MODIS и Aqua/MODIS за период 1996–2015 гг. Для привязки полигонов пожаров к преобладающим древесным породам использовался векторный полигональный слой карты растительности [1]. Частота пожаров определялась как число пожаров в пересчете на 10^5 га лиственничников. Горимость (%) определялась как отношение суммарной площади пожаров к общей площади лиственничников. Для характеристики длительности пожароопасного периода введено понятие «эффективная длительность», вычисляемая как временной интервал, в течение которого площади пожаров достигают 90 % от итоговой за год. Зависимость величины межпожарных интервалов (МПИ) от географической широты анализировалась на основе данных по МПИ [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пожароопасный период

Эффективная длительность пожароопасного периода максимальна на юге ареала лиственницы (130±32 дней), снижаясь до 29±10 дней с продвижением на север (рис. 2, *в*). Величина пожароопасного периода тесно связана с приходящей солнечной радиацией (r = 0,97). В южных лиственничниках частота возникновения пожаров имеет двухмодальную форму, сменяясь на одномодальную с продвижением на север (рис. 3).

Частота пожаров и горимость лиственничников

Пожары в лиственничниках составляют до 36±15 % общего числа и до 20±10 % общей площади пожаров в Сибири. Распределение пожаров аппроксимируется квазинормальной функцией (рис. 2, *а*) и тесно коррелирует с уровнем инсоляции (r = 0,81); зависимость описывается экспоненциальной функцией (рис. 2, *б*). В пределах трансекты «юг–север» горимость лиственничников максимальна на юге (2,0–3,0 %), снижаясь на порядок в высоких (65+°) широтах. Гистограмма среднемноголетних

площадей пожаров имеет вид квазинормального распределения (рис. 4, *а*) с максимумом на интервале 55–60° с.ш., где пожары проходят до 5000 тыс. га.

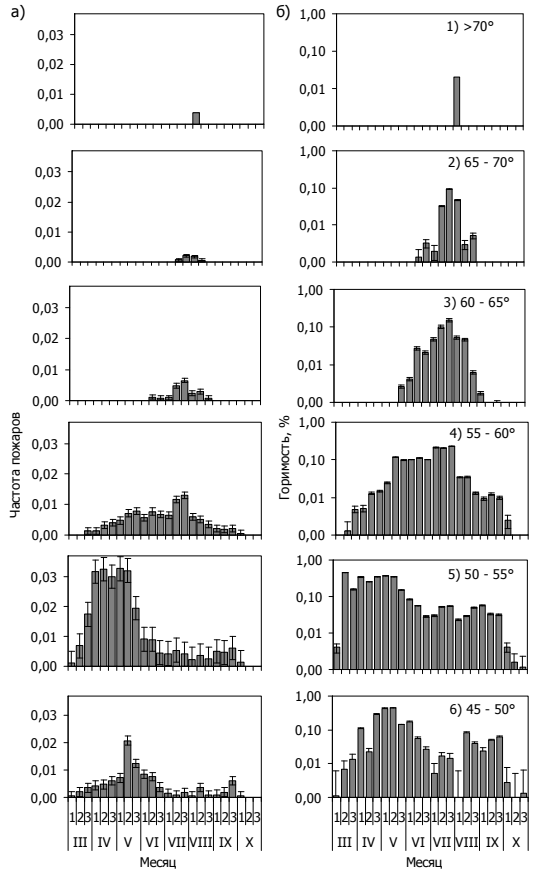


Рис. 2. *а*) 1 – гистограмма распределения пожаров по широте (% от суммарного числа пожаров), 2 – функция плотности вероятности для квазинормального распределения;
***б*) зависимость широтного распределения пожаров от уровня инсоляции на интервале 52–71° с.ш. (r = 0,81);**
***в*) эффективная длительность пожароопасного периода от широты (r = 0,97), приведен доверительный интервал (±σ);**
***г*) широтная вариация 1 – межпожарного интервала (МПИ) (r = 0,91) и 2 – уровня инсоляции**

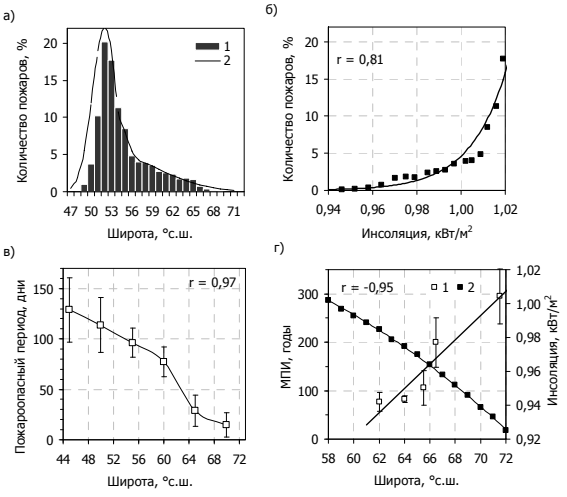


Рис. 3. Динамика относительной частоты пожаров (*а*) и нормированного показателя горимости (*б*) в лиственничниках по интервалам широт. Доверительный интервал для частоты пожаров p < 0,1, для горимости p < 0,05. Частота и горимость для зоны >70° с.ш. – по данным одного зафиксированного пожара

Величина межпожарных интервалов

С продвижением на север величина межпожарного интервала возрастает от 80–90 лет на широте 62º с.ш. до ~200 лет на широте полярного круга. На северной границе лиственничников (71° с.ш.) МПИ составляют ~300 лет. Между величиной МПИ и инсоляцией существует тесная обратная зависимость (r = –0,95).

Временная динамика горимости

Для Центральной Сибири наблюдается значимый тренд возрастания горимости лиственничников (R^2 = 0,50, p < 0,05; рис. 4, *б*). Если рассматривать длительную хронологию пожаров, то, как было показано ранее [2], похолодание в Малом

ледниковом периоде сопровождалось возрастанием величины МПИ; последовавшее потепление в середине XIX столетия повлекло сокращение величины межпожарных интервалов.

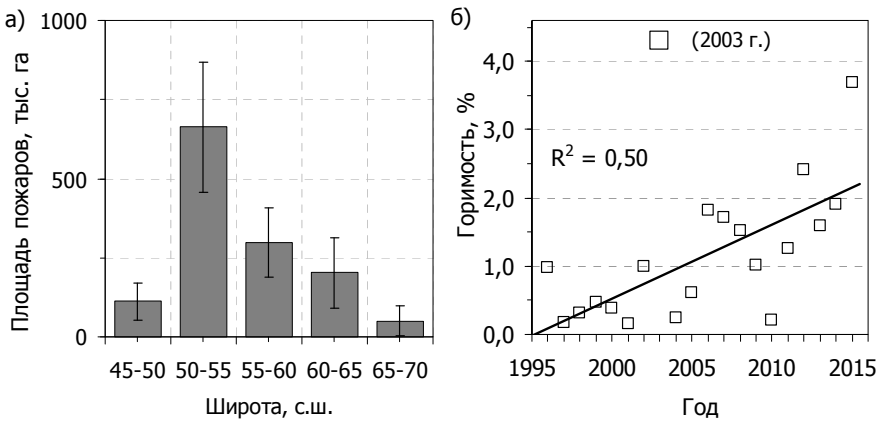


Рис. 4. Площади пожаров в лиственничниках по интервалам широт (*а*) и временная динамика горимости в пределах трансекты (*б*). Линейный тренд не учитывает значение экстремальной горимости (4,3 %) в 2003 г. Указаны доверительные интервалы для уровня значимости p < 0,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В динамике горимости лиственничников Центральной Сибири наблюдается значимый временной тренд возрастания частоты и площади пожаров ($R^2 = 0{,}50$, $p < 0{,}05$). Ранее для лесов Сибири была установлена корреляционная связь между этими показателями и аномалиями температуры воздуха (r = 0,6 и 0,67) [3], что подтверждает гипотезу о климатически индуцированном возрастании горимости таежных территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-24-00112).

Список литературы

1. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров // Совр. проблемы дист. зонд. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.

2. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., and K. J. Ranson Larch Forests of Middle Siberia: Long-Term Trends in Fire Return Intervals // Environ. Res. Lett. 2015. DOI: 10.1007/s10113-016-0964-9.

3. Пономарев Е.И., Харук В.И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологич. журн. 2016. № 1. С. 38–46. DOI: 10.15372/SEJ20160104.

4. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., and Ranson K.J. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. Vol. 7 (125). DOI:10.3390/f7060125.

УДК 528.8.04, 528.88

ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

М. В. Энгель[(1)], В. В. Белов[(1, 2)], М. В. Тарасенков[(1, 2)]
[(1)]ФГБУН «ИОА СО РАН им. В. Е. Зуева»
e-mail: angel@iao.ru
[(2)]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
e-mail: belov@iao.ru
e-mail: tmv@iao.ru

Настоящая работа посвящена развитию средств интеграции информационного и программного обеспечения для задач тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Используемый авторами подход показан на примере создания прототипа системы интеграции, включающей алгоритмы тематической обработки данных ДЗЗ для решения задачи атмосферной коррекции.

Ключевые слова: тематическая обработка спутниковых данных, информационные системы, атмосферная коррекция.

Введение

Рост объёмов и номенклатуры данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с одной стороны, и развитие алгоритмических и программных средств их тематической обработки – с другой, обусловили тенденцию развития информационных систем, ориентированных на поддержку решения различных прикладных задач с использованием ДДЗ, на основе интеграции уже существующих программных и информационных ресурсов. Целью данной работы является создание прототипа интегрированной системы для задач тематической обработки данных ДЗЗ.

Постановка задачи предусматривает интеграцию в рамках системы алгоритмов тематической обработки ДДЗ и распределенной разнородной информации, необходимой для проведения расчетов, причем количество информационных ресурсов и математических моделей может быть произвольным и меняться в процессе жизнедеятельности системы. Использованные при разработке модели и методы показаны на примере интеграции алгоритмов атмосферной коррекции.

Алгоритмы и информационные ресурсы

На начальном этапе разработки в системе реализован алгоритм расчета корректирующих атмосферных поправок для измерений, полученных в каналах видимого и ИК-диапазонов спутниковой аппаратуры.

Алгоритм атмосферной коррекции в видимом диапазоне длин волн реализован на основе метода Монте-Карло. Определение коэффициентов отражения земной поверхности r_{surf} выполняется в несколько этапов [1, 2].

1. Определяется интенсивность излучения, не взаимодействовавшего с земной поверхностью I_{sun}, границы изопланарных зон (областей, где функцию размытия точки (ФРТ) канала формирования бокового подсвета можно считать постоянной) и ФРТ канала формирования бокового подсвета $h(x_w,y_w)$ для этих зон.

2. Решается система линейных алгебраических уравнений относительно величины $Q = r_{surf}E_{sum}$:

$$I_{sum}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_{sun}(x_{w,1}, y_{w,1}) = \frac{Q_1}{\pi}\exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^{N} Q_k H_{k,1}$$
$$\dots$$
$$I_{sum}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_{sun}(x_{w,N}, y_{w,N}) = \frac{Q_N}{\pi}\exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^{N} Q_k H_{k,N} \quad (1)$$

$$H_{kl} = \iint_{S_k} h(x'_w - x_{w,l}, y'_w - y_{w,l})\,dx'_w\,dy'_w \quad (2)$$

где I_{sum} – суммарная интенсивность излучения, измеренная спутниковой системой; τ – оптическая длина трассы от наблюдаемого пикселя до приемной системы; H_{kl} – интеграл по поверхности k-го пикселя от h; E_{sum} – суммарная освещенность земной поверхности.

3. Определяется освещенность земной поверхности без учета переотражений E_0 и ФРТ канала формирования дополнительной освещенности переотражениями $h_1(r_w)$.

4. С использованием величин Q, E_0 и h_1, из нелинейной системы определяются искомые значения коэффициентов отражения r_{surf}.

Точное решение задачи атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности требует решения уравнения переноса излучения через многокомпонентную среду (атмосферные газы, аэрозоль, облака, осадки). Расчет корректирующих атмосферных поправок для измерений, полученных в каналах ИК-диапазона спутниковых сенсоров, производится на основе математической модели MODTRAN [3, 4].

Для работы алгоритмов атмосферной коррекции требуется информация о различных параметрах спутниковой съемки, включающая геометрию наблюдений, измеренную спутниковой аппаратурой интенсивность излучения и оптико-метеорологические атмосферные параметры (облачную маску, параметры аэрозоля и облачности, вертикальные профили температуры и водяного пара и т. п.).

Определение и получение оптимального набора данных об атмосфере, позволяющего произвести расчет искажающих характеристик атмосферы с точностью, приемлемой для решаемой тематической задачи, является одним из ключевых вопросов атмосферной коррекции спутниковых изображений. В работах [5, 6] была предложена и обоснована методика использования данных о состоянии атмосферы по данным измерений спектрорадиометра MODIS при проведении атмосферной коррекции спутниковых ИК-изображений. Выполненная в ИОА СО РАН комплексная валидация спутниковых данных MODIS подтвердила возможность использования этих данных для проведения атмосферной коррекции [7, 8].

В качестве источника исходных данных при проведении расчётов представляемая система позволяет использовать атмосферные тематические продукты измерений спектрорадиометра MODIS/EOS, а также прогностические модели NSEP [9]. В качестве сетевых ресурсов, содержащих тематические продукты MODIS, в системе используются ресурс LAADS Web [10], а также распределенная инфраструктура ЦКП ДЗЗ СО РАН и электронные архивы спутниковых данных ИОА СО РАН.

Схема атмосферной коррекции спутниковых ИК-изображений и информация, необходимая при проведении расчётов, представлены на рисунке.

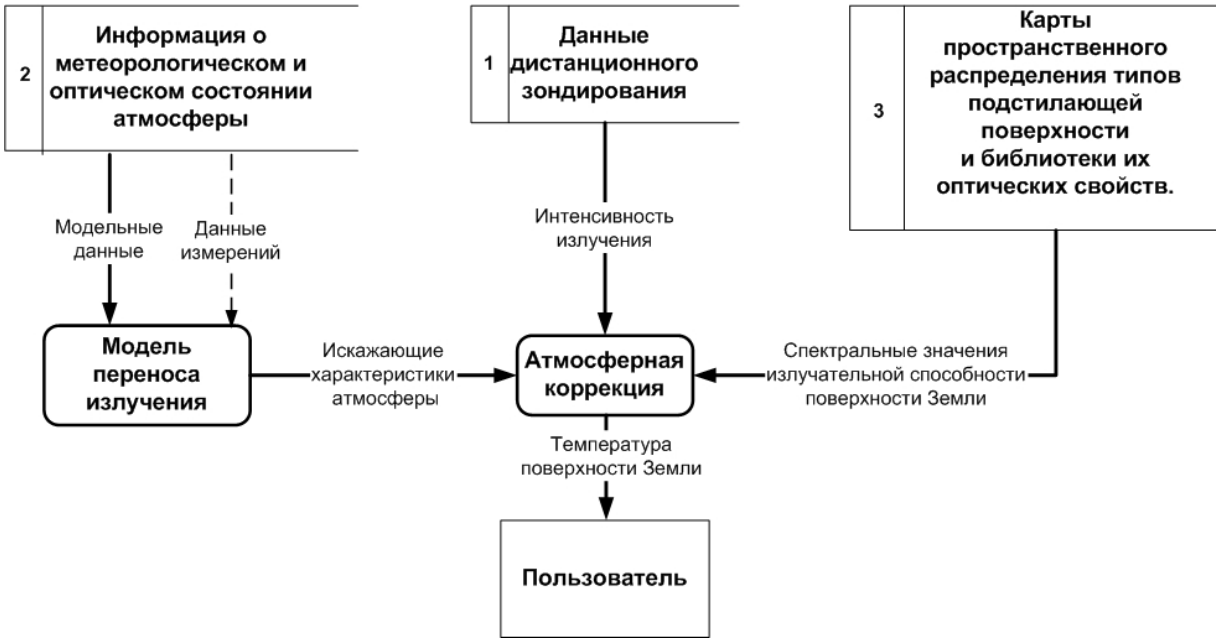


Рис. Схема проведения атмосферной коррекции спутниковых измерений температуры поверхности Земли

Заключение

При разработке интегрированной системы тематической обработки данных ДЗЗ для описания информационной структуры предложена инфологическая схема распределенных данных, включающая параметры идентификации источников данных. Интеграция разнородных распределённых данных и алгоритмов обработки производится на основе предложенной авторами автоматной модели. На основе автоматной модели и инфологической схемы предложена информационная модель системы, обеспечивающая расширение функциональных возможностей за счет включения новых алгоритмов обработки и типов данных [11].

В результате настоящей работы создан прототип системы интеграции информационного и программного обеспечения для задач тематической обработки данных ДЗЗ, включающий алгоритм расчета корректирующих атмосферных поправок на основе физической модели формирования оптических изображений земной поверхности и алгоритм атмосферной коррекции в видимом диапазоне длин волн, учитывающий основные факторы, влияющие на перенос излучения. Система позволяет выполнять расчет корректирующих атмосферных поправок для измерений, полученных в каналах видимого и ИК-диапазонов спутниковой аппаратуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 15-07-06811, № 15-01-00783, № 16-31-00033-мол_а.

Список литературы

1. Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстродействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 07. С. 564–571.

2. Тарасенков М.В., Белов В.В. Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 622–627.

3. Ontar Corporation. URL: http://www.ontar.com/

4. Berk A., Cooley T.W., Anderson G.P., Acharya P.K., Bernstein L.S., Muratov L., Lee J., Fox M.J., Adler-Golden S.M., Chetwynd J.H., Hoke M.L., Lockwood R.B., Gardner J.A., Lewis P.E. MODTRAN5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options // Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII. Edited by Meynart, Roland; Neeck, Steven P.; Shimoda, Haruhisa. Proceedings of the SPIE. 2004. V. 5571. P. 78–85.

5. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1056–1063.

6. Афонин С.В., Соломатов Д.В. Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 2. С. 147–153.

7. Афонин С.В. К вопросу о применимости восстановленных из космоса метеоданных MODIS для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23. № 8. С. 684–688.

8. Валидация региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Product (MOD04) / С.В. Афонин, В.В. Белов, М.В. Энгель, А.М. Кох // Вторая Всерос. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы космическими средствами»: тезисы докладов. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. Т. 2. С. 27–31.

9. National Centers for Environmental Prediction. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ncep.noaa.gov/

10. The Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System – LAADS Web. URL: http://ladsweb.nascom.nasa.gov/

11. Энгель М.В., Белов В.В. Интегрированная информационная система тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе автоматной модели // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29. № 9.

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

УДК 528.835.042.3

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИК-РАДИОМЕТР ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин, А. А. Зайцев, М. Б. Смелянский,
А. В. Рыжаков, А. Г. Фролов
АО «Российские космические системы»
e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Рассматриваются принцип действия и конструктивные особенности перспективного ИК-радиометра. Разрабатываемая обеспечивает сеансную трассовую съемку земной поверхности в среднем и тепловом инфракрасных диапазонах спектра и позволяет решать задачи по оперативному мониторингу техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Пространственное разрешение в надире составляет 200 м, полоса захвата 2000 км.

Ключевые слова: радиометр, спектрозональная съемка Земли, сканирующее устройство.

В России продолжается наращивание космической группировки аппаратов дистанционного зондирования Земли [1], в частности, предназначенных для мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Для решения такого рода задач в АО «Российские космические системы» при проведении работ по разработке опережающего задела бортовых приборов дистанционного зондирования Земли создан перспективный ИК-радиометр [2, 3].

При разработке радиометра была поставлена задача по созданию аппаратуры для оперативного мониторинга лесных пожаров и высокотемпературных объектов природного и техногенного характера на территории России и ближнего зарубежья площадью не менее 25 м^2, что определило основные тактико-технические характеристики: число спектральных каналов, их границы, пространственное разрешение и полосу захвата.

Радиометр имеет два информационных канала в инфракрасном диапазоне спектра (3,5–4,1 и 8,4–9,4 мкм) и предназначен для обеспечения различных ведомств Российской Федерации оперативной информацией для решения многих задач: выявления очагов лесных пожаров и их динамики; мониторинга зон вулканической деятельности; мониторинга промышленных объектов; теплового картирования и др.

Основные тактико-технические характеристики радиометра:

- количество спектральных каналов: 2 (+2 резервных);
- границы спектральных зон по уровню 0,5: 3,5–4,1 мкм, 8,4–9,4 мкм;
- полоса обзора (при высоте орбиты 510 км): 2000 км;
- пространственное разрешение в надире: 200 м;
- эквивалентная шуму разность измеряемых температур на уровне 300 К: ≤ 0,5 К (в среднем ИК диапазоне), 0,15 К (в дальнем ИК-диапазоне);

– режим работы: сеансный;
– масса: ≤ 85 кг.

Параметры радиометра обеспечивают глобальное покрытие территории России за 6–7 последовательных витков (рис. 1), что крайне важно для оперативного получения информации отечественными потребителями.



Рис. 1. Формирование изображения территории России перспективным ИК-радиометром за несколько сеансов съемки

Разработанный радиометр относится к классу оптико-механических сканирующих устройств с многострочным сканированием. Принцип построения и геометрия сканирования радиометра показаны на рис. 2.

В качестве приемников излучения в радиометре используются отечественные многоэлементные (матричные) ИК-фотоприемники форматом 4×288 элементов, охлаждаемые микрокриогенной системой до температуры 80 К.

Процесс сканирования по строке осуществляется двусторонним плоским зеркалом, совершающим непрерывное круговое движение с помощью низкооборотного привода.

Линейки приемников расположены вдоль направления полета. За один цикл строчной развертки формируются 288 строк изображения (микрокадр форматом 288×5150 элементов, где 5150 – число элементов в строке). Микрокадры имеют перекрытие и при наземной обработке «сшиваются» в единое трассовое изображение.

В радиометре применена модульная схема — каждый информационный канал формируется независимым оптико-электронным блоком. Таких модулей в радиометре четыре: два для диапазона 3,5–4,1 мкм и два для диапазона 8,4–9,4 мкм (по одному резервному блоку на каждый канал). Использование резервных блоков обеспечивает полетный ресурс радиометра при сеансной съемке не менее 12 000 часов.

Реализованный в радиометре принцип построения позволил получить пространственное разрешение 200 м в широкой полосе обзора (2000 км) и эквивалентную шуму разность измеряемых температур не хуже 0,2 К.

Для коррекции сигнала в процессе эксплуатации радиометра (вследствие неравномерности чувствительности отдельных элементов приемников излучения,

изменения исходных значений пропускания оптической системы и т. п.) в состав оптической схемы введены бортовые эталонные источники излучения – имитаторы абсолютно черного тела с температурой 330 и 268 К, формирующие стабильное опорное излучение. Ввод излучения от имитаторов осуществляется через сканирующее зеркало в каждой строке вне ее информационной части.

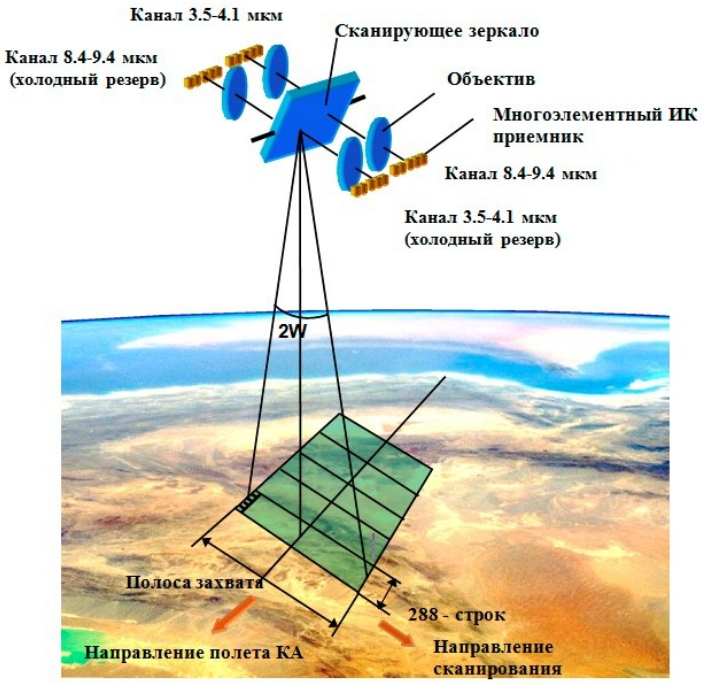


Рис. 2. Принцип построения аппаратуры и геометрия сканирования

Выбор границ спектральных диапазонов радиометра продиктован основной задачей – обнаружение высокотемпературных объектов: естественного (вулканы, гейзеры, очаги лесных пожаров) и искусственного (высокотемпературные промышленные объекты) происхождения, температура которых достигает 700–1100 К.

Задачи мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций могут решаться и другими устройствами, имеющими в своем составе каналы среднего и теплового ИК-диапазона, но в отличие от них (существующих гидрометеорологических систем МСУ-МР и AVHRR и перспективных МСУ-МР-МП и VIIRS), разработанный радиометр позволит получать качественно новую информацию за счет более высокого пространственного разрешения. На рис. 3 приведены фрагменты изображений с очагами лесных пожаров с аппаратуры MODIS (спутник Terra) и HRSR (спутник BIRD). Сравнение этих двух изображений наглядно подтверждает повышение информативности при увеличении пространственного разрешения при решении задач мониторинга лесных пожаров. Изображения с пространственным разрешением 200 м, формируемые перспективным радиометром, позволят еще более детализировать подобные объекты съемки и получать их количественные характеристики.

В таблице приведена эффективная температура пикселя, содержащего точечный объект (костер) с температурой 1000 К, при фоновой температуре пикселя 300 К для радиометра с пространственным разрешением 200 м.

Как следует из таблицы, в диапазоне 3,5–4,1 мкм радиометр с разрешением 200×200 м позволяет обнаруживать высокотемпературные объекты площадью до 4 м^2.

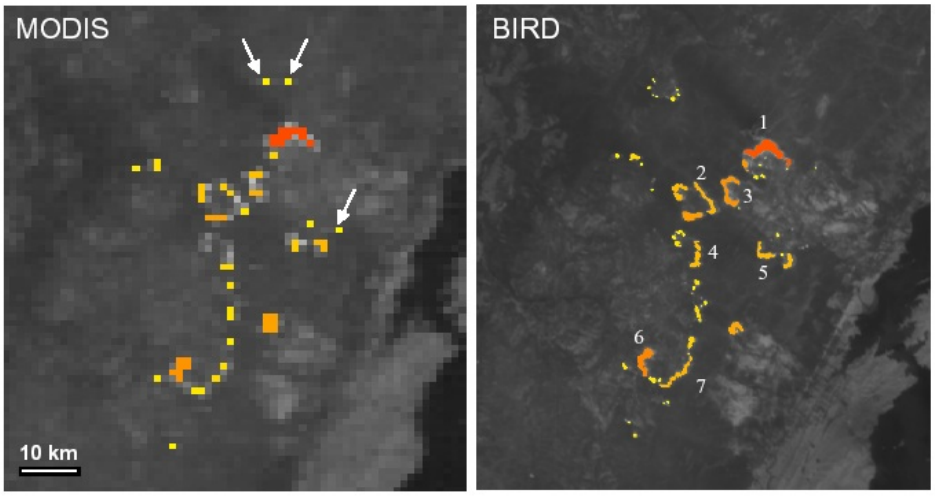


Рис. 3. Сравнение зон лесных пожаров в районе озера Байкал, сделанных спутниками MODIS и BIRD 16 июля 2003 г.

Таблица 1

Эффективная температура пикселя, содержащего точечный объект (костер) с температурой 1000 К, при фоновой температуре пикселя 300 К

Площадь объекта, м^2	Эффективная температура пикселя, К	
	3,5–4,1 мкм	8,4–9,4 мкм
1(1×1)	304	300
4 (2×2)	313	301
25 (5×5)	346	302
100 (10×10)	390	308

Таким образом, запуск КА с аппаратурой, разработанной АО «Российские космические системы», позволит существенно расширить круг задач, решаемых дистанционными методами. Его информация будет востребована и для решения задач гидрометеорологии, что позволит дополнить информацию, получаемую с гидрометеорологических КА «Метеор-М» и «Электро-Л», данными с более высоким пространственным разрешением.

Список литературы

1. Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К. Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 4. С. 14–19.

2. Пат. 2324151 Российская Федерация, МПК G01J 3/06. Многоканальный радиометр с широким углом обзора / Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Фролов А.Г.; заявл. 11.09.2006, опубл. 10.05.2008.

3. ИК-радиометры нового поколения на основе многоэлементных приемников излучения / Н.П. Акимов, Ю.М. Гектин, М.Б. Смелянский [и др.] // Мехатроника, автоматика, управление, прил. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. 2007. № 5.

УДК 550.8.053, 681.3.068

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА И ОБРАБОТКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Д. А. Белоусова, С. С. Окишев
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: queen.rana@rambler.ru
e-mail: devvil123@mail.ru

DEVELOPING SUITE ARCHITECTURE FOR COMPUTATION AND PROCESSING OF GEOELECTRIC FIELD DATA

D. Belousova, S. Okishev
e-mail: queen.rana@rambler.ru
e-mail: devvil123@mail.ru

Данная статья рассматривает проблему необходимости программной реализации быстрых и точных комплексных вычислений, позволяющих автоматизировать весь процесс анализа и обработки полевых данных геофизических приборов. В статье выявлена и обоснована необходимость построения гибкой архитектуры программного комплекса, сформулирована ее актуальность и научная новизна, установлены цели, достижение которых обеспечит оптимизацию процесса электроразведки.

Ключевые слова: разведочная геофизика, электроразведка, архитектура, сервисно-ориентированный подход, инверсия управления, абстрактная фабрика, паттерн-менеджер.

Введение

На сегодняшний день одним из самых востребованных прикладных направлений современной науки является геофизика. Главная ее цель – разработка методов геофизической съемки и геофизической разведки для поиска месторождений полезных ископаемых. Для изучения строения Земли и поиска, а также уточнения характера залежей и выявления предпосылок для их образования предназначен такой раздел, как разведочная геофизика. Она занимается решением геологических задач, применяя методы, позволяющие, не нарушая структуры геологической среды, предварительно исследовать недра Земли на больших площадях с минимальными затратами времени и средств, а также прогнозировать с минимальной степенью ошибки местонахождение полезных ископаемых [1].

На практике результатом полевых работ всегда являются наборы измерения параметров электромагнитного поля, полученных с помощью аппаратуры, на точках исследуемой местности. Применяя те или иные методы исследования, геофизик получает возможность оценить структуру земных недр, опираясь на несколько параметров. Например, можно оценить один и тот же участок, проводя точечные измерения с последовательным увеличением глубины зондирования, а можно, наращивая разносы, оценить его с точки зрения площадной съемки. Подробно исследовав участок проведения предполагаемых работ, геофизик передает полученные данные в лабораторию, где с помощью математических вычислений производится анализ с выведением заключения о целесообразности добычи ископаемых на участке или же о необходимости дальнейшего анализа, например, с помощью химических исследований [2].

Актуальность работы. На сегодняшний день перед исследователями стоит проблема необходимости реализации быстрых и точных комплексных вычислений, позволяющих автоматизировать весь процесс анализа полевых данных от момента их поступления в лабораторию и до факта вынесения заключения о возможности дальнейших исследований. Скорость и точность вычислений обусловливает такое требование к системе, как ее гибкость и наличие возможности быстрого взаимодействия между компонентами, что ставит перед разработчиком задачу проектирования качественной архитектуры комплекса.

Из вышеизложенного следует, что проблема разработки гибкой архитектуры программного комплекса для расчета и обработки полевых данных действительно актуальна на сегодняшний день.

Научная новизна. Поскольку выявленные проблемы являются слишком узкоспециализированными в области разведочной геофизики, на рынке отсутствует единое их программное решение, а существующие программные комплексы либо ориентированы на конкретные предприятия, либо труднодоступны для приобретения рядовыми организациями, очевидна необходимость в разработке программного комплекса, позволяющего как оптимизировать процесс вычислений, так и ускорить его.

Объект исследования. Процесс расчета и обработки полевых данных разведочной геофизики.

Предмет исследования. Прикладные аспекты моделирования свойств рельефа и электромагнитного поля Земли.

Цель работы. Моделирование процесса расчета и обработки полевых данных разведочной геофизики и разработка архитектуры программного комплекса для реализации цели.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ предметной области, в рамках которого изучаются закономерности и соответствия:

а) методов разведочной геофизики;

б) средств разведочной геофизики;

в) возможностей их функционирования и взаимодействия.

2. Построение математической модели физических процессов.

3. Создание архитектуры программного комплекса.

Алгоритм решения задачи

При старте разработки архитектуры комплекса были выявлены следующие проблемы:

1. Процесс анализа данных должен быть разбит на смысловые блоки базовых программ, каждый из которых получает и в заданном пользователем порядке обрабатывает одни и те же входные данные, причем взаимодействие между блоками сведено к минимуму.
2. Не все бизнес-процессы имеют точное математическое определение, и в ближайшем будущем, возможно, структура части блоков будет изменена.

Разработчиками было принято решение применить сервисно-ориентированный подход, предполагающий наличие в структуре программы независимых сервисов, каждый из которых реализует смысловую функцию обозначенного блока программ. Смысловая нагрузка каждого из блоков определена следующим образом:

1. Блок базовых программ – хранит все возможные формулы, которые могут быть задействованы для вычислений.

2. Блок программ геологического картирования – обработка полевых данных, имеющих жесткую географическую привязку.
3. Блок структурно-геометрических программ – обработка геометрических вычислений, а так же построение кривых и графиков на основе полевых данных.
4. Блок электрофизических программ – функциональная реализация методов разведочной геофизики.
5. Блок программ геологического моделирования – моделирование разрезов на основе полевых данных.

В основе всех частей системы заложены интерфейсы с однозначно определенными Generic-типами, которые при последующем добавлении в программу модулей исключат некорректное внедрение модуля разработчиком, тем самым защищая комплекс от возникновения ошибок по вине программиста. При этом задача разработчика модулей будет значительно упрощена за счет стандартизации процесса расширения системы согласно принципу полиморфизма. А поиск возникших проблем ограничится только кругом внедряемых модулей, что ускорит поиск причин возможных ошибок в системе.

С целью унификации создания всех модулей и отсечения необходимости переписывать отдельные фрагменты системы, а также для безопасности структуры всех модулей в случае значительных изменений в архитектуре был применен принцип инверсии управления. Это упрощает расширение возможностей системы, при этом остается контроль над потоком управления программы за каркасом. Применяя порождающий шаблон проектирования «абстрактная фабрика», система создает экземпляры модулей на основе Dependency injection фреймворка Ninject. Это позволяет реализовать независимость абстракции от деталей, так как по определению фабрика предоставляет интерфейс для создания семейств взаимосвязанных или невзаимозависимых объектов, не специфицируя их конкретных классов.

Для манипулирования шаблоном «инверсия управления» и контролем над объектами в системе используется так называемый паттерн-менеджер, необходимый для грамотного управления объектами любого типа (в данной системе такими объектами являются модули блоков). Это происходит за счет применения шаблона «абстрактная фабрика» для работы с объектами. Он обеспечивает своевременное и безопасное получение, удаление или замену модулей по мере необходимости. Также менеджер применяется для межмодульного взаимодействия, ограничивая, таким образом, контакт между частями программы напрямую и передавая все команды через специальный менеджер, что соответствует правилам реализации сервисно-ориентированного подхода.

В каждый модуль в системе будут входить следующие объекты:

1. Класс ModuleDataModel, где перечислены все используемые модулем доменные объекты.
2. Класс ModuleDataWorker, где хранятся реализации всех геофизических функций, необходимых для корректной работы модуля.
3. Класс ModuleViewModel, реализующий функции взаимодействия пользовательского интерфейса и модели данных и хранящий экземпляры ModuleDataModel и ModuleDataWorker.
4. Класс ModuleView, реализующий пользовательский интерфейс.

Заключение

В настоящее время программное сопровождение для аппаратуры, предназначенной для исследования электромагнитного поля (ЭМП) геологической среды, разрабатывается впервые. Уже сделаны первые наработки – спроектированы модули анализа геофизических данных и модули подготовки и предварительной обработки полевых данных. Данное архитектурное решение является продолжением работы над программным обеспечением для аппаратуры ЭМП, и разработчики ставят перед собой цель обеспечить именно системный подход к созданию модулей. Это позволит как быстро и профессионально обрабатывать и подготавливать еще сырые полевые данные, так и строить геологические разрезы исследуемой среды и анализировать полученные данные с помощью различных методов и средств.

Работы, предшествовавшие созданию архитектурного решения, были высоко оценены на конференции «Молодежь и наука: проспект Свободный – 2016» (работа, посвященная интерпретации данных метода электромагнитного зондирования, была удостоена диплома III степени; работа, посвященная проблеме определения взаимосвязи свойств рельефа и электромагнитных параметров горных пород, была удостоена диплома I степени) и рекомендованы к участию в конкурсе У. М. Н. И. К. 2016 г.

Список литературы

1. Белоусова Д.А., Молокова Н.В. Разработка программного обеспечения для определения взаимозависимости свойств рельефа с геофизическими характеристиками залегающих руд // Молодежь в науке: Новые аргументы: сб. науч. работ III Междунар. молодежного конкурса (Россия, г. Липецк, 29 февраля 2016 г.). Ч. I / отв. ред. А.В. Горбенко. Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2016. С. 22–25.

2. Каратаев Г.Д., Панфилов А.Е. Разработка программного обеспечения для интерпретации результатов электромагнитных методов геологической среды [Электронный ресурс] // Сб. материалов Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект Свободный-2015», посвященной 70-летию Великой Победы. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 15–25 апреля 2015 г. URL: http://nocmu.sfu-kras.ru/direction/src/техническое/Геология%20и%20разведка%20месторождений.pdf

УДК 004.42, 004.51

АКТИВНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПЛОЩАДНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

Р. В. Брежнев
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

ACTIVE SYSTEM OF MONITORING THE AREAL SPATIAL OBJECTS BY THE EARTH REMOTE SENSING DATA

R. V. Brezhnev
Siberian Federal University
The Institute of Space and Information Technology
e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

В статье описана система мониторинга целевого пространственного объекта на примере земель сельскохозяйственного мониторинга, способная в автономном режиме актуализировать свойства пространственного объекта по данным дистанционного зондирования Земли и ориентированная на конечного пользователя. Описаны структура и состав системы, а также модель целевого пространственного объекта класса земель сельскохозяйственного назначения, лежащая в основе рассматриваемой системы.

Ключевые слова: пространственный объект, активная система мониторинга, дистанционное зондирование Земли, мультиагентный коллектив, агент, онтология, самоактивизация, земли сельскохозяйственного назначения.

Одним из важнейших этапов мониторинга площадных объектов, таких как земли сельскохозяйственного назначения (ЗСХН), по данным ДЗЗ является обработка космических изображений, включая задачи приведения изображений к требуемому уровню обработки и выделения на них значимых объектов. Эти функции осуществляются с помощью специализированных пакетов для работы с растровыми изображениями и настольных ГИС в операторском режиме, что требует постоянного привлечения экспертов по соответствующим предметным областям и переносит использование пространственной информации с уровня административного управления на экспертный уровень анализа и обработки. Систематическое получение актуальных данных из открытых пространственных и картографических информационных ресурсов, представленных FTP-доступом или специальными поисковыми web-сервисами по данным ДЗЗ, также требует привлечение эксперта, имеющего навыки работы в области web-технологий и владеющего геопространственной информацией, необходимой для поиска данных в предлагаемых web-сервисах, что затрудняет процесс актуализации информации для конечного пользователя.

Все это делает актуальной задачу организации автономной среды, позволяющей стать связующим звеном между разнородными распределенными источниками данных ДЗЗ, геоинформационными системами и задачами мониторинга ЗСХН, стоящими перед конечным пользователем (КП), который не является экспертом ни в методах ДЗЗ, ни в специфике обработки, анализа, хранения, поиска и представления данных ДЗЗ. Следовательно, необходим такой подход к осуществлению управленческих мероприятий, который позволил бы с минимальным привлечением экспертов осуществлять поиск и получение актуальной информации о состоянии целевого объекта или группы объектов.

Реализовать подобную среду позволяет совокупное применение онтологического подхода и мультиагентных систем, хорошо зарекомендовавших себя в решении

сложных задач, разновидностью которых является мониторинг пространственных объектов (ПО) с использованием методов и средств ДЗЗ и геоинформационных технологий. Такая система позволяет представить ПО в виде автономного самоактивизирующегося агентного коллектива, базой знаний которого является модель ПО, представленная в виде онтологии.

Анализ современного состояния разработок в области космического мониторинга ПО показал, что существующие в настоящее время программные средства и базы данных в области ДЗЗ предлагают в качестве диалоговых средств либо интерфейсы по навигации среди данных ДЗЗ, ориентированных на специалистов ДЗЗ, либо ГИС. При этом фактор, позволяющий КП самостоятельно, с минимальным привлечением эксперта проводить мониторинг подведомственных объектов посредством целеуказания системе, проработан недостаточно. Один из вариантов решений данной задачи предложен в настоящей работе и основан на применении мультиагентных систем, моделей и методов координации различных агентов, включая программные модули, обладающие свойством активности, а также конечных пользователей и экспертов по направлениям (первичная обработка изображений, дешифрирование и прочее).

Целью проектирования и разработки автономной системы мониторинга площадных пространственных объектов по данным ДЗЗ является предоставление результатов мониторинга конечным пользователям, являющимся заказчиками решения задач мониторинга со стороны органов власти и промышленности.

Основной задачей системы является сформировать описание пространственного объекта путем отслеживания его заданных свойств и в случае критического изменения значений этих свойств информировать КП о фактических изменениях объекта с целью принятия решения, а также выделить этот объект на изображении (создать слой) и актуализировать модель пространственного объекта.

Свойства и структура активной системы мониторинга

Прежде чем приступить к рассмотрению системы, дадим несколько определений. Так, под **мониторингом** пространственного объекта понимается процесс измерения заданных параметров наблюдаемого объекта на заданном промежутке времени для оценки состояния объекта и своевременного принятия управляющего решения в случае значительного отклонения измеряемых параметров от заданной нормы. При этом **пространственным объектом** является цифровая модель объекта подстилающей поверхности Земли, содержащая его набор унарных и бинарных свойств, отождествляющих цифровую модель объекта с реальным объектом подстилающей поверхности Земли.

В условиях сформулированной задачи и ориентированности на КП к разрабатываемой системе предъявляется ряд требований: самоактивизация, автономность и обучаемость.

Самоактивизация. Система способна самостоятельно активизироваться по мере поступления на ее вход актуальных пространственных данных.

Автономность. Система должна выполнять действия по обработке и анализу пространственных данных и актуализации свойств модели пространственного объекта без участия эксперта и КП. Стоит отметить, что роль эксперта окончательно исключить нельзя, особенно на этапе сегментации изображения, поэтому для каждого конкретного наблюдаемого пространственного объекта эксперт создает эталонную модель этого объекта, а также ряд правил выборки при сегментации изображения, содержащего объект. Задавая таким образом набор входных данных, эксперт участвует в обучении системы.

Обучаемость. Получив на вход эталонную модель пространственного объекта и правила выборки для сегментации, система, исходя из своей внутренней структуры, приспосабливается к новым условиям поиска актуальных пространственных данных и, следовательно, к выполнению своей основной задачи.

Система позволяет представить пространственный объект в виде автономного самоактивизирующегося коллектива программных агентов, базой знаний которого является цифровая модель объекта, представленная в виде онтологии.

Среда коллектива программных агентов

Коллектив агентов характеризуется своей средой функционирования. В состав среды входят такие основные компоненты, как архив данных ДЗЗ, межагентный ресурс, модель пространственного объекта, КП и непосредственно сам коллектив агентов.

Архив данных ДЗЗ служит источником поиска актуальных изображений, содержащих целевой объект мониторинга. В качестве такого источника служит архив Региональной системы ДЗЗ Красноярского края [1, 2]. Представляет собой распределенное хранилище спутниковых данных ДЗЗ, принимаемых от разных космических аппаратов ДЗЗ, в частности Spot-4. Архив спутниковых изображений содержит данные пролетов КА в виде изображений Tiff, файлов метаданных и изображений предварительного просмотра JPEG. Архив пополняется и существует независимо от работы коллектива агентов.

Межагентный ресурс – это знания о методах и инструментах, используемых в процессе работы коллектива агентов, которые могут использовать агенты в процессе анализа пространственного объекта. Сюда относятся общие для всех агентов методы обработки данных, программные модули и компоненты, ответственные за поиск изображений, поиск объекта, анализ признаков, распознавание сообщений, передаваемых между агентами и пользователем и т.д. Каждый агент коллектива оперирует только теми инструментами, которые необходимы на его уровне решения задачи. Межагентный ресурс во многом определяет функциональность агентов и может быть дополнен или изменен разработчиком. При отсутствии доступа к межагентному ресурсу агент не способен к какому-либо анализу пространственных объектов, а следовательно, не способен решить поставленную задачу. Таким образом, к межагентному ресурсу относятся следующие элементы: компонент поиска изображения с целевым объектом, подсистема предобработки, компонент получения региона интереса, компонент сегментации изображения, подсистема анализа признаков.

Модель пространственного объекта является ядром системы и физически представлена в виде онтологической базы данных. Модель интегрирует аналитическую, растровую и картографическую модели пространственного объекта [3]. В качестве примера для тестовых испытаний системы был взят площадной объект. К объектам такого типа хорошо подходят ЗСХН.

Модель площадного или любого другого пространственного объекта рассматривается в двух аспектах: феноменологическом и структурном. Феноменологическая модель выглядит следующим образом:

$$M_{феномен.} = < x_1, x_2, ..., x_n >,$$

где $x_1, x_2, ..., x_n$ – унарные свойства объекта. К таким свойствам относятся: координаты, площадь рассчитанная, площадь введенная, периметр, кадастр, культура, хозяйство, право пользования и прочие.

Структурно такой пространственный объект включает множество унарных и бинарных отношений к реальным окружающим объектам и абстрактным объектам. Структурная модель пространственного объекта выглядит следующим образом:

$$M_{структ.} = < M_{опорн.}, (R_{AD} \cup R_K \cup R_{SI}) >,$$

где R_{AD}, R_K, R_{SI} – множество бинарных свойств аналитической, картографической и растровой моделей соответственно. $M_{опорн.}$ – множество позиционных и непозиционных характеристик объекта. В частности, к бинарным свойствам объекта относятся: «имеет название», «относится к», «расположен в регионе», «граничит с», «является частью» и т. д.

Говоря об актуализации модели площадного пространственного объекта, подразумевается два взятых для эксперимента свойства: площадь рассчитанная и периметр.

Конечный пользователь формулирует для коллектива агентов основную задачу и оценивает качество ее решения. КП выполняет роль главного инициатора работы коллектива агентов, активизирует его.

Структура программного агента

Поскольку агент всегда функционирует в некоторой среде, являющейся для него надсистемой, то структура агента, прежде всего, определяется его средой. Среда обусловливает общие для всех агентов свойства и свойства, которые их делают уникальными. Рассмотрим свойства, которые являются общими для всех агентов:

– Все агенты системы мониторинга имеют однотипную структуру.

– Поскольку всякое знание неполно, противоречиво и нечетко, то всякий агент должен обладать свойством адаптации к своему окружению, т.е. обучаться.

– Агент должен не только обладать свойством адаптации к среде, но и воздействовать на нее: он должен формулировать подзадачи для своих соседей и сообщать о результате решения этих подзадач.

– Вид и структура знаний агента является однотипной и определяется составом среды агента.

Рассмотрим более подробно элементы структуры агента.

– ***Пользователь.*** Всякий агент имеет некоторого «пользователя», который является надсистемой по отношению к агенту и потребляет результат деятельности агента. Термин «пользователь» здесь употребляется в широком смысле, т. е. речь может идти как о пользователе-человеке, так и о пользователе-агенте вышестоящего уровня.

– ***Компонент коммуникации.*** Предназначен для интерпретации внешнего представления сообщения пользователя во внутреннее представление и наоборот. Данный компонент ответственен за решение задачи коммуникации типа «агент – КП» и «агент – агент» в процессе решения поставленной задачи. Результат интерпретации сообщения помещается в базу данных агента, которому это сообщение было предназначено.

– ***Планировщик.*** Планировщик осуществляет планирование решения основной задачи системы, сформулированной выше. Текущая информация о задаче, представленная в оперативной агентной памяти, представляет собой вектор признаков анализируемого объекта и их эталонных значений. Планировщик представляет собой компонент, который структурирует поведение агента в ходе его работы.

– ***Компонент адаптации.*** Реализует возможности агента по изменению своих знаний о пространственном объекте, их пополнению или модернизации.

– ***База знаний.*** Всякий агент имеет свою базу знаний (БЗ), которая содержит его уникальные знания о среде. База знаний агента включает в себя следующие знания: знание агента о свойствах пространственного объекта; знание о средствах общения с КП и соседями представлено в виде набора эталонных сообщений, формы представления данных, основной задачи, подзадач и месте расположения данных в базе данных; знание о соседях представлено в агенте явно в виде идентификатора соседа; знание о себе характеризует назначение и структуру агента, назначение и свойства элементов структуры агента, состав и структуру знания агента, а также знание своего идентификатора; знание о структуре и составе межагентного ресурса задано агентам декларативно посредством списка идентификаторов программных компонентов, реализующих необходимые функции, содержащиеся в этом ресурсе, к которым агент может обратиться; знание о структуре оперативной агентной памяти.

– ***База данных.*** База данных (БД) агента – информационное коммуникационное поле для всех аспектов деятельности агента, содержит всю текущую информацию о функционировании агента. БД агента представляет собой лишь фрагмент общей БД коллектива агентов.

Разработанная система мониторинга целевого пространственного объекта по данным дистанционного зондирования Земли обладает свойствами активности, автономности, самоактивизации, обучаемости. Позволяет в автономном режиме анализировать свойства пространственного объекта класса земель сельскохозяйственного назначения и оказывает информационную поддержку конечному пользователю, оповещая его об отклонении свойств объекта от заданной нормы, а также оптимизирует участие эксперта в области обработки и анализа данных ДЗЗ в процессе мониторинга.

Список литературы

1. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления / Р.В. Брежнев, Ю.А. Маглинец, Е.А. Мальцев, С.Е. Перфилев, А.Ю. Сидоров, Г.М. Цибульский, А.С. Шокол // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 340–352.

2. Брежнев Р.В. Онтологическая модель представления геопространственных данных как основа информационно-поисковой среды пространственных объектов // Робототехника и искусственный интеллект: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Железногорск, 7 декабря 2012 г.) / под ред. В.А. Углева. Железногорск: Железногорский филиал СФУ, 2012. С. 154–157.

3. Brezhnev R.V., Maltsev E.A. Ontological system of geospatial object monitoring // The 11th International Conference «PATTERN RECOGNITION and IMAGE ANALYSIS: NEW INFORMATION TECHNOLOGIES» PRIA-11-2013. Vol. II. P. 395–397.

УДК 621-83:621.313.323:528.8

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Мараре скул, П. В. Авласко, Р. В. Есин,
М. Н. Ульянченко, А. В. Осипенко, К. С. Протасов
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»
e-mail: nulsapr@mail.ru

EMERGENCY OPERATION OF THE ELECTRIC DRIVES FOR THE SPACECRAFT

S. A. Bronov, N. A. Nikulin, A. V. Marareskul, P. V. Avlasko,
M. N. Ulyanchenko, A. V. Osipenko
Siberian Federal University
Krasnoyarsk State Agrarian University
e-mail: nulsapr@mail.ru

Рассмотрены методология и технология автоматизированного получения математических моделей электромеханических устройств, в том числе применяемых в космических аппаратах.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, моделирование, системы моделирования, динамический объект, электромеханическое устройство.

Проблематика проектирования надежных электромеханических систем для космических аппаратов

Для обеспечения продолжительного срока активного существования (САС) космических аппаратов (КА) на орбите необходимо на стадии проектирования анализировать возможные причины выхода из строя их систем и комплексов. К ним относятся также исполнительные электроприводы антенных установок, солнечных батарей и др.

Источниками аварийности электроприводов могут быть различные отказы – электродвигателя, системы электропитания, механической части, датчиков, электроники. Конкретные причины отказов также могут быть весьма различными. Но среди источников отказов важное место занимают электродвигатели и системы электропитания, а среди причин отказов – обрыв фазных обмоток или отсутствие некоторых питающих напряжений.

В результате возникают несимметричные режимы работы, которые могут привести к механическим ударам, разрушению аппаратуры, потере управляемости КА.

Вместе с тем некоторые виды отказов могут оказаться менее разрушительными, позволяя системам функционировать, хотя, возможно, и в неоптимальном, но все же рабочем режиме.

Для определения надежности функционирования электроприводов в случае различных отказов, возможности сохранения работоспособности и степени этой работоспособности необходимо изучать аварийные режимы исполнительных электродвигателей.

Кроме того, изучение этих режимов поможет в случае возникновения нештатных ситуаций определить причину отказа по характерным сигналам телеметрии, чтобы принять меры для исключения отказов в будущем.

Общие принципы анализа аварийных режимов работы электродвигателей

Аварийные режимы работы электродвигателей исследуются на основе их математических моделей с учетом отключения (обрыва) тех или иных фазных обмоток.

Для этого рассматриваются электрические схемы замещения с учетом схемы соединения обмоток и их отключения. Важно проанализировать не только работу в аварийном режиме, но и переход в этот режим из нормального или другого аварийного.

В результате получается математическая модель с переменной структурой. При этом необходимо обеспечить связь между переменными состояния при смене структуры. Для этого в качестве переменных состояния необходимо выбрать такие физические величины, которые сохраняют непрерывность при переключениях. Применительно к электродвигателям электромагнитными переменными состояния могут быть токи в обмотках или потокосцепления обмоток. Токи в обмотках перестают или начинают протекать, соответственно, при отключении или подключении обмотки. Поэтому токи оказываются прерывистыми при изменении конфигурации обмоток. Потокосцепления оказываются неизменными при осуществлении переключения, поэтому именно они должны быть выбраны в качестве переменных состояния. А уже через них затем следует рассчитывать токи в тех обмотках, которые продолжают нормально функционировать.

Расчет токов осуществляется с помощью соответствующих электрических схем замещения, которые получаются из исходной схемы с учетом отключения некоторых обмоток. Таким образом, должны быть созданы модели для каждого ЭМУ при различных комбинациях отключенных обмоток.

Ниже рассматривается вариант использования в качестве исполнительного двигателя – индукторного двигателя двойного питания (ИДДП), у которого имеется две трехфазных обмотки. Следовательно, число возможных конфигураций аварийных схем может быть значительным.

Исходная электрическая схема замещения ИДДП при всех подключенных к источнику питания обмотках (по схеме звезда без общего провода) приведена на рис. 1, а схема замещения для случая отключения обмотки 1а – на рис. 2.

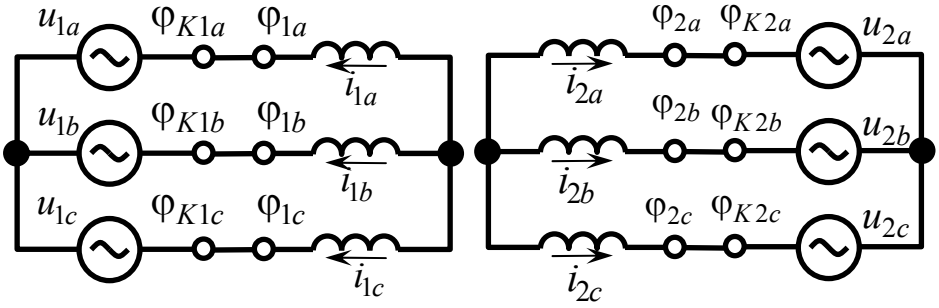


Рис. 1. Электрическая схема замещения индукторного двигателя двойного питания со всеми подключенными обмотками

На схеме (рис. 1) наряду с напряжениями питания используются потенциалы на клеммах соответствующих обмоток, которые и являются основными входными переменными. При этом используются два потенциала: выходной потенциал источника питания φ_K и входной потенциал обмотки φ.

В случае подключения обмотки (рис. 1) соответствующие потенциалы совпадают, а в случае отключения (рис. 2) – становятся разными.

ИДДП может иметь следующие комбинации отключения обмоток:

1) отключена только одна фаза одной из обмоток (6 вариантов);

2) отключено по одной фазе в каждой обмотке (9 вариантов);

3) отключение двух фаз в одной обмотке (6 вариантов);

4) отключение двух фаз в одной обмотке и одной фазы в другой обмотке (9 вариантов);

5) отключение двух фаз в каждой из обмоток (9 вариантов);

6) отключение трех фаз в одной из обмоток (2 варианта);

7) отключение трех фаз в одной обмотке и одной фазы в другой обмотке (3 варианта);

8) отключение трех фаз в одной обмотке и двух фаз в другой обмотке (6 вариантов);

9) отключение трёх фаз в обеих обмотках одновременно (1 вариант).

Таким образом, имеется всего 52 варианта отключения обмоток, которые разделяются на 9 классов схем замещения, сходных по конфигурации.

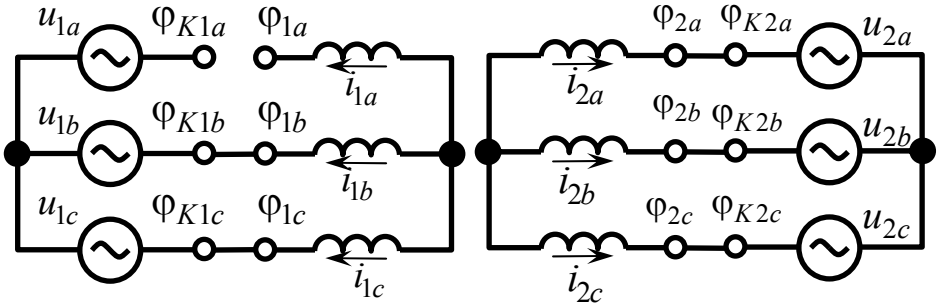


Рис. 2. Электрическая схема замещения индукторного двигателя двойного питания с отключенной обмоткой 1а

Если предположить, что возможно различное соединение обмоток (не только звезда без общего провода, но также звезда с общим проводом, треугольник, раздельное подключение обмоток к источнику питания), причем схемы соединения каждой из обмоток могут быть разными, то возникает большое число возможных сочетаний. Также можно предположить более сложные конструкции двигателя с другим числом фаз и даже с разным числом фаз для первой и второй обмоток.

Разработка таких вариантов моделей может выполняться вручную, а может – с помощью символьных процессоров, как это делается для моделей в нормальном режиме работы.

В рассмотренном случае схемы соединения обмоток «звезда без общего провода» целесообразно разработать одну модель для каждой схемы замещения с возможностью ее трансформации в зависимости от того, какие именно фазы отключены. Так же можно поступить и при других схемах соединения обмоток.

Заключение

Исследование аварийных режимов работы индукторного двигателя двойного питания позволит определить возможность и границы допустимого функционирования электропривода, связанные с отключением фазных обмоток или пропаданием соответствующих напряжений питания, что повысит надежность проектирования.

Список литературы

1. Комплекс математических моделей индукторного электропривода двойного питания / С.А. Бронов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев, А.В. Мараскул, Н.А. Никулин, Р.А. Ермаков, С.Ю. Липунова, С.В. Черешкевич, В.П. Усов, А.Г. Рубан, Д.Д. Мищенко, Ю.С. Сергеева, Д.Л. Жукова // Электроприводы переменного тока: тр. междунар. пятнадцатой науч.-техн. конф., 12–16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. С. 135–138.

УДК 621-83:621.313.323:528.8

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Мараскул, П. В. Авласко, Д. Д. Мищенко,
Р. М. Никитин, А. А. Бисов, Р. В. Есин, М. Н. Ульянченко
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»
e-mail: nulsapr@mail.ru

ELECTRIC DRIVES OF SPACECRAFT FOR EARTH REMOTE SENSING

S.A. Bronov, N. A. Nikulin, A. V. Marareskul, P. V. Avlasko, D. D. Mishcnenko,
R. M. Nikitin, A. A. Bisov, R. V. Esin, M. N. Ulyanchenko
Siberian Federal University
Krasnoyarsk State Agrarian University
e-mail: nulsapr@mail.ru

Рассмотрены возможности построения электроприводов на основе индукторных двигателей двойного питания с учетом многообразия возможных способов управления и принципов построения.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, электромеханическая система, электропривод, индукторный двигатель двойного питания.

Электромеханические исполнительные системы космических аппаратов

Работоспособность космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли в значительной степени обеспечивается нормальным функционированием исполнительных устройств, включая системы поворота антенн, системы поворота солнечных батарей, системы охлаждения, системы позиционирования измерительной аппаратуры и ряд других. Как правило, эти системы являются электронными и электромеханическими. К этим системам и их элементам предъявляются повышенные требования по точности поддержания скорости перемещения, точности отработки углов поворота, надежности функционирования и другим параметрам.

Стремление удовлетворить этим требованиям в значительной степени влияет на выбор исполнительных двигателей. В настоящее время в КА используются, как правило, синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) или синхронные двигатели с электромагнитной редукцией (СДЭР) [1].

Несмотря на различия в конструкции, оба типа двигателей имеют схожие способы управления и принципы построения электроприводов. Основное объединяющее их свойство связано с тем, что угловая скорость вращения прямо пропорциональна частоте напряжения питания обмотки. Поскольку исполнительные электроприводы работают, как правило, с малыми скоростями, частоты питания также должны быть малыми. Питание электродвигателей осуществляется импульсными напряжениями, а это приводит к тому, что на так называемых «ползучих скоростях» при очень малой частоте питания двигатель начинает перемещаться скачками – «шагать», так как токи в обмотках становятся импульсными. Чтобы избежать этого, приходится применять механические редукторы с большим передаточным числом (тогда скорость электродвигателя и частота питающих напряжений могут быть сравнительно большими), что позволяет обеспечить более плавное вращение ротора, но снижает

точность и надежность электропривода, так как механические детали всегда обладают дополнительными погрешностями, трением и повышают возможность отказа.

С точки зрения обеспечения плавности вращения перспективным является индукторный двигатель двойного питания (ИДДП) [2, 3], у которого на статоре располагаются две многофазные обмотки, питаемые двумя напряжениями переменного тока со своими частотами. При этом угловая скорость двигателя определяется их разностью:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{Z_r}, \quad (1)$$

где ω_r – угловая скорость вала двигателя; ω_1, ω_2 – угловые частоты первого и второго питающих напряжений; Z_r – коэффициент электромагнитной редукции.

Чтобы обеспечить низкую угловую скорость ротора, достаточно выбрать малую разность частот, в то время как сами частоты могут быть большими, что и обеспечивает гладкость (синусоидальность) токов в обмотках и связанную с этим плавность вращения ротора.

Для ИДДП необходимо разрабатывать новые типы электроприводов, поскольку имеется два канала воздействия на электродвигатель – по первой и второй обмоткам.

При этом различают способы управления и принципы построения электропривода. Под способом управления понимают способ воздействия на параметры вращения электродвигателя (скорость, угол поворота, электромагнитный момент, угол нагрузки, токи), а под принципом построения электропривода – наличие тех или иных датчиков, регуляторов, связей между ними, законов работы регуляторов.

Способы управления индукторными двигателями двойного питания

Управление ИДДП может осуществляться изменением четырех параметров: частоты, амплитуды, фазы и формы питающих напряжений. Поскольку имеется два напряжения, для управления могут использоваться восемь параметров.

Исходя из принципа работы ИДДП, можно выделить следующие способы управления с использованием перечисленных параметров питающих напряжений: частотный, амплитудный, фазный и геометрический.

При изменении частот непосредственно меняется угловая скорость ротора ИДДП в соответствии с формулой (1). Для получения требуемой угловой скорости необходимо выдерживать необходимую разность частот, для чего можно использовать следующие варианты изменения частот:

1) сохранять одну частоту всегда неизменной (номинальной), изменяя вторую частоту относительно первой, в частности:

– при увеличении положительной скорости сохранять неизменной (номинальной) частоту ω_2 и увеличивать частоту ω_1;

– при увеличении отрицательной скорости сохранять неизменной (номинальной) частоту ω_1 и увеличивать частоту ω_2;

– при уменьшении положительной скорости сохранять неизменной (номинальной) частоту ω_2 и уменьшать частоту;

– при уменьшении отрицательной скорости сохранять неизменной (номинальной) частоту ω_1 и уменьшать частоту ω_2;

2) изменять обе частоты, одновременно увеличивая их;

3) изменять обе частоты, одновременно уменьшая их;

4) изменять обе частоты, уменьшая одну и увеличивая другую.

Изменение частоты приводит к тому, что меняется ток в обмотках, так как в цепях переменного тока амплитуда тока обратно пропорциональна частоте. С точки зрения минимизации потерь в двигателе желательно, чтобы в установившемся режиме (при неизменной скорости) амплитуды питающих напряжений были как можно меньше, а в переходных режимах – как можно больше. В целом требуется изменять амплитуды напряжений одновременно с изменением их частот.

При этом возможны следующие варианты:

1) изменяются амплитуды тех напряжений, чьи частоты изменяются;

2) изменяются частота одного напряжения и амплитуды обоих напряжений;

3) изменяются частота одного напряжения и амплитуда другого.

Существует ограничение на увеличение амплитуды напряжения, что связано с конструкцией источника электропитания (как правило, инвертора напряжения), т. е. амплитуду проще уменьшать, чем увеличивать. Поэтому в целом можно считать, что при выборе алгоритма частотного управления лучше стараться уменьшать частоты (и одновременно амплитуды), чем увеличивать.

Фазное управление связано с изменением текущего значения фазового сдвига одновременно всех фазных напряжений одной системы для каждой обмотки. Это позволяет регулировать угол поворота дополнительно к тому, что он изменяется из-за действия разности частот. В данном случае, как и при частотном управлении, возможны такие же сочетания изменяемых параметров.

Под геометрическим управлением понимается форма питающего напряжения: как правило, используется широтно-импульсная модуляция, при которой формируются импульсы напряжения одинаковой амплитуды и частоты, но ширина импульса пропорциональна мгновенному значению напряжения в соответствующий момент времени. В этом случае в обмотках формируется ток синусоидальной (квазисинусоидальной) формы. Геометрическое управление означает, что при этом можно динамически менять геометрию импульсов: число импульсов на периоде эквивалентной синусоиды, ширину очередного импульса и т. д. Всё это также влияет на угловую скорость, угол поворота и электромагнитный момент двигателя.

Таким образом, существует большое число возможных законов управления ИДДП, что и затрудняет их выбор при построении электроприводов. Необходимо выполнить исследования, которые позволят определить для каждого режима работы наиболее адекватный способ управления.

Принципы построения электроприводов с индукторными двигателями двойного питания

Способ управления электродвигателем существенно влияет на структуру всего электропривода в целом, но всё же один и тот же способ управления может применяться в различных типах электроприводов.

Варианты систем электропривода с ИДДП весьма многочисленны: это как аналоги известных систем электропривода (применяемых для других электродвигателей с питанием по одной обмотке), так и оригинальные системы, учитывающие наличие двух каналов управления (по двум обмоткам).

Все варианты электроприводов можно разделить на разомкнутые (без обратной связи) и замкнутые (с обратной связью).

В электроприводах с ИДДП разомкнутые системы могут найти более широкое применение, так как позволяют обеспечить режимы работы, которые при одинарном питании возможны только в замкнутых системах. В частности, режим позиционирования (поворота вала двигателя на заданный угол) в традиционных электродвигателях возможен только с обратной связью по углу поворота

и соответствующим датчиком, так как без него при подаче напряжения питания двигатель начнет вращаться, а момент, когда необходимо отключить питание (чтобы он остановился), невозможно определить без датчика положения. В ИДДП при одинаковых частотах питания двигатель неподвижен. При фазном управлении изменение фаз приводит к соответствующему изменению углового положения ротора, т. е. ИДДП работает как шаговый двигатель, которому для поворота на заданный угол достаточно изменить на соответствующую величину фазу питающего напряжения. Датчик положения здесь не является функционально необходимым элементом и может служить для других целей управления.

Классическими системами управления являются системы с одной главной обратной связью по регулируемой координате (скорости или углу поворота), системы подчиненного регулирования (когда внутренние контуры обратной связи охватываются более внешними контурами), с обратными связями по всем переменным состояния (токи, скорость, угол поворота).

Специфическими системами электропривода с ИДДП являются системы с регулированием угла нагрузки, с математической моделью в качестве датчика, с оптимизацией по различным критериям (минимум потерь в проводах обмоток, минимум времени переходного процесса, минимум колебательности и т. п.) и др.

Сочетание способов управления и принципов построения систем управления дает очень большое число вариантов реализации электропривода, что, с одной стороны, позволяет получить желаемые характеристики исполнительных механизмов, но с другой – создает сложности проектирования ввиду слабой изученности этих возможностей.

Заключение

Многообразие возможностей управления ИДДП ставит задачу сравнительного анализа различных способов управления для определения области их предпочтительного применения и достигаемых результатов.

Список литературы

1. Проблема безопасности автономных космических аппаратов: монография / С.А. Бронов, М.А. Воловик, Е.Н. Головенкин, Г.Д. Кессельман, Е.Н. Корчагин, Б.П. Соустин. Красноярск: НИИ ИПУ, 2000. 285 с.

2. Электромеханические системы космических аппаратов и автоматизация их проектирования / С.А. Бронов, Е.М. Курбатов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев // Журнал СФУ. Сер. Техника и технологии. 2012. № 2 (5). С. 191–204.

3. Управление индукторными двигателями двойного питания в позиционных электроприводах космических аппаратов / С.А. Бронов, П.В. Авласко, А.В. Мараскул, В.А. Поваляев, В.П. Усов, В.С. Куповых // Авиакосмическое приборостроение. 2010. № 9. С. 34–40.

4. Бронов С.А. Электропривод для приборов с индукторным двигателем двойного питания в квазишаговом режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 4. С. 61–65.

5. Комплекс математических моделей индукторного электропривода двойного питания / С.А. Бронов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев, А.В. Мараскул, Н.А. Никулин, Р.А. Ермаков, С.Ю. Липунова, С.В. Черешкевич, В.П. Усов, А.Г. Рубан, Д.Д. Мищенко, Ю.С. Сергеева, Д.Л. Жукова // Электроприводы переменного тока: тр. междунар. пятнадцатой науч.-техн. конф., 12–16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. С. 135–138.

УДК 621-83:621.313.323:528.8

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Мараскул, П. В. Авласко, Д. Д. Мищенко,
Р. М. Никитин, А. А. Бисов, Р. В. Есин, М. Н. Ульянченко
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»
e-mail: nulsapr@mail.ru

SIMULATION SYSTEM FOR PRECISION DYNAMIC OBJECTS

S. A. Bronov, N. A. Nikulin, A. V. Marareskul, P. V. Avlasko, D. D. Mishcnenko,
R. M. Nikitin, A. A. Bisov, R. V. Esin, M. N. Ulyanchenko
Siberian Federal University
Krasnoyarsk State Agrarian University
e-mail: nulsapr@mail.ru

Рассмотрены возможности построения систем моделирования нового типа, обладающих свойствами адаптации структуры и параметров моделирования в процессе расчетов для обеспечения оптимального сочетания погрешности и скорости вычислений.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, моделирование, системы моделирования, динамический объект.

Проблематика моделирования прецизионных динамических объектов

В современных космических аппаратах (КА) для дистанционного зондирования Земли широко применяются электронные, механические и электромеханические системы, отличающиеся повышенной точностью. При их проектировании требуется моделирование различных режимов работы.

Модели таких объектов представляют собой системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которые решаются численными методами.

Известно большое число программ для моделирования таких объектов. Типичным представителем их является SIMULINK в составе универсальной программы Matlab.

Все системы моделирования содержат следующие части: библиотеку моделей (в том числе создаваемых пользователем), библиотеку методов расчета, подсистему формирования системы из отдельных модулей, подсистему формирования алгоритма расчета в зависимости от используемых модулей, подсистему визуализации результатов. В некоторых случаях существует возможность выбора отдельных расчетных методов, например для численного интегрирования, из числа имеющихся в библиотеке.

В процессе моделирования выполняются расчеты в соответствии с тем математическим аппаратом, который использован при написании моделей: для дифференциальных уравнений используются методы численного интегрирования, для алгебраических уравнений – методы решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений.

Моделирование характеризуется двумя наиболее важными показателями: временем счета и погрешностью вычислений. Часто эти показатели взаимосвязаны. Чтобы обеспечить малое время счета, используют сравнительно простые модели и методы вычислений, что приводит к снижению точности. Напротив, для повышения точности усложняют модели (учитывая большее число явлений) и выбирают сложные методы расчета, что приводит к увеличению времени счета.

При моделировании замкнутых систем электропривода с обратными связями для прецизионных исполнительных устройств КА время счета может занимать много часов и даже дней. Если выполняется один расчет, то это не представляет особых проблем, но когда в процессе проектирования требуется выполнить расчеты сотен вариантов, такое положение оказывается неприемлемым. Таким образом, существует научная и инженерная проблема одновременного повышения точности вычислений и уменьшения времени счета.

Основные принципы построения систем моделирования с переменной структурой

Для того чтобы разрешить противоречие между временем счета и точностью вычислений, необходимо проанализировать процесс моделирования типовых динамических систем с повышенными требованиями по точности.

Моделирование может выполняться для различных режимов работы с различными целями.

В установившемся (квазиустановившемся) режиме переменные состояния остаются постоянными или меняются незначительно. Это означает, что многие дифференциальные уравнения фактически становятся алгебраическими и расчет производных (иногда по сложным нелинейным выражениям) излишне увеличивает время счета, не приводя к какому-либо выигрышу с точки зрения точности.

В динамических режимах (на примере электропривода) можно выделить несколько этапов: разгон, поддержание точных параметров движения, выход на конечный режим (по скорости, углу поворота) с требуемой (как правило, высокой) точностью.

В случае разгона все переменные состояния меняются значительно, но точность их расчета не имеет существенного значения (например, типичная погрешность 10…15 % оказывается вполне приемлемой).

В случае поддержания движения с высокой точностью и наличием внешних возмущающих воздействий некоторые переменные состояния почти не меняются (и погрешность их расчета может быть сравнительно большой), а изменение некоторых является критичным с точки зрения точности регулирования (и их необходимо рассчитывать возможно более точно).

В случае подхода к заданному значению (скорости, угла поворота) первоочередной задачей является повышение точности вычислений, так как, например, при погрешности позиционирования порядка 0,1 % погрешность вычислений даже 5 % (считающаяся весьма хорошей для других режимов) оказывается абсолютно неприемлемой.

Погрешность вычислений и время счета полностью определяются тремя факторами:

1) сложностью математической модели отдельных элементов (степенью их детализации, и, соответственно, числом уравнений и видом нелинейностей) и всей системы (включая наличие обратных связей);

2) применяемыми методами вычислений;

3) режимом работы, т. е. видом процесса (характером изменения переменных состояния).

Первые два фактора взаимосвязаны: для дифференциальных моделей выбираются методы численного интегрирования, а для алгебраических моделей – соответствующие методы их расчета.

Существующие системы моделирования обладают тем свойством, что они позволяют выбрать любые модели и любые методы вычислений, но они остаются

неизменными в процессе моделирования: в крайнем случае при численном интегрировании может автоматически меняться шаг интегрирования.

А в соответствии с третьим фактором для каждого режима работы следует использовать свое оптимальное сочетание моделей и методов. Например, в установившемся режиме можно применять алгебраические модели, а в переходных режимах – дифференциальные.

Таким образом, основная идея заключается в том, чтобы создать систему моделирования с переменной структурой.

Под структурой в данном случае понимается не только структура моделируемого объекта, но и структура расчетной (моделирующей) части системы.

Моделирующая часть содержит алгоритм последовательного выполнения расчетов, который должен предусматривать возможность изменения методов в зависимости от различных обстоятельств.

Принципы функционирования системы моделирования предлагаемого типа в обобщенном виде следующие.

Библиотека моделей содержит не одну модель для каждого элемента системы, а комплекс моделей различной степени детализации.

В процессе моделирования тем или иным способом определяется характер текущего процесса и для него выбираются модели требуемой степени детализации. Соответственно моделям выбираются методы вычислений. При изменении характера процессов моделирование останавливается и происходит изменение моделей некоторых элементов, заново формируется моделируемая система и для нее выбираются методы вычислений. Так происходит при каждом существенном изменении характера процессов.

Контроль за выбором моделей осуществляет специальная подсистема управления моделированием. С этой точки зрения система моделирования становится объектом управления и к ней применяются все понятия, характерные для систем автоматического управления (рис. 1).

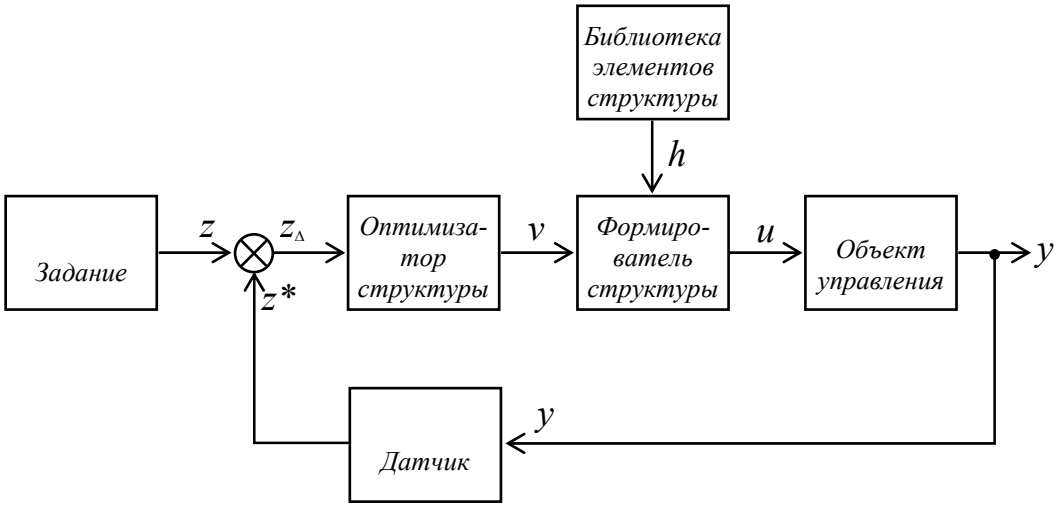


Рис. 1. Система моделирования как объект управления в системе автоматического управления с обратной связью

На рис. 1 блок *Задание* задает цель моделирования: рассчитываемые переменные, режим работы, целевую функцию (минимум погрешности или минимум времени вычислений, оптимум или др.).

Объектом управления является комплекс, содержащий модели моделируемой системы, а также методы вычислений с учетом связей между ними (между моделями и между методами и моделями).

Библиотека элементов структуры содержит все модели (для каждого элемента – комплекс моделей различной степени детализации и, соответственно, сложности), а также все методы.

Формирователь структуры представляет собой подсистему, аналогичную существующим в Matlab (SIMULINK), выполняющую увязку между собой модулей (моделей отдельных элементов) и методов вычислений. Но его отличие от существующих подсистем в том, что он работает динамически, переформировывая систему моделирования (вместе с моделируемым объектом) в каждом случае, когда это оказывается необходимым. Кроме того, в данном случае *Формирователь структуры* обеспечивает связь между последовательными структурами через соответствующие значения переменных состояния.

Оптимизатор структуры определяет состав системы моделирования (включая моделируемый объект) с учетом задания и текущего характера процессов. Его решения являются указанием для *Формирователя структуры*.

Датчик измеряет текущие значения и характер изменения переменных состояния, а также вспомогательные расчетные параметры, появляющиеся в процессе моделирования, по которым оценивает качественные показатели процесса моделирования.

Блок сравнения сравнивает информацию от *Блока задания* и с выхода *Датчика* и определяет отклонение z_Δ реального (точнее, измеренного) качества моделирования $z*$ от желаемого z.

Обобщенность представления системы моделирования на рис. 1 должна быть далее осмыслена и конкретизирована.

При таком подходе предполагается, что должна быть создана математическая модель процесса моделирования – метамодель. В настоящее время такой подход является оригинальным и неразработанным. Возникает целый ряд проблем, связанных с выбором математического описания процесса моделирования и элементов системы моделирования, выбора целевой функции (для структурной оптимизации), определение функциональных связей между целевой функцией и структурой системы моделирования, обеспечением неразрывности вычисляемых переменных при изменении структуры и др.

Заключение

Предлагаемый подход к построению системы моделирования представляется весьма перспективным и реализуемым, способным существенно повысить качество моделирования. Развитие данного подхода должно привести к появлению нового класса систем моделирования с переменной структурой и элементами искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Проблема безопасности автономных космических аппаратов: монография / С.А. Бронов, М.А. Воловик, Е.Н. Головенкин, Г.Д. Кессельман, Е.Н. Корчагин, Б.П. Соустин. Красноярск: НИИ ИПУ, 2000. 285 с.

2. Электромеханические системы космических аппаратов и автоматизация их проектирования / С.А. Бронов, Е.М. Курбатов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев // Журнал СФУ. Сер. Техника и технологии. 2012. № 2 (5). С. 191–204.

УДК 621-83:621.313.323:528.8

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Мараскул, П. В. Авласко, Д. Д. Мищенко,
Р. М. Никитин, А. А. Бисов, Р. В. Есин, М. Н. Ульянченко, М. И. Доровская,
В. С. Тимощук, К. С. Протасов, О. В. Осипенко
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»
e-mail: nulsapr@mail.ru

MATHEMATICAL MODELS OF THE ELECTROMOTORS FOR SPACECRAFT

S. A. Bronov, N. A. Nikulin, A. V. Marareskul, P. V. Avlasko, D. D. Mishcnenko,
R. M. Nikitin, A. A. Bisov, R. V. Esin, M. N. Ulyanchenko, M. I. Dorovskaya,
V. S. Timoshchuk, K. S. Protasov
Siberian Federal University
Krasnoyarsk State Agrarian University
e-mail: nulsapr@mail.ru

Рассмотрены методология и технология автоматизированного получения математических моделей электромеханических устройств, в том числе применяемых в космических аппаратах.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, моделирование, системы моделирования, динамический объект, электромеханическое устройство.

Проблематика проектирования электромеханических систем

В исполнительных электроприводах космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли применяют электромеханические устройства (ЭМУ) различного типа – электродвигатели, тахогенераторы, вращающиеся трансформаторы и др. Процесс проектирования обязательно сопровождается моделированием и требует создания математических моделей всех элементов электропривода, в том числе ЭМУ.

В настоящее время существует хорошо проработанная методология математического моделирования ЭМУ, основанная на применении теории электрических цепей. Она предусматривает представление любого ЭМУ в виде двух схем замещения – электрической и геометрической. Электрическая схема замещения представляет собой совокупность электрических контуров, содержащих простейшие элементы электрической цепи – резисторы, катушки индуктивностей и источники э.д.с. Контуров столько, сколько обмоток имеется у ЭМУ. Геометрическая схема замещения передает расположение обмоток и углы между ними. Постоянные магниты представляются с помощью магнитных потокосцеплений, пронизывающих обмотки и создающих в них соответствующие э.д.с. взаимной индукции.

Существует несколько форм математических моделей ЭМУ, которые предназначены для решения соответствующих задач проектирования. Получение и преобразование математических моделей выполняется вручную и представляет в ряде случаев сложный процесс, связанный с выполнением большого числа элементарных действий с индексированными переменными, тригонометрическими функциями и углами поворота.

В то же время существует технология преобразования математических выражений с помощью символьных процессоров, входящих в состав универсальных математических пакетов (в частности, MathCAD, Matlab, Maple и др.). Важно при этом разработать универсальные алгоритмы, которые обеспечат все требуемые преобразования в рамках разработки математических моделей ЭМУ различного вида.

Основные принципы автоматизации получения математических моделей электромеханических устройств

Виды моделей зависят от следующих факторов.

1. Тип двигателя: синхронный, асинхронный, двигатель двойного питания.
2. Постоянные магниты: постоянные магниты имеются на статоре, постоянные магниты имеются на роторе, постоянных магнитов нет.
3. Тип модели: нелинейная модель, линеаризованная модель.
4. Система координат: исходная, связанная со статором, связанная с ротором, связанная с вектором переменных состояния (потокосцеплением статора, током статора, потокосцеплением ротора, током ротора, напряжением питания статора, напряжением питания ротора).
5. Переменные состояния: потокосцепления (статора и ротора), токи (статора и ротора), потокосцепления статора и токи ротора, токи статора и потокосцепления ротора.
6. Схема соединения обмоток: раздельное подключение к источнику питания, звезда без общего провода, звезда с общим проводом, треугольник (различные комбинации для статора и ротора).
7. Допущения: реальные параметры (у каждой обмотки – собственные), косинусоидальность индуктивностей и потокосцеплений от постоянных магнитов, электрическая симметрия, геометрическая симметрия.
8. Дополнительные допущения: пренебрежение активным сопротивлением обмоток, пренебрежение взаимным влиянием статорных и роторных обмоток, пренебрежение отдельными составляющими математических моделей.

Можно выделить следующие варианты математических моделей:

1) исходные выражения;

2) преобразованные выражения.

Методологической основой автоматизированного получения математических моделей ЭМУ является матричная форма записи, которая позволяет формализовать представление моделей ЭМУ и сделать его универсальным.

Исходные выражения полностью определяют конструкцию ЭМУ (число обмоток, число фаз, наличие постоянных магнитов, число пар полюсов и т. п.).

Преобразованные выражения представляют собой результат сочетания всех условий из перечисленных выше, что представляет собой очень большое число (сотни) возможных вариантов моделей.

Математический аппарат автоматизированного формирования моделей ЭМУ

На основе электрической схемы замещения уравнения электрического равновесия могут быть представлены в матричной форме:

$$\frac{d\,\overline{\boldsymbol{\psi}}(t)}{dt} = -\mathbf{R}\cdot\bar{\mathbf{i}}(t) + \overline{\mathbf{u}}(t)\,, \qquad (1)$$

где $\bar{\mathbf{u}}(t)=\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_n(t) \end{bmatrix}$ – вектор питающих напряжений; $\bar{\mathbf{i}}(t)=\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ \dots \\ i_n(t) \end{bmatrix}$ – вектор токов обмоток; $\bar{\boldsymbol{\psi}}(t)=\begin{bmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t) \\ \dots \\ \psi_n(t) \end{bmatrix}$ – вектор потокосцеплений обмоток; $\mathbf{R}=\begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_n \end{bmatrix}$ – матрица активных сопротивлений обмоток; t – время.

Уравнение электромагнитной связи обмоток:

$$\bar{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{L}\left[\theta_r(t)\right]\cdot\bar{\mathbf{i}}(t) + \bar{\boldsymbol{\psi}}_{\mu}\left[\theta_r(t)\right], \tag{2}$$

где $\mathbf{L}$ – матрица индуктивностей обмоток; $\bar{\boldsymbol{\psi}}_{\mu}$ – вектор потокосцеплений от постоянных магнитов; θ_r – угол поворота ротора.

Составляющие матрицы индуктивностей:

$$l_{j,k} = f_{Lj,k}(\theta_{j,k},\theta_r,t), \tag{3}$$

где $f_{Lj,k}$ – функциональная зависимость соответствующих индуктивностей; $\theta_{j,k}$ – угол между обмотками j и k.

Составляющие вектора потокосцеплений от постоянных магнитов (при их наличии):

$$\psi_{\mu k} = f_{\mu k}(\theta_k,\theta_r,t), \tag{4}$$

где θ_k – угол размещения обмотки, с которой связано потокосцепление от постоянных магнитов.

Выражение (1) с учетом (2)–(4) представляют собой модель преобразования механической энергии в электромагнитную.

Для отражения обратного процесса преобразования электромагнитной энергии в механическую записывается следующая система уравнения:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\omega_r(t)}{dt} &= \frac{1}{J}\left[M(t)+M_{st}(t)\right]; \\ \frac{d\theta_r(t)}{dt} &= \omega_r(t), \end{aligned}\right\}, \tag{5}$$

где ω_r – угловая скорость ротора двигателя; J – момент инерции вращающихся частей; M_{st} – статический момент нагрузки; электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{1}{2}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta_r}\left[\bar{\boldsymbol{\psi}}^T(\theta_r)\cdot\bar{\mathbf{i}}(t)\right] = \frac{1}{2}\cdot\frac{\partial\bar{\boldsymbol{\psi}}^T(\theta_r)}{\partial\theta_r}\cdot\bar{\mathbf{i}}(t), \tag{6}$$

где знак T означает транспонирование.

Конструкция конкретного типа ЭМУ полностью определяется составом матриц и векторов, а также выражениями (3) и (4), выражения (1), (2), (5) и (6) являются универсальными и общими для всех типов ЭМУ.

Как правило, исходная модель в форме (1)–(6) не позволяет производить расчеты, поэтому необходимо ее преобразовать с учетом рассмотренных выше условий 1–8. Все преобразования можно выполнять в матричной форме.

В общем случае модель (1)–(6) является нелинейной ввиду наличия операции перемножения в выражении (6), и ряд преобразований выполняется для получения нелинейных моделей в другой форме или при конкретных допущениях. Если требуются

линеаризованные модели (например, чтобы осуществлять синтез регуляторов на основе известных методов классической теории автоматического управления), нелинейные модели раскладывают в ряд Тейлора и выделяют линейную часть, после чего модель может быть преобразована в форму передаточных функций, частотных характеристик и т. п.

Обобщенный алгоритм автоматизированного формирования моделей ЭМУ включает Задание исходных выражений для конкретного типа ЭМУ, Задание вида конечных моделей и Задание формы конечной модели (рис. 1).

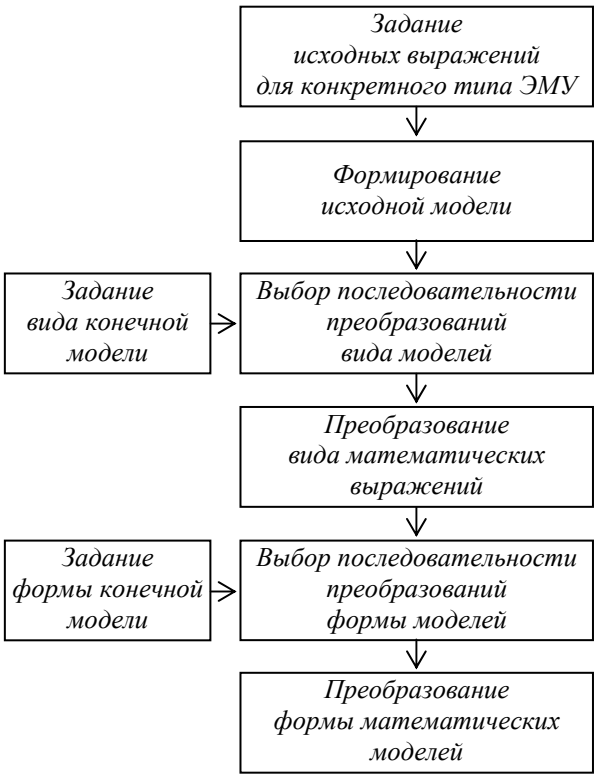


Рис. 1. Обобщённый алгоритм автоматического формирования математических моделей ЭМУ

С учетом этих заданий программой выбираются процедуры для выполнения соответствующих символьных выкладок (эти процедуры разрабатываются и собираются в специальной библиотеке), которые выстраиваются в соответствующей последовательности.

Заключение

Предложенная технология обеспечит применение методов автоматизированного проектирования не только на стадии использования готовых моделей, но и на стадии формирования математических моделей любого желаемого вида в любой желаемой форме. В настоящее время разработаны цепочки преобразования отдельных видов моделей отдельных типов ЭМУ [1] и получены математические модели как известные из литературы, так и новые.

Список литературы

1. Комплекс математических моделей индукторного электропривода двойного питания / С.А. Бронов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев, А.В. Мараскул, Н.А. Никулин, Р.А. Ермаков, С.Ю. Липунова, С.В. Черешкевич, В.П. Усов, А.Г. Рубан, Д.Д. Мищенко, Ю.С. Сергеева, Д.Л. Жукова // Электроприводы переменного тока: тр. междунар. пятнадцатой науч.-техн. конф., 12–16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. С. 135–138.

УДК 621.396.962.3

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИЁМНИКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В. М. Владимиров[(1)], В. Б. Кашкин[(2)], Я. И. Сенченко[(2)]
[(1)]Красноярский научный центр СО РАН
[(2)]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
e-mail: yanasenchenko@mail.ru

MODERNIZATION OF THE ATMOSPHERIC VERTICAL PROFILING RADAR

V. M. Vladimirov[(1)], V. B. Kashkin[(2)], Y. I. Senchenko[(2)]
[(1)]Krasnoyarsk Scientific Center
[(2)]Siberian Federal University
School of Engineering Physics and Radio Electronics
e-mail: yanasenchenko@mail.ru

В статье рассмотрена радиолокационная система вертикального профилирования атмосферы диапазона ультракоротких волн. Предложено провести модернизацию приемника радара, используя PCI Express плату фирмы PENTEK семейства Cobalt с встроенной программируемой логической интегральной схемой Virtex-6 фирмы Xilinx. Рассмотрены основные преимущества выбранной PCI Express платы. Описана структура обновленного Мезосферно-стратосферно-тропосферного радара.

Ключевые слова: дистанционные методы зондирования атмосферы, измерение скорости и направления ветра, вертикальный профиль атмосферы.

Введение

Радиотехнические методы исследования атмосферы Земли имеют уже почти вековую историю и обеспечивают оперативное измерение ее параметров, таких как температура, влажность, давление, а также скорость и направление ветра. Информация о турбулентности, порывах и сдвигах ветра чрезвычайно важна для большого числа потребителей от метеослужб аэропортов до любого человека, который планирует выйти из дома. Известно, что в последнее время участились случаи авиакатастроф, связанных с тем, что пилоты не справляются с управлением из-за неблагоприятных метеоусловий, таких как сдвиг ветра, вихри, турбулентные и струйные течения. Наиболее вероятно, это происходит из-за некорректной оценки ветрового поля, полученной с помощью радиозонда, выпускаемого всего несколько раз в день. Картина ветрового поля может сильно измениться за несколько минут, поэтому оперативное (т.е. в режиме реального времени) измерение скорости и направления ветра на разных высотах является актуальной задачей в области метеорологии и авиации и необходимой для безаварийной работы аэродромов и космодромов. Существует множество устройств дистанционного зондирования, работающих в пограничном слое атмосферы до высоты 1 км, в то время как наибольший интерес представляют стратосферные и мезосферные высоты. В 2007 году в Красноярском научном центре СО РАН началась разработка радиолокационной станции диапазона ультракоротких волн, функционирующей в диапазоне высот от 0,3 до 25 км и от 50 до 100 км. Мезосферно-стратосферно-тропосферный (МСТ) радар предназначен для исследования ветровых и температурных полей, турбулентности, процессов зарождения и распространения акустических гравитационных волн. К 2009 году был

создан фрагмент МСТ-радара, результаты исследования которого более подробно представлены в [1].

Модернизация приёмника радиолокационной станции вертикального профиля атмосферы

На сегодняшний день в целях повышения конкурентоспособности поставлена задача по модернизации аппаратного и программного обеспечения радиолокационной станции вертикального зондирования атмосферы. Необходимость осуществления модернизации обусловлена рядом причин. Во-первых, невозможностью приобретения устаревшей элементной базы для плановой замены вследствие прекращения ее выпуска. Во-вторых, сложность взаимодействия аппаратуры с современным программным обеспечением, используемым для обработки данных и извлечения полезной информации. В-третьих, низкая мобильность, связанная с большими массогабаритными показателями, и высокая стоимость элементов системы.

Благодаря высокотехнологическому развитию элементной базы и стремительному росту вычислительных возможностей компьютерной техники появилась возможность значительно улучшить существующую радиолокационную систему. Модернизация МСТ-радара связана с решением определенного рода задач, таких как уменьшение нижней границы измерения параметров, увеличение разрешающей способности по дальности и по скорости, повышение верхней границы обзора радара. Одним из перспективных направлений при выполнении модернизации считается применение программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В качестве основного элемента обновленного приемника МСТ-радара выбрана ПЛИС семейства Cobalt компании PENTEK, модель 78661 [2].

Данная модель является PCI Express (PCIe)-платой высокой производительности на основе ПЛИС Virtex-6 фирмы Xilinx. Плата PCIe, которую можно устанавливать в материнскую плату любого компьютера, включает в себя многоканальный, высокоскоростной преобразователь данных, который подходит для подключения к высокочастотным портам системы связи или радара. Его встроенная функция захвата данных предлагает идеальное решение под ключ. Она включает в себя четыре аналого-цифровых преобразователя (АЦП), а также четыре банка памяти. Частота выборки АЦП равна 200 МГц. Модель 78661 включает в себя дополнительный разъем общего назначения для конкретного приложения ввода/вывода в дополнение к поддержке PCI Express. Virtex-6 представляет собой идеальное решение для выполнения функций модуляции/демодуляции, кодирования/декодирования, шифрования/дешифрования и формирования каналов данных при передаче и приеме сигналов. Модель Cobalt PENTEK выпускается с предварительной настройкой. В ней имеется набор встроенных функций для цифрового понижающего преобразования, захвата данных, синхронизации, выставления временных меток и форматирования.

На рис. 1 представлена структурная схема приемника до проведения модернизации. Цифровая обработка сигналов для оценки ветрового поля осуществляется оператором ПК после записи радиолокационных сигналов на жесткий диск компьютера. Оператор ПК накапливает данные и обрабатывает в течение определенного времени, что снижает оперативность получения ветрового профиля атмосферы.

После проведения модернизации функциональная схема приемника радара вертикального профилирования атмосферы принимает вид, показанный на рис. 2. Применение ПЛИС фирмы Xilinx позволяет реализовать обработку данных в режиме реального времени. До модернизации сигналы с антенн через радиочастотный тракт (РЧ-тракт) и АЦП записывались на жесткий диск, затем проводилась цифровая обработка сигналов (ЦОС) и выделение полезной информации в виде вектора скорости.

После модернизации вся предварительная обработка на компьютере, включая оцифровку, демодуляцию, фильтрацию, выделение доплеровского сдвига частоты и расчет зональной, меридиональной и вертикальной составляющих вектора скорости осуществляется в ПЛИС, а на персональном компьютере (ПК) в режиме реального времени виден результат измерений скорости и направления ветра.

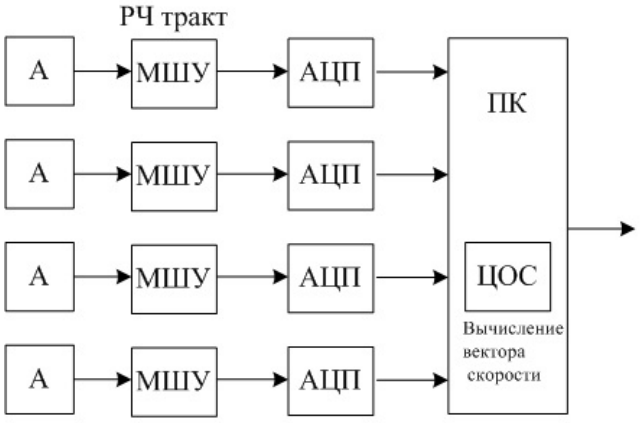


Рис. 1. Структурная схема радара до модернизации

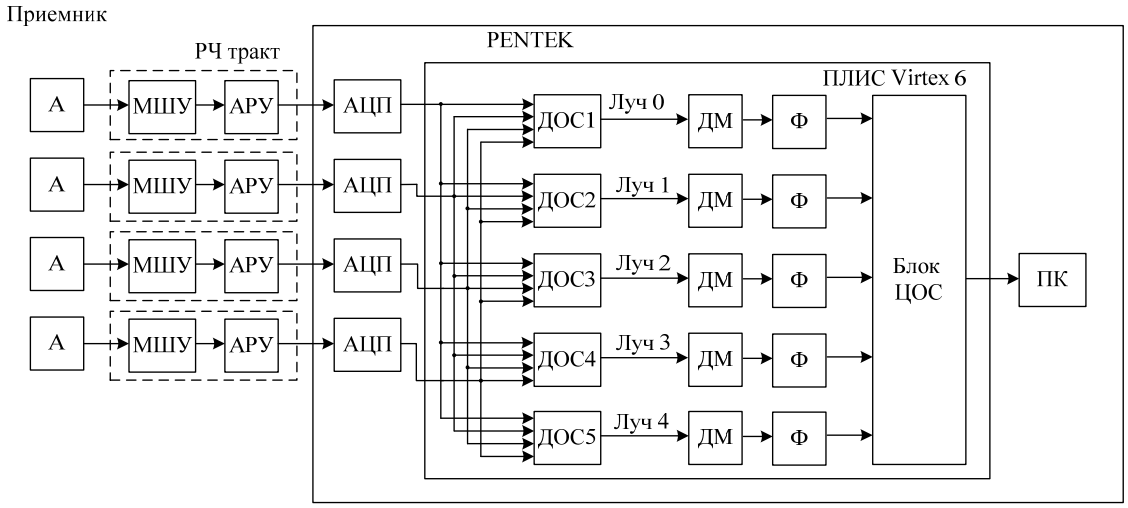


Рис. 2. Функциональная схема радара после модернизации

Заключение

Предлагаемая модернизация приемника МСТ-радара, а также использование новейших инструментов разработки от Xilinx обеспечивает достижение целей, связанных с необходимостью обновления радиолокационной системы вертикального зондирования атмосферы. Обновленный радар представляет структуру, включающую в себя антенную систему из 4 антенн типа волновой канал, согласующие антенные элементы, 4-канальное устройство формирования сигналов, 4 передающих модуля, 4 приемника, а также программно-аппаратную систему управления радаром и систему хранения, накопления и обработки результатов измерений. Следует отметить, что радар работает с различными структурами сигналов от периодической последовательности одиночных радиоимпульсов с прямоугольной или гауссовой формой огибающей до периодической последовательности пачек импульсов с фазовой манипуляцией внутри пачки кодами Баркера или Голея [3].

PCIe-плата позволяет осуществить эффективное преобразование входных радиочастотных сигналов в цифровую форму. В дальнейшем отраженные сигналы радара поступают на диаграмма-образующие схемы (ДОС), которые позволяют сформировать зенитный (луч 0) и внезенитные лучи (луч 1–луч 4) для дальнейшего вычисления доплеровского сдвига частоты с целью расчета зональной, меридиональной и вертикальной составляющих вектора скорости. Далее сигналы поступают на демодуляторы (ДМ) и фильтры (Ф), обрабатываются, используя различные алгоритмы обработки, такие как низкочастотная фильтрация, понижение частоты дискретизации, когерентное накопление сигнала, согласованная фильтрация, преобразование Фурье и так далее. Работа по проведению модернизации требует дальнейшей детальной проработки всех ее аспектов. До настоящего времени производство МСТ радаров в России не налажено, хотя имеется высокая потребность как со стороны Росгидромета, так и со стороны множества других потребителей.

Список литературы

1. Кармишин А.М., Морячков Р.В. Исследование работы кластера МСТ-радара // Материалы Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. № 18. Красноярск, 2012.

2. Datasheet 4-Channel 200 MHz A/D with DDCs and Virtex-6 FPGA – x8 PCIe http://www.pentek.com/deliver/deliver.cfm?DI=3&FN=78661_Apr_15%2Epdf

3. Цифровой формирователь зондирующих импульсов для УКВ МСТ-радара / В.М. Владимиров, А.М. Кармишин, В.В. Марков, В.Н. Шепов // 25 Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2015. С. 1119–1120.

УДК 551.501.8+528.77

ГЕОАНАЛИТИКА.АГРО: РАЗРАБОТКА СЕРВИСА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С СЕТИ СТАЦИОНАРНЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ

Е. Н. Горбачева, А. С. Скачкова
Компания «Совзонд»
e-mail: gorbacheva@sovzond.ru
e-mail: skachkova@sovzond.ru

GEOANALITIKA.AGRO: AGRICULTURAL MONITORING BASED ON REMOTE SENSING DATA AND METEOROLOGICAL INFORMATION

E. N. Gorbacheva, A. S. Skachkova
Sovzond
e-mail: gorbacheva@sovzond.ru
e-mail: skachkova@sovzond.ru

В статье описаны возможности сервиса Геоаналитика.Агро по мониторингу состояния и условий произрастания сельскохозяйственных культур. Подробно освещены источники исходных данных, используемых системой для генерации карт осадков и снежного покрова – глобальный мультисенсорный продукт интенсивности, количества и фазового состояния осадков IMERG и ежедневные данные о распространении снежного покрова IMS.

Ключевые слова: Геоаналитика.Агро, агрометеорологические условия, сумма осадков, снежный покров, данные дистанционного зондирования.

Введение

Оценка состояния растений и условий произрастания сельскохозяйственных культур являются основой работ в области точного земледелия и экономического планирования в аграрном секторе. Среди метеорологических факторов, влияющих на урожай сельскохозяйственных культур, наибольшее значение имеют осадки, поскольку они служат основным источником запасов почвенной влаги. Учет режима осадков необходим для обоснования мелиоративных мероприятий, технологии возделывания сельскохозяйственных растений, определения сроков и способов их уборки, оперативного реагирования на негативные природные процессы.

В сервисе Геоаналитика.Агро реализованы алгоритмы обработки и анализа пространственной информации (данные с сети метеостанций, космическая съемка, цифровые модели рельефа), позволяющие оперативно извлекать значимую информацию из доступных информационных массивов и отображать ее в наглядном виде [1]. Сервис предоставляет доступ к двум категориям продуктов анализа сельскохозяйственных культур: параметры роста и оценка состояния растительности. Категория продуктов «Параметры роста» содержит несколько групп продуктов, представленных вегетационными индексами, и позволяет охарактеризовать объём и прирост биомассы, содержание азота, хлорофилла и влаги в листьях растений, а также интенсивность поглощения фотосинтетически активной радиации. На рис. 1 представлена карта качественной оценки объема биомассы в интерфейсе системы.

Категория «Оценка состояния» является производным продуктом, предназначенным для выделения зон с различной интенсивностью вегетации в пределах поля. Все продукты сервиса Геоаналитика.Агро, получаемые с использованием данных ДЗЗ, рассчитываются по ортотрансформированным, атмосферно откорректированным космическим снимкам.

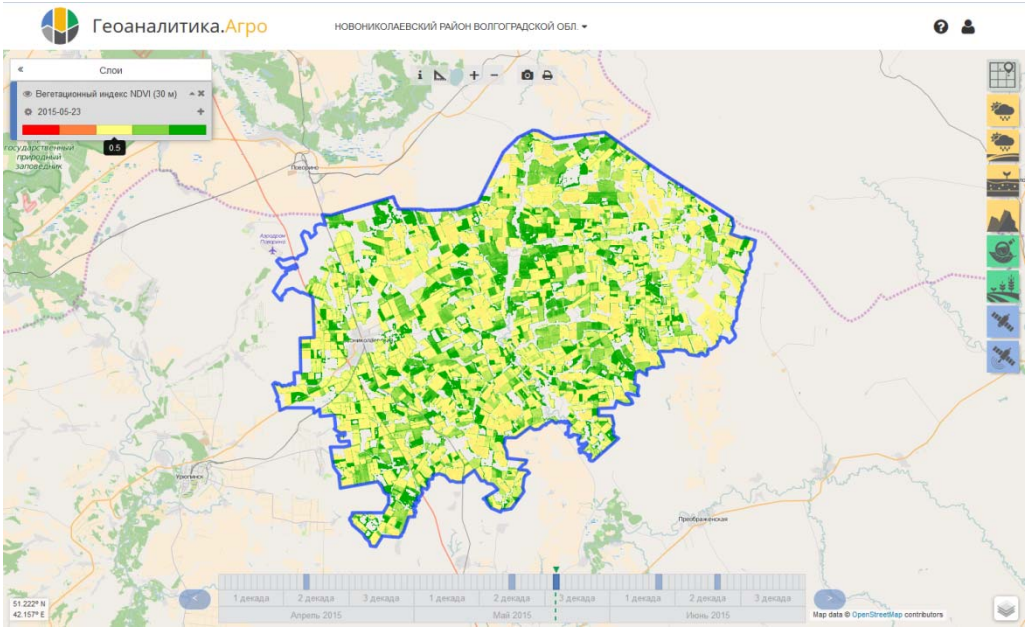


Рис. 1. Карта качественной оценки объема биомассы NDVI

Категория продуктов «Агрометеорологические условия» предназначена для осуществления мониторинга метеоусловий, оказывающих существенное влияние на развитие растений и формирование урожая сельскохозяйственных культур.

Для получения карт температуры и влажности воздуха, давления и осадков в сервисе Геоаналитика.Агро используется метеоинформация, поступающая с международной сети метеостанций, для расчета норм метеорологических показателей – архивы метеоданных NOAA, обработанные путем фильтрации ошибочных значений и заполнения пропусков в суточных данных. Карты температуры воздуха представляют собой изолинии температур, полученные путем интерполяции значений тех или иных метеопараметров (среднее, минимальное, максимальное, абсолютный минимум и максимум), рассчитанных для сети метеостанций.

Для создания карт распределения осадков в условиях разреженной сети метеостанций целесообразно привлечение дополнительных источников данных метеорологической информации, например данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемых с использованием микроволновых сенсоров. Оптико-электронные сенсоры, выполняющие съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, могут быть использованы для создания карт распространения снежного покрова. Основными продуктами сервиса Геоаналитика.Агро, предоставляющими информацию о распределении осадков, являются карты сумм осадков (за сутки, декаду, месяц) и карты снежного покрова (распространение и продолжительность залегания).

В сервисе Геоаналитика.Агро присутствуют два набора данных, характеризующих распределение осадков: срочные наблюдения метеостанций с аккумуляцией за сутки, декаду и месяц, а также данные, рассчитанные по глобальному мультисенсорному продукту IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement). Данные IMERG содержат информацию об интенсивности,

количестве выпадающих осадков, а также о соотношении в них твёрдой и жидкой фаз. Такие материалы позволяют существенно повысить информативность карт распределения осадков. На рис. 2 представлен результирующий продукт, генерируемый сервисом Геоаналитика.Агро по данным IMERG – карты сумм выпавших осадков за сутки, декаду, месяц с пространственным разрешением 5 км.

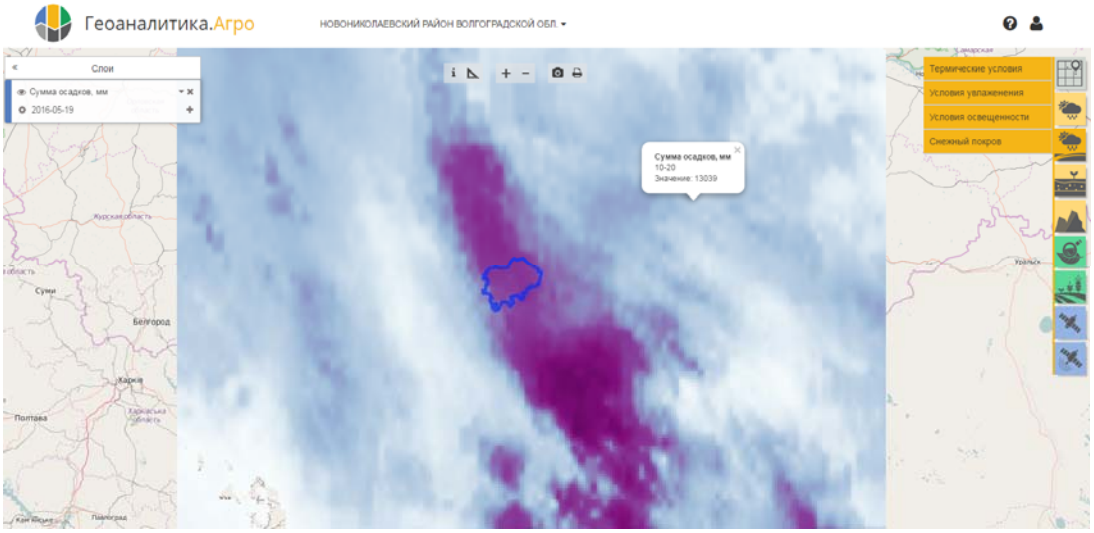


Рис. 2. Отображение слоя осадков в интерфейсе Геоаналитика.Агро

IMERG – данные об интенсивности, количестве и фазовом состоянии осадков, созданные в рамках проекта Global Precipitation Measurement NASA в сотрудничестве с JAXA [2]. Рассчитываются на основе спутниковых наблюдений в микроволновом и инфракрасном диапазонах. Данные IMERG калибруются по спутниковым и наземным наблюдениям. Результаты наблюдений в «реальном времени» генерируются раз в полчаса, начиная с полночи каждого дня, и представляют собой интенсивность осадков в мм/час. Также каждые полчаса аккумулируются продукты за 3 часа, 1, 3 и 7 суток, представляющие собой сумму осадков, выпавших за соответствующий временной интервал.

Назначение карт распределения осадков: оценка влагообеспеченности культур по декадам, месяцам, стадиям вегетации, вегетационному периоду в целом, оценка условий увлажнения в период уборки урожая, определение засушливых периодов и их продолжительности. Перечисленные дистанционные данные используются в первую очередь для отображения распространения метеорологических параметров и не подвергаются наземной валидации.

Снежный покров, его появление и продолжительность залегания имеет большое значение для сельского хозяйства, так как наличие снежного покрова определяет запасы воды, необходимые для растений, а также защищает от вымерзания озимые и многолетние травы. Сервис Геоаналитика.Агро предоставляет доступ к следующим оперативным данным о снежном покрове: карты распространения снежного покрова по суткам, декадам и месяцам; карты продолжительности залегания снежного покрова по декадам и месяцам.

Оптико-электронные съемочные системы, осуществляющие съемку в видимом, ближнем инфракрасном, среднем инфракрасном диапазонах длин волн, такие как MODIS и Landsat, могут быть использованы при создании карт распространения снежного покрова. Однако облачность и низкое временное разрешение (Landsat) не позволяют генерировать сплошную маску снежного покрова ежедневно только на основании этих данных.

В качестве исходных данных при создании карт снежного покрова используется продукт снежного покрова MODIS (MOD10, 500 м) и ежедневные мультисенсорные данные IMS, представляющие собой набор данных о распространении снежного и ледового покрова National Ice Center's Interactive Multisensor Snow и Ice Mapping System (IMS) с пространственным разрешением 1 км [3]. Данные IMS используются для заполнения пропусков в ежедневных данных продукта MODIS.

Результирующие карты снежного покрова, генерируемые сервисом Геоаналитика.Агро: маски снежного покрова с пространственным разрешением 500 м в пределах региона интереса; процент покрытия поля снегом (расчет по сетке полей); карты продолжительности залегания снежного покрова, генерируемые из ежедневной маски снежного покрова как сумма дней, в которые территория была покрыта снегом в течение декады и месяца. Карты покрытия территории снегом предоставляются по суткам, декадам и месяцам, карты продолжительности залегания снежного покрова – по декадам и месяцам.

Мультисенсорные данные IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) – результат анализа данных, полученных с большого числа сенсоров, в том числе съемочных систем MODIS Terra и Aqua, Suomi-NPP, радарных (Sentinel-1A, Radarsat-2), микроволновых сенсоров (SSM/I, SSMIS), метеорологической информации, поступающей с наземных станций. Использование большого количества сенсоров, снимающих земную поверхность в различное время и под разными углами в течение суток, а также наземных метеоданных позволяет создавать непрерывные ежедневные карты распространения снежного покрова с разрешением 1, 4 и 24 км.

Дополнительным источником данных о распространении снежного покрова более высокого пространственного разрешения в сервисе Геоаналитика.Агро являются индексные изображения NDSI, получаемые по атмосферно корректированным снимкам Landsat и Sentinel-2 с пространственным разрешением 30 и 10 м соответственно. Нормализованный разностный снежный индекс (Normalized difference snow index, NDSI) – показатель покрытия территории снегом, предназначенный для обнаружения снега на земной поверхности по данным ДЗЗ.

Назначение карт снежного покрова: определение сроков установления и схода снежного покрова, анализ сроков установления и схода снежного покрова относительно средних многолетних сроков; определение продолжительности залегания снежного покрова; мониторинг негативных природных процессов, таких как вымерзание посевов, раннее установление снежного покрова.

Список литературы

1. Мышляков С.Г., Глотов А.А. «Геоаналитика.Агро» – инновационное решение для сельскохозяйственного мониторинга // Геоматика. 2015. № 2. С. 58–62.

2. NASA: IMERG – Precipitation Measurement Mission. Mode of access: https://pmm.nasa.gov/category/keywords/imerg. Date of access: 30.03.2016

3. NAA. Multisensor snow/ice cover maps: Northern Hemisphere. Mode of access: http://satepsanone.nesdis.noaa.gov/northern_hemisphere_multisensor.html. Date of access: 30.03.2016

УДК 528.8.04, 528.88

ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ МАГИСТРАНТОВ И АСПИРАНТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ»

А. П. Гук[(1)], Л. Г. Евстратова[(2)]
[(1)]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
[(2)]ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»
Географический факультет
e-mail: guk_ssga@mail.ru
e-mail: lge_21@mail.ru

PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING MAGISTRACY AND GRADUFATE EDUCATIONAL PROGRAMM

A. P. Guk[(1)], I. G. Yevstratova[(2)]
[(1)]Sibirian state university of geosystem and technology (SSUGT)
[(2)]Moscow State University (MSU)
e-mail: guk_ssga@mail.ru
e-mail: lge_21@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с особенностями организации современной подготовки специалистов в области обработки аэрокосмических снимков (направление «фотограмметрия и дистанционное зондирование») уровня магистратуры и аспирантуры. Обучение рассчитано на специалистов, которым требуется применение аэрокосмических снимков и других данных ДЗ.

Ключевые слова: программы обучения аспирантов и магистрантов, технологии дистанционного зондирования, формирование учебных программ.

Активное развитие дистанционных съемочных систем, особенно в последние двадцать лет, принципиально изменило сферу их использования, технологию обработки снимков. Если ранее аэрокосмические снимки использовались в первую очередь для создания топографических и специальных тематических карт и фотопланов (лесных, сельскохозяйственных, геологических и т. п.), то в настоящее время сферы их использования существенно расширились. Это связано с принципиальными изменениями в методах дистанционного зондирования: повышение разрешающей способности космических снимков до 0,5 м, а также качества разрешающей способности и спектральных каналов (до 2 м), появление гиперспектральных снимков, развитие съемок с беспилотных летательных аппаратов, появление лазерных, радиоинферометрических и радиолокационных съемок.

В связи с развитием методов стало возможным решать с их помощью новые задачи: изучать широкий круг объектов по снимкам, выполнять автоматическое дешифрирование объектов, осуществлять мониторинг поверхности земли для оценки развития как природных, так и антропогеннных процессов в различных масштабах и с различной точностью (начиная от проведения ландшафтных исследований до исследования мегаполисов, городов, леса, состояния сельского хозяйства и т. д. Появились новые виды продукции, создаваемой по снимкам: цифровые ортофотопланы, цифровые модели местности и 3D-модели, построенные по космическим и аэроснимкам, создаются системы мониторинга, разрабатываются автоматические методы создания специализированных карт.

В результате большое количество различных специалистов проявляют активный интерес к использованию космических и аэроснимков. Причем это специалисты, которые раньше не использовали снимки и, соответственно, не имеют существенного опыта их обработки.

Особая проблема – это что обработкой аэрокосмических снимков занимаются специалисты из различных областей, связанных с тематической обработкой (например,

лесного хозяйства, сельского хозяйства и т. п.), но не имеющие достаточных знаний в области технологий дистанционного зондирования, фотограмметрии. В результате пользователи аэрокосмических снимков не всегда полностью используют возможности аэрокосмических снимков, в ряде случаев получают либо неэффективный, либо просто неправильный результат (например, при мониторинге, выявлении произошедших измерений, классификации объектов).

Такие принципиальные изменения в возможностях методов дистанционного зондирования, расширение круга пользователей как исходных, так и обработанных материалов требуют существенных изменений в обучении специалистов, работающих с этими материалами, а также принципиальных изменений в системе образования.

Тем не менее уже давно разработаны общие принципы обработки изображений, методология их обработки и ряд эффективных технологий, определение по снимкам координат точек местности, состояний различных объектов, их качественных характеристик, решения отдельных задач оценки метрических параметров, а также изменения состояния объектов и т. д. В настоящее время фотограмметрия и дистанционное зондирование – это серьезное научно-техническое направление со своей собственной эффективной теорией методологии, обеспечивающей возможность решения ряда технических задач.

Пользователи аэрокосмических снимков должны обладать основами теоретических и практических знаний в области уже существующих технологий обработки материалов дистанционного зондирования и фотограмметрии.

Переход системы высшего образования с конкретно-технически ориентированных обучающих программам на двух- и трехуровневую систему образования позволяет решить эту проблему и реализовать подготовку магистров и аспирантов, владеющих, кроме основного образования, методами дистанционного зондирования.

В связи с этим в ряде университетов создаются специальные программы по обучению методам дистанционного зондирования и фотограмметрии в рамках магистерской и аспирантской подготовки.

При формировании программ обучения обработки аэрокосмических снимков нужно учитывать следующее.

Во-первых, методы дистанционного зондирования включают большое количество различных научных и практических дисциплин. С развитием съемочных систем, появлением снимков с новыми свойствами постоянно расширяются применяемые методы обработки данных: разрабатываются новые методы, подходы, алгоритмы, основанные на принципиально различных математических подходах.

Во-вторых – то, что большое количество различных специалистов используют аэрокосмические снимки и технологии дистанционного зондирования для решения принципиально различных задач.

В-третьих – для правильного решения конкретных задач специалист должен знать теорию, принципы, методы и технологии применения данных дистанционного зондирования именно для решения данной конкретной задачи.

И, наконец, специалист должен понимать перспективы развития методов и технологий для принятия технически правильных решений, оценить перспективы использования методов для развития отрасли.

Специалист при обработке снимков всегда должен помнить о геометрической точности получаемого продукта.

Рассмотрим, как правильно конструировать программы обучения методам ДЗ.

Можно выделить следующие основные блоки при изучении курса дистанционного зондирования:

– метрическая часть обработки изображений – собственно фотограмметрия;

– дешифрирование снимков (визуальное, автоматизированное и автоматическое);

– теоретические основы и практические методы выявления изменений состояния объектов, мониторинг по разновременным снимкам;

– средства формирования результатов обработки снимков.

Так, основные дисциплины, на которых базируется современная фотограмметрия и метрическая обработка данных дистанционного зондирования, – это: линейная алгебра, в частности вычислительные аспекты линейной алгебры, теория и практика цифровой обработки сигналов, включая методы, основанные на преобразованиях Фурье, современные методы фильтрации, методы Вейвлет-преобразований, другие ортогональные методы.

Второй важный этап – дешифрирование многоспектральных снимков широко использует теорию вероятностей, статистические методы распознавания образов. В частности, байесовский подход, метод максимального правдоподобия, параметрические и непараметрические методы, методы многомерной статистики и т. д. Широко применяются алгоритмы типа «дерева решений», нейронные сети. Кроме того, применяются комплексные алгоритмы. В последнее время стали применять структурные методы, где в качестве признаков используются коэффициенты ортогональных разложений (Фурье, Вейвлет и т. п.) Для принятия решений используются различные критерии. Автоматизированные (интерактивные) методы широко применяют различные преобразования изображений, такие как получение индексных изображений, метод главных компонент, метод независимых компонент, метод Tasseled Cap и их модификации. Весьма важными и практически сложно реализуемыми являются методы сегментации, включающие в себя целую группу различных алгоритмов. Постоянно расширяется набор дешифровочных признаков. Следует также отдельно отметить методы выделения изменений по разновременным, разномасштабным снимкам. Также следует обратить внимание на вспомогательные алгоритмы обработки изображений.

При разработке магистерских и аспирантских программ следует выбрать наиболее важные аспекты обработки снимков и соответствующие алгоритмы, организовать курс обучения таким образом, чтобы программы были объединены единой целью, направленной на достижение конкретного результата и в то же время обосновывали необходимость того или иного действия. Специалист должен понимать назначение каждого этапа и последствия его неправильной реализации. Эти блоки должны быть логически связаны и ясно представлять структуру обработки данных.

Учитывая, что обучение рассчитано на специалистов различных направлений, достаточно сложно сформировать эффективную программу, удовлетворяющую различных пользователей, имеющих возможность формировать необходимые технологические цепочки для решения конкретных задач.

Авторами было разработано несколько магистерских и аспирантских программ, рассчитанных на различных специалистов-пользователей аэрокосмическими снимками и дистанционного зондирования. Каждая программа содержит 3 базовых курса по ДЗ и 2–5 дополнительных курсов по выбору, которые согласованы между собой и при формировании конкретной программы дополнительно к базовым можно выбрать 2–3 курса. В результате будет получена полноценная программа.

В качестве примера приведем базовые курсы программы для подготовки аспирантов по направлению «Мониторинг территории по аэрокосмическим снимкам и другим данным дистанционного зондирования» (направление «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия):

Современные средства дистанционного зондирования.

Фотограмметрия и технологии мониторинга по аэрокосмическим снимкам.

Автоматизация дешифрирования многоспектральных космических снимков.

В докладе будут рассмотрены принципы формирования согласованных программ для различных типов специальностей, использующих аэрокосмические снимки, и для специалистов, имеющих различный уровень подготовки.

По нашему мнению, для более эффективного обучения специалистов, использующих новые материалы – аэрокосмические снимки и другие данные зондирования, – целесообразно организовать координационный совет из специалистов вузов, которые занимаются обучением этих методов.

УДК 528.9

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЩЕГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ В СРЕДЕ ГИС

А. Б. Женибекова
ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
Сибирский центр
e-mail: altyn.zhenibekova@mail.ru

В статье показана актуальность формализации картографической визуализации. Была предложена схема формализации правил визуализации элементов для общегеографических и тематических карт в среде ГИС. Выполнена формализация способов изображения в виде функциональных зависимостей, благодаря которым выявились параметры для формирования каждого способа изображения.

Ключевые слова: картографическая визуализация, формализация способов изображения, автоматизация, выбор способов изображения, геоинформационная система.

Сущность картосоставления как в картографии, так и в геоинформационном картографировании – картографическая визуализация геопространственной информации в форме картографических изображений [1]. Ряд авторов утверждают, что вопрос автоматизации картографического изображения до сих пор остаётся открытым.

Одной из причин актуальности данного вопроса является тот факт, что для проектирования цифрового картографического изображения существует множество вариантов и случаев, а это влечет сложность в формализации правил картографической визуализации, а значит, сложность в их программировании [2]. То есть на картосоставительские работы уходит большое количество времени, несмотря на автоматизированную среду ГИС. Сложность автоматизации картографической визуализации состоит в том, что большая часть картографических работ понимается интуитивно. Интуитивное понимание взаимосвязей между условными обозначениями и их интерпретируемыми объектами и явлениями трудно сформулировать и поэтому трудно формализовать.

В работе сделана попытка формализации выбора способов изображения для элементов общегеографических и тематических карт.

Требуется выявить принцип формирования списка условных обозначений для элементов общегеографического содержания карты. Был выполнен анализ содержания карты «Западная Сибирь» масштаба 1:12 500 000. Анализ показал, что выбор элементов географического содержания состоит из стандартных элементов согласно Руководству по картографическим и картоиздательским работам, а именно: гидрография, населенные пункты, промышленные и социально-культурные объекты, дороги, рельеф, растительный покров и грунты, границы. Однако по результатам анализа не ясно, по какому принципу предстоит выбирать каждый способ изображения. Чтобы выяснить это, потребуется выполнить анализ способов изображения для общегеографических элементов. В качестве примера был выбран элемент содержания – гидрография карты масштаба 1:1 000 000.

Анализ объектов по способам изображения на примере элемента «гидрография» показал, что все объекты гидрографии можно разделить на три группы по способам изображения: способ значков, способ линейных знаков, способ ареалов. Критерием выбора того или иного способа для элементов гидрографии является набор координатных данных. Так, например, если объект содержит набор координат Nk = k1, то отображаемый объект визуализируется способом значков.

Табл. 1 отображает группировку некоторых элементов географического содержания по способу значков.

Таблица 1

Группировка объектов элементов географического содержания по способу значков для карт масштаба 1:1 000 000 на примере элементов гидрографии, рельефа и населенных пунктов

Элемент содержания	Объекты геопространства	Набор координатных данных	Способ изображения
Гидрография	Колодец, водохранилище, ключ, родник, гейзер, маяк, военно-морская база, морской порт, скала, остров, камень, отметки глубин	Nk = k1	Способ значков
Рельеф	Отметки высот, курган, бугор, вход в пещеру, грот, кратер вулкана		
Населенные пункты	Отдельное строение, центр населенного пункта		

При составлении тематического содержания карты пользователю предлагаются выбор показателей, при выборе которых должен формироваться тот или иной условный знак. Далее требуется определить, исходя из каких показателей выбирается способ изображения.

Принцип построения тематического условного знака состоит в том, что пользователь вводит тематические данные и показатели, а выбор способа изображения происходит автоматически. Для реализации данного принципа требуется провести формализацию существующих способов изображений с целью выявления показателей, которые определяют каждый способ.

В работе были использованы следующие формулы способов изображения:

- способ картодиаграммы: КД = f(A, B, C, E);
- способ картограммы: КГ = f(E, I);
- точечный способ: T = f(A, B, X, G);
- способ изолиний: I = f(in, j,);
- способ качественного фона: Ка = f(A, Ck, E, G);
- способ количественного фона: Ко = f(A, Rk E, G);
- способ линейных знаков: L = f(Nk, Ско, Ска, M);
- способ значков: Z = f(K,Ско, Ска, M);
- способ знаков движения: D = f(P, O, C, G);
- способ ареалов: Ar = f(A, S).

После выполнения формализацию способов изображения в виде функций был получен ряд тематических показателей, определяющих способ изображения.

Обобщенно вид исходной информации об объектах и явлениях можно обозначить двумя категориями – это числовая информация и вещественная. Обе группировки способов изображения можно подразделить по типу локализации объектов и явлений – точечный, линейный, площадной. Группировка способов изображений по типу локализации представлена в табл. 2.

Схема выбора способа линейного знака и знаков движения определяется по следующему алгоритму (рисунок).

Таблица 2

Группировка способов изображений по виду исходной информации и типу локализации объектов, явлений

Вид исходной информации					
Числовая			Материальная		
Тип локализации					
Точечный (координата k1)	Линейный (k1 ≠ kn)	Площадной (k1 = kn)	Точечный (координата k1)	Линейный (k1 ≠ kn)	Площадной (k1 = kn)
Способ локализован-ных значков	Способ линейных знаков	Способ количествен-ного фона	Способ локализован ных значков	Способ линейных знаков	Способ качествен-ного фона
Точечный способ	Способ изолиний	Способ картодиаграмм ы		Способ знаков движения	Способ ареалов
	Способ знаков движения	Способ картограммы			
	Способ локализован-ных диаграмм	Способ локализован-ных диаграмм			

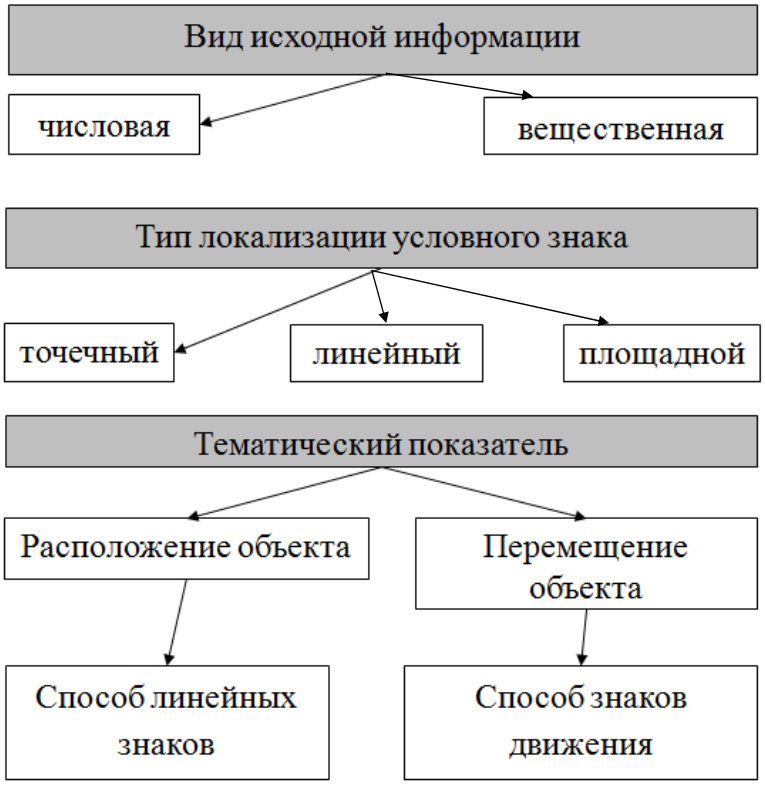


Рис. Схема выбора способа линейного знака и знака движения

Таким образом, формализация выбора способов изображения для общегеографических и тематических карт позволяет проектировать карту любому пользователю, не допуская картографических ошибок в проектировании.

Формализованные правила картографирования обеспечивают стандартизацию процесса проектирования карты в среде ГИС, что поможет значительно сократить время на картосоставительские работы.

Список литературы

1. Васмут А.С. Автоматизация и математические методы в картосоставлении. М.: Недра, 1991. 390 с.

2. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. Новосибирск: СГГА, 2004. 252 с.

3. Кацко С.Ю. ГИС для непрофессиональных пользователей как один из современных инструментов работы с геоинформацией ЦКО // ГЕО-СИБИРЬ-2011. 2011. Т. 1. Ч. 1. С. 234–238.

4. Лисицкий Д.В. Инструментальная справочно-аналитическая ГИС – новый геоинформационный инструмент для широкого круга пользователей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2012. 2012. С. 10.

5. Лисицкий Д.В. Изменение сущности и функций картографических изображений на современном этапе развития общества // Геодезия и картография. 2008. № 2. С. 28–30.

6. Лисицкий Д.В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА. 2013. Т. № 2 (22). С. 8–16.

7. Научно-методические основы формализации процессов составления тематических карт для реализации в ИСА ГИС / С.С. Дышлюк, О.Н. Николаева, Л.А. Ромашова, С.А. Сухорукова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2011. 2011. Т. 1. С. 53.

УДК 528.8.04, 528.88

NOSQL-ПОДХОД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКОГО БАНКА ДАННЫХ

А. В. Качаев

NOSQL APPROACH FOR DEVELOPING DENDROCLIMATIC DATA BANK

A. V. Kachaev
e-mail: avkachaev@gmail.ru

На основании анализа существующих форматов дендроклиматических данных предлагается использовать нереляционный подход в проектировании дендроклиматического банка данных. MongoDB как один из вариантов использования документоориентированной системы управления базами данных с открытым исходным кодом, не требующая описания схемы таблиц.

Ключевые слова: дендроклиматология, системы управления базами данных, не реляционный подход, NOSQL, MongoDB.

Числовые характеристики годичных колец в древесине – один из основных показателей в исследовании биологических процессов в дендрохронологии [1, 2].

Математическая обработка дендрохронологических данных предполагает различные форматы представления данных с последующим их использованием в программах. В настоящее время существует более 20 форматов, описывающих первичные измерения годичного древесного кольца и индексных хронологий [3]. Tucson – это один из наиболее известных форматов описания характеристик годичных древесных колец. Формат Tucson позиционно описывает дендрохронологические характеристики годичных колец в дереве в текстовом файле. В Международном банке данных древесных колец (ITRDB) [4] в свободном доступе в формате Tucson хранятся как первичные измерения, так и индексные хронологии по всему миру.

Анализ американских индексных хронологий (это более 3000 рядов) позволил выявить более 60 процентов ошибок в представлении данных. Это ошибки в нарушении спецификации формата Tucson. Выделим следующие нарушения формата: в текстовом файле вставлены пустые записи, нарушение позиций по некоторым характеристикам, в одном текстовом файле вставлены несколько индексных хронологий.

В работе [5] предлагается стандартизировать представления дендрохронологических данных с использованием формата XML [6]. Использование данного подхода позволит в будущем исправить недостатки существующих форматов. Одним из преимуществ XML-формата является то, что он широко используется в Web-технологии.

Работа с большими объемами данных предполагает использование систем управления базами данных (СУБД). В настоящее время в существующих дендрохронологических банках данных используются реляционные СУБД [7, 8], например PostgreSQL [9].

Далее приведем пример описания структуры данных хронологий и месячных климатических измерений на языке Pascal [10].

Описание хронологии	**Описание климата**
type period = byear .. eyear; month =(jan, feb, mar, apr, may, jun,	var pe_dly: period; var mo: month; type

```
jul, sep, oct, nov, dec);
        end
         var pe_crn  period;
        type
          crn = record
             { поля описывающие}
              { место хронологии}
            latt: real;
            long: real;
            elev: real;
            ind: array[pe_crn] of integer;
          end;
```

```
          dly = record
          { поля описывающие}
          { места метеостанции}
          latt: real;
          long: real;
          elev: real;
          cli: array[pe_dly, mo] of integer;
        end;
          var dly_t: dly;
```

При проектировании схем реляционной базы данных для хранения хронологий возможен один из следующих вариантов: таблица, хранящая заголовки хронологий, и таблица с индексами хронологий. Естественно, что описание схем таблиц данных и непосредственно данные имеют раздельное место хранения. Далее приведем пример схем таблиц для описания хронологий, используя СУБД PostgreSQL [9].

Описание места хронологий

```
CREATE TABLE "crn_head" (
  "id_head" integer NOT NULL,
  "iden"      char(8)  NOT NULL,
  /* поля описывающие
     место хронологии */
  "latt" real,
  "long" real,
  "elev" real,
  Constraint "crn_head_id" Primary Key
("id_head", "iden")
);
```

Описание индексов хронологий

```
CREATE TABLE "crn_ind" (
  "id_ind" integer NOT NULL,
  "id_head" integer NOT NULL,
  "year" integer NOT NULL,
  "ind" integer NOT NULL,
        Constraint "crn_ind_id"
Primary Key ("id_ind")
);
```

В интерактивной информационной системе дендрохронологического мониторинга [8] используется PostgreSQL-технология и протоколы Web-сервисов используют форматы XML, JSON и REST.

Рассмотрим представление климатических данных в формате JSON:

{ "ident": "идентиф. станции", "geo": {"lat": "широта", "long": "долгота", "elev": "высота на уровнем моря в м."}, "period": {"byear": "начальный год измерения", "eyear": "конечный год измерения"}, "meas":["tmin" , "tmax" , "prcp", "tave"], "typm":"ini",

"tmin": {"tper": {"bper": "начальный год измерения", "eper": "конечный год измерения"}, "tmins": [[[[n1, …, nn], …, []]], …, []], …, []]},

"tmax": ["аналогично «tmin»"],

"prcp": ["аналогично «tmin»"],

"tave": ["аналогично «tmin»"] } где n1, … , nn – числовые значения.

Отличительными особенностями представления данных в JSON-формате от двух предыдущих, описанных выше, являются следующие: нет схемы описания данных, то данные и структура данных хранятся в одном месте. Такой тип структуры данных используется в документированных СУБД [11], одной из которых является MongoDB. В результате анализа существующих документированных СУБД наш выбор был остановлен на MongoDB [12].

Располагая текстовыми метеоданными (более 80 тыс. станций) и хронологиями (более 4 тыс.) из ITRDB [4], мы написали конвертор на языке Java для преобразования исходных данных в JSON-формат. Используя команду импорта в MongoDB, создаем настольный вариант документоориентированного дендроклиматического банка данных.

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, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

2. Ваганов Е.А., Качаев А.В. Дендроклиматический анализ роста сосны в лесоболотных фитоценозах Томской области // Лесоведение. 1994. № 6. С. 3–10.

3. Brewer, P., Murphy, D., Jansma, E., 2011. TRiCYCLE: a universal conversion tool for digital tree-ring data // Tree-Ring Research 67(2). P. 135–144.

4. The International Tree-Ring Data Bank [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring

5. Jansma E., Brewer P., Zandhuis I. (2010): TRiDaS 1.1: The tree-ring data standard. Dendrochronologia 28: P. 99–130.

6. Рэй Э. Изучаем XML / пер. с англ. СПб.: Символ-плюс. 2001. 408 с.

7. Brewer, P.W., 2013. Tellervo: A guide for users and developers. Tucson, AZ, USA 196 c.

8. Шишов В.В., Ильин В.А., Петрова Н.И. Интерактивная информационная система дендроклиматического мониторинга // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2009. № 2 (23). С. 136–140.

9. Уорсли Дж., Дрейк Дж. PostgreSQL. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 496 с.

10. Столяров А.В. Программирование: введение в профессию. 1: Азы программирования. М.: МАКС Пресс, 2016. 64 с.

11. Кайл Бэнкер. MongoDB в действии / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2012. 394 с.

12. Henrik Ingo. 5 причин, по которым MongoDB является ведущей NoSQL СУБД [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.highload.ru/2014/abstracts/1532.html

УДК 528.851

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА ПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ДЗЗ РОСКОСМОСА

Ю. М. Князькин, В. Е. Ружилов, П. В. Толстихин
АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»
e-mail: nkpor.303@yandex.ru

Приводится перечень и основные характеристики наземной приемной аппаратуры Сибирского регионального центра ДЗЗ Роскосмоса, АО «ИСС», г. Железногорск.

Введение

Решением Роскосмоса от 17.12.2013 был создан Сибирский региональный центр приема, обработки и распространения космической информации дистанционного зондирования Земли (Сибирский региональный центр ДЗЗ Роскосмоса) при АО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнёва. Оперативное управление СРЦ ДЗЗ возложено на Оператора КС ДЗЗ НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы».

В настоящее время центр обеспечивает прием, регистрацию, обработку, архивацию и распространение информации ДЗЗ, получаемой с КА типа «Метеор-М», «Канопус-В», «Ресурс-П», Terra, Aqua, NOAA, Suomi NPP.

В состав Сибирского регионального центра ДЗЗ входят комплексы:

МКО-КМ

Многофункциональный комплекс обработки и каталогизации целевой информации с КА «Метеор-М» и «Канопус-В» служит для нормализации и каталогизации видеоданных.

Основные задачи комплекса:

- первичная обработка и визуализация исходной информации;
- оперативная оценка качества информации;
- каталогизация и поиск информации в исходном каталоге;
- проведение обработки информации в соответствии со стандартными уровнями и формирование выходных информационных продуктов;
- оценка измерительных свойств выходной продукции.

КПОИ-Р

Комплекс первичной обработки информации ДЗЗ (для КА «Ресурс-П») предназначен для получения, распаковки, восстановления и цифровой первичной обработки, формирования и выдачи массивов видеоинформации, служебной и сопровождающей информации на средства комплекса архивации информации, формирования исходных данных для геопривязки и геометрических преобразований изображений.

Основная задача комплекса – восстановление и цифровая первичная обработка информации маршрутов съемки, включая декодирование, восстановление строчно-линейной структуры видеоинформации с постоянными параметрами «сшивки» матриц и зон компенсации, коррекцию неравномерности чувствительности элементов ПЗС с использованием коэффициентов коррекции, формирование обзорного изображения.

ККИ-Р

Комплекс каталогизации информации ДЗЗ (для КА «Ресурс-П») предназначен для управления процессом обработки информации ДЗЗ и информационного обеспечения технологических операций на основе блока информационного комплекса (базы данных) специального программного обеспечения каталогизации.

Основные задачи комплекса:

– формирование информационной базы для обеспечения процесса каталогизации и прецизионной обработки информации;

– получение маршрутов для каталогизации, ведение каталога информации ДЗЗ КА «Ресурс-П»;

– получение заданий от комплекса взаимодействия с потребителями на проведение стандартной обработки;

– получение информации ДЗЗ по маршруту из входного буфера или из архива для проведения стандартной обработки, выдача результатов стандартной обработки и метаданных.

КАИ

Комплекс архивации информации ДЗЗ предназначен для формирования и ведения распределенного архива информации ДЗЗ и продуктов ее обработки на основе унифицированных форматов данных с использованием современных средств хранения информации, обеспечивающих долговременное хранение данных, находящихся под управлением общего и специального программного обеспечения, отвечающего современным требованиям, предъявляемым к информационным системам.

Основные задачи комплекса:

– обеспечение надежной защиты информации от разрушения и несанкционированного доступа;

– автоматизация процесса миграции файлов между оперативным и долговременным архивом;

– резервное копирование и восстановление баз данных;

– предоставление пользователям архива программных средств поиска по единому каталогу данных ДЗЗ, записи и извлечения информации ДЗЗ из архива.

РБГД

Региональный банк геоинформационных данных (данных ДЗЗ, цифровой картографической информации, цифровых моделей рельефа и других пространственных данных).

Основные задачи комплекса:

– загрузка, оперативное и долговременное хранение данных ДЗЗ и продукции на их основе;

– формирование непрерывных покрытий поверхности Земли данными ДЗЗ;

– предоставление пользователям РБГД средств поиска по каталогу РБГД и Единому каталогу ЦБГД данных ДЗЗ и продукции на их основе, просмотра характеристик, заказа и получения этих данных;

– предоставление пользователям РБГД средств поиска территорий, географических и инфраструктурных объектов по тематическим данным (векторным слоям), просмотра их характеристик.

КУТП (Комплекс управления технологическими процессами)

Основные задачи комплекса:

– сбор информации о состоянии технических средств центра, запись ее в общую базу данных в формализованном виде;

– организация передачи информации о состоянии технических средств в НЦ ОМЗ;

– расчет зон радиовидимости, контроль реализуемости планов приема сеансов связи;

– контроль выполнения технологического процесса приема, первичной обработки и каталогизации информации;

– формирование и выдача отчетных документов;

– формализация, формирование и отображение баллистической, оперативно-технической, технологической и отчетно-справочной информации, в том числе с использованием коллективных средств отображения.

КОД

Комплекс обмена данными предназначен для обеспечения формами с командно-программной информацией между региональными пунктами приема информации и НЦ ОМЗ.

КВП (Комплекс взаимодействия с потребителями)

Основные задачи комплекса:

– прием от потребителей заявок на информацию ДЗЗ, их учет и контроль выполнения;

– оценка реализуемости заявок и проектов договоров на информацию ДЗЗ;

– выдача заявок на получение информации ДЗЗ от внешних абонентов, контроль их выполнения;

– обеспечение поставки потребителям подготовленной продукции в соответствии с условиями заявок (договоров);

– формирование и выдача отчетно-справочной информации.

КСОИ

Комплекс стандартной обработки информации предназначен для стандартной обработки информации, поступающей с КА типа «Ресурс-П», Terra, Aqua, NOAA, Suomi NPP.

Основные задачи комплекса:

– структурное восстановление исходной информации ДЗЗ («сшивка») в пределах одного спектрального канала;

– статистическая радиометрическая коррекция информации ДЗЗ;

– формирование композитных (цветосинтезированных) изображений по видеоданным, полученным в узких спектральных каналах;

– трансформирование изображений в заданную картографическую проекцию по орбитальным данным, а также с привлечением цифровых моделей рельефа;

– формирование мозаики на заданный район с целью создания непрерывного покрытия земной поверхности космическими изображениями;

– формирование файла метаданных о выходном стандартно обработанном изображении;

– формирование результатов стандартной обработки в согласованных форматах.

Техническая база центра позволяет получать снимки ДЗЗ с пространственным разрешением:

– Ресурс-П – 0,6–12 м;
– Метеор-М № 1 – 60–120 м;
– Метеор-М № 2 – 30–50 м;
– Канопус-В № 1 – 2,1 м (ПСС), 10,5 м (МСС).

В зависимости от типа съемочной аппаратуры средствами центра проводятся следующие уровни обработки информации ДЗЗ:

– Геотон (КА «Ресурс-П») до уровня 2 А;
– КШМСА-ВР (КА «Ресурс-П») до уровня 4 В;
– КШМСА-СР (КА «Ресурс-П») до уровня 4 А;
– МСУ (КА «Метеор-М») до уровня 1 В;
– КМСС (КА «Метеор-М») до уровня 2 А;
– МСС (КА «Канопус-В») до уровня 1.

В настоящее время четыре приемных комплекса позволяют проводить в сутки до 5 сеансов с КА «Метеор-М», до 5 сеансов с КА «Канопус-В», до 15 сеансов с КА «Ресурс-П».

На данный момент ведется работа по организации системы оперативной выдачи материалов космической съемки региональным потребителям напрямую, сразу после получения информации с соответствующих КА.

УДК 550.8.053, 681.3.068

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

П. А. Коробейников, А. С. Соколова, Н. В. Молокова
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: pavel0094@gmail.com
e-mail: annysokol@gmail.com
e-mail: nat_molokova@mail.ru

Данная работа посвящена разработке программного модуля для решения интерпретационных задач с помощью методов идентификации и многовариантного анализа геофизических данных, полученных методом электромагнитного зондирования.

Ключевые слова: разведочная геофизика, электромагнитное зондирование, программирование, интерпретация данных.

Введение

Геологическая среда имеет, как правило, сложное строение, обусловленное наличием большого количества фрагментов горных пород разного состава, обладающих разными электромагнитными свойствами: удельным сопротивлением, диэлектрической проницаемостью и магнитной проницаемостью. Неоднородность геологической среды по электромагнитным свойствам определяет наличие её аномальных участков при распространении электромагнитного поля.

Возбуждение электромагнитного поля, характер его связей с геологической средой в процессе распространения в пространстве описывается обширным комплексом сложных формул теории поля, который сопровождается многочисленными таблицами и графиками. Пользование таким материалом в повседневной работе геофизиков сопряжено с большой затратой времени и требует высокого профессионализма.

Для упрощения работы геофизиков, особенно на этапе интерпретации полученного в поле материала, целесообразно теоретическую основу электромагнитных методов максимально автоматизировать, что приведёт к сокращению затрат времени, удешевлению комплекса геофизических работ и повышению его геологической эффективности. Применение информационных технологий для решения такого рода задач позволит существенно расширить возможности геофизики при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых [1, 2].

Актуальность данной работы обусловлена высокой стоимостью, длительными сроками и малоэффективными результатами проведения работ по интерпретации полученных геофизических данных.

Объект исследования – обработка и интерпретация данных метода электромагнитного зондирования.

Предмет исследования – прикладные аспекты многовариантного анализа данных и технологии программирования к решению интерпретационных задач.

В связи с вышеизложенным **целью** работы является разработка программного обеспечения для интерпретации геофизических данных, полученных методом электромагнитного зондирования.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи** исследования:

- Провести анализ предметной области.
- Составить техническое задание.
- Изучить методы анализа и интерпретации геофизических данных.
- Реализовать программный модуль с помощью программных средств.
- Разработать пользовательский интерфейс.
- Провести тестирование.

Алгоритм решения задачи

Метод электромагнитного зондирования геологической среды основан на выявлении различий в степени и характере противодействия разных геологических образований и технологических включений (с различающимися электромагнитными свойствами) процесса распространения наведенного электромагнитного поля. Это позволяет выявлять в геологическом разрезе аномалеобразующие объекты и по электромагнитным характеристикам определять их геологическую природу.

Работа с применением метода электромагнитного зондирования предусматривает решение прямой и обратной задач разведки месторождения. Решение прямой задачи выполняется при теоретических исследованиях, результатом которых являются теоретические кривые искомого параметра при заданных (полевых) параметрах [3, 4].

Математическая модель

Для создания программного комплекса необходима математическая модель исследования, на основании которой выбирается среда и средства разработки.

Математическая модель основывается на алгоритме решения прямой задачи электроразведки, в котором поэтапно рассчитываются параметры исследуемой слоистой среды с учетом входных параметров.

Входными параметрами модели являются: r – разнос, f – частота, ε – диэлектрическая проницаемость, ρ_1, ρ_2, ρ_3 – удельное сопротивление слоев d_1, d_2 – мощность слоев.

Выходными параметрами являются: Hz, Hr – магнитные числа среды, $\rho_{эфф}$ – эффективное сопротивление, кривая зависимости $\rho_{эфф}$ от r.

Входные и выходные параметры связаны формулами:

$$Hr = Hr^{одн}(\mathrm{p}_3) - \frac{3(1-\mathrm{i})(\delta_3^2-\delta_2^2)(1-e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})}{r_{cp}^2\delta_2\delta_3((\delta_2+\delta_3)-(\delta_2-\delta_3)e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})} - \\ - \frac{3(1-\mathrm{i})(1-e^{-2\delta_1^2 d1(1+i)})s}{r_{cp}\delta_1\delta_2(\mathrm{p}-\mathrm{q}e^{-2\delta_1^2 d1(1+i)})((\delta_2+\delta_3)-(\delta_2-\delta_3)e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})} \quad (1)$$

$$Hz = Hz^{одн}(\mathrm{p3}) + \frac{9i(\delta_3^2-\delta_2^2)(1-e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})((\delta_2+\delta_3)^2-(\delta_2+\delta_3)^2e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})}{r_{cp}^2\delta_2^2\delta_3^2((\delta_2+\delta_3)-(\delta_2-\delta_3)e^{-2\delta_{2(i+1)}^2})^2} - \\ - \frac{9i(1-e^{-2\delta_1^2 d1(1+i)})(\mathrm{p}^2-q^2e^{-2\delta_1^2 d1(1+i)})s}{r_{cp}^2\delta_1^2\delta_2^2(p-qe^{-2\delta_1^2 d1(1+i)})^2}, \quad (2)$$

где δ_1 δ_2 δ_3 – параметры скин-слоев, вычисляемые по формулам:

$$\delta_1 = 2d_1\sqrt{\frac{f}{\rho_1}};\ \ \delta_2 = 2d_1\sqrt{\frac{f}{\rho_2}};\ \ \delta_3 = 2d_1\sqrt{\frac{f}{\rho_3}} \quad (3)$$

p, q, s – вспомогательные параметры, описываемые формулами:

$$p = (\delta_1 + \delta_2)(\delta_2 + \delta_3) + (\delta_1 + \delta_2)(\delta_2 + \delta_3)e^{-2\delta_2(1+i)} \quad (4)$$

$$q = (\delta_1 + \delta_2)(\delta_2 + \delta_3) + (\delta_1 + \delta_2)(\delta_2 - \delta_3)\mathrm{e}^{-2\delta_2(1+i)} \quad (5)$$

$$s = (\delta_1^2 - \delta_2^2)((\delta_2 + \delta_3)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 e^{-4\delta_2(1+i)}) + 2(\delta_2^2 - \delta_3^2)(\delta_1^2 + \delta_2^2)e^{-2\delta_2(1+i)} \quad (6)$$

Hz и Hr в однородной среде:

$$Hz^{\text{одн}} = -\frac{2}{r^2(k_1^2 - k_0^2)}((9 + k_0 r + 4k_0^2 r^2 + k_0^3 r^3)e^{-k_0^2 r} - \\ -(9 + 9k_1 r + 4k_1^2 r^2 + k_1^3 r^3)e^{-k_1^2 r}) \quad (7)$$

$$Hr^{\text{одн}} = ((\mathrm{k}_1^2 - \mathrm{k}_0^2)r^2 I_0 K_0 - (16 + (\mathrm{k}_1^2 - \mathrm{k}_0^2)r^2)I_1 K_1 + \\ +4(k_1 - k_0)\mathrm{r} I_0 K_1 - 4(k_1 + k_0)\mathrm{r} I_1 K_0), \quad (8)$$

где I, K – функции Бесселя, а k_0, k_1 – волновые числа, определяемые по формулам:

$$k = \sqrt{\omega^2 \mu_a \varepsilon_a + \frac{(\omega^2 \mu_a \varepsilon_a \sigma)i}{\omega \varepsilon_a}}, \quad (9)$$

где ω – круговая частота $\omega = 2\pi f, \varepsilon_a$– абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, σ – электропроводность среды, $\sigma = 1/\rho$.

Как видно из формулы, волновое число K учитывает электромагнитные свойства среды (ρ, ε и μ) и рабочую частоту съёмки.

Поскольку горные породы на каждом участке исследования обладают определёнными значениями ρ, ε и μ, то и волновое число K даже при неизменной частоте на каждом участке и даже каждой точке измерения имеет своё значение и изменяется при изменении рабочей частоты f.

$\mathrm{H_z}$ и $\mathrm{H_r}$ связаны с $\rho_{\text{эфф}}$ выражениями:

$$\rho_{\text{эфф}} = \frac{|Hz|}{|Hr|} r^2 f \quad (10)$$

$$\rho_{\text{эфф}} = 0{,}88 r^2 f (\frac{|Hz|}{|Hr|})^2, \text{ при } \mathrm{H_z/H_r} \text{ меньше } 0{,}1 \quad (11)$$

$$\rho_{\text{эфф}} = 1{,}98 r^2 f (\frac{|Hz|}{|Hr|})^2, \text{при } \mathrm{H_z/H_r} \text{ больше } 100 \quad (12)$$

Программный комплекс

С учетом математической модели в качестве среды разработки выбрана Microsoft Visual Studio и язык программирования C#, которые являются универсальными средствами, позволяющими обрабатывать математические вычисления и графически представлять полученные результаты.

На рисунке представлено главное окно разработанного комплекса. На данном этапе комплекс позволяет строить теоретические кривые с использованием заданных параметров среды.

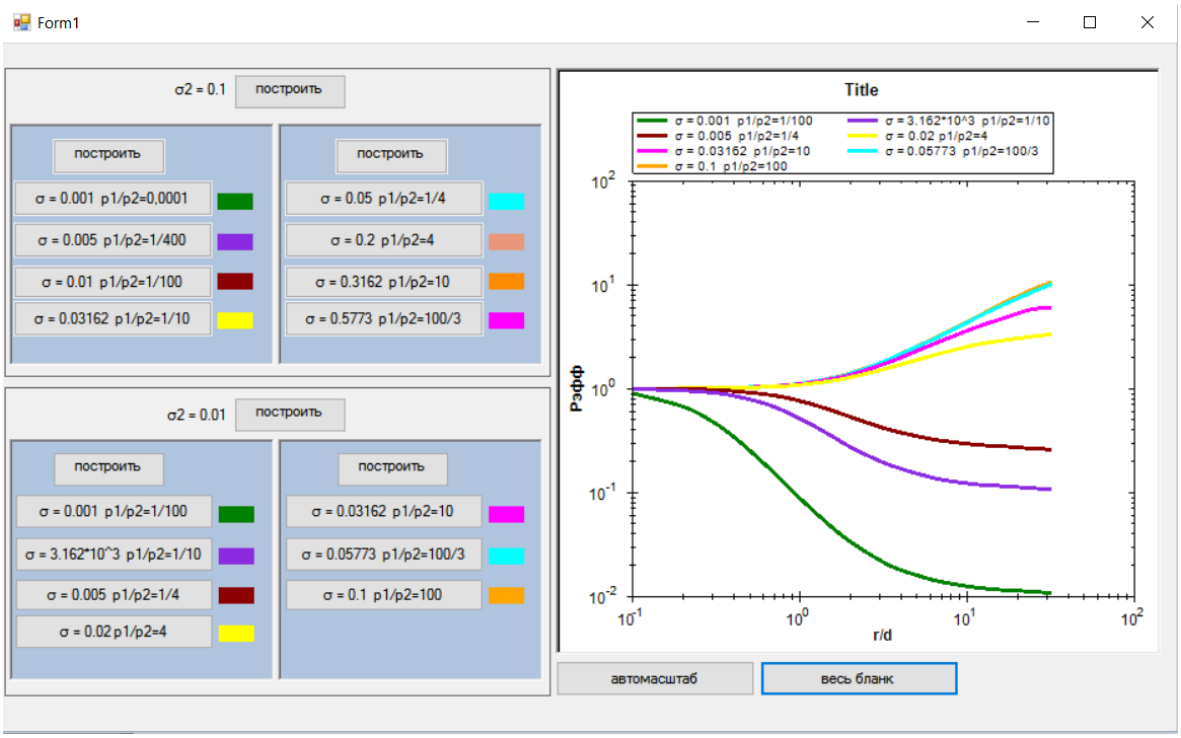


Рис. Главное окно программы

Заключение

Исследование электромагнитного поля (ЭМП) геологической среды проводится аппаратурой ЭММ, начало разработки которой было положено в 60-х гг. прошлого века доктором наук Г.Ф. Игнатьевым. В настоящее время аппаратура совершенствуется и выпускается ООО «Ар Ди Сайнс Россия» в сотрудничестве с СФУ.

Впервые разрабатывается программное сопровождение аппаратуры ЭММ для автоматизации интерпретации полученных результатов электромагнитного зондирования. Это позволит быстро и профессионально строить геологический разрез исследуемой среды для решения геологических задач при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых или инженерно-геологических задач в строительстве, сельском хозяйстве, водоснабжении.

На конференции «Молодежь и наука: проспект Свободный – 2016» работа была удостоена диплома III степени и рекомендована к участию в конкурсе У. М. Н. И. К. 2016 г.

Список литературы

1. Беляков В.И. Дистанционно-частотные зондирования. СПб., 1995. 25 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. Недра, 2006. 316 с.
3. Иголкин В.И. Теоретические основы интерпретации результатов электромагнитного зондирования. Красноярск, 2010. 50 с.
4. Каратаев Г.Д., Панфилов А.Е. Разработка программного обеспечения для интерпретации результатов электромагнитных методов геологической среды [Электронный ресурс] // Сборник материалов Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект Свободный-2015», посвященной 70-летию Великой Победы. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15–25 апреля 2015 г. URL: http://nocmu.sfu-kras.ru/direction/src/техническое/Геология%20и%20разведка%20месторождений.pdf

УДК 004.4, 912.4

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ВЕБ-ПУБЛИКАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

А. К. Матузко
Институт вычислительного моделирования СО РАН
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

GEOINFORMATIONAL PLATFORM CAPABILITIES FOR SPATIAL DATA WEB PUBLISHING

A. K. Matuzko
Institute of Computational Modelling SB RAS
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

В статье показаны возможности веб-публикации пространственных данных, рассмотрены основные стандарты для создания картографических веб-сервисов. Перечислены программно-технологические решения веб-картографии. Проиллюстрирован пример веб-публикации пространственных данных на геопортале ИВМ СО РАН.

Ключевые слова: веб-публикация, пространственные данные, геопортал, веб-картография.

Введение

Поскольку большинство информации имеет пространственную привязку, то владение методами ее анализа и представления оказывается важным, а часто и ключевым при принятии решений и проведении исследовательских работ. Поэтому чем сложнее структура данных и больше их объем, тем нагляднее должно быть визуальное представление данных для пользователей. Различные виды данных, которые имеют некоторую координатную привязку, удобно представить средствами ГИС в виде тематических карт на фоне картографической основы. Данные, которые имеют координатную составляющую, привязывающую их к определенному месту на нашей планете, называют пространственными данными.

Использование пространственных данных и распределенных корпоративных ГИС необходимо для многих потенциальных пользователей пространственной информации. И большинству из них прежде всего требуется просмотр готовых карт, например в окне обычного веб-браузера. Поэтому необходимым пользователю элементом является инструмент, осуществляющий веб-публикацию пространственных данных.

Объем доступных пользователю пространственных данных постоянно увеличивается. Большие объемы информации требуют дополнительных ресурсов, усложняя задачи хранения и поиска. Осуществлять поиск пространственных данных можно по разным параметрам, например по типу элемента, по имени элемента, по атрибутам (метаданным) объекта с возможностью указания сложных критериев (больше, меньше, указание интервала значений), и пространственный поиск объектов [1].

Метаданные представляют собой описания пространственных характеристик объектов. Метаданные могут использоваться как в составе пространственных данных, так и отдельно от них. Способы работы с метаданными не связаны жестко со способами работы с пространственными данными. Для метаданных могут использоваться отличные от пространственных данных специфические права доступа, способы организации хранения [2].

Программно-технологические решения

Перспективным сочетанием геоинформационных и веб-технологий являются геопорталы. Они представляют собой электронные географические ресурсы, размещенные в локальной сети или в сети Интернет, предоставляющие доступ к актуальным пространственным данным всем заинтересованным лицам.

Современные программно-технологические решения в области ГИС все чаще используют сервис-ориентированную архитектуру (SOA – service-oriented architecture), и в этом смысле они становятся похожими на корпоративные информационные системы. SOA – это парадигма, предназначенная для проектирования и разработки приложений как набора взаимосвязанных сервисов в вычислительной среде; модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределенных слабо связанных заменяемых компонентов, оснащенных интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам.

Концепция SOA нашла отражение в картографических веб-сервисах Консорциума OGC (Open Geospatial Consortium), которые являются технологической основой современных геопространственных приложений, обеспечивают эффективную взаимосвязь между клиентскими приложениями и распределенными в сети Интернет пространственными данными [3].

Можно выделить несколько основных принципов сервис-ориентированной информационной системы:

– Система строится на основе набора сервисов – независимых компонентов с опубликованными стандартизированными интерфейсами. Внутренняя реализация сервисов может быть выполнена на любом языке программирования, платформе, операционной системе. Сервисы взаимодействуют между собой и вспомогательными службами посредством открытых стандартов.

– Каждый сервис информационной системы реализует отдельную функцию, которая является логически обособленной, повторяющейся задачей.

– Сервисы могут быть реализованы вне зависимости от других элементов системы, необходимо только знание интерфейсов других сервисов.

Применение на практике основных принципов SOA повышает эффективность процесса разработки и внедрения приложений, обеспечивает повышение производительности и сокращение времени реализации, более быструю и менее дорогую интеграцию приложений.

Большинство современных геоинформационных систем корпоративного уровня разрабатываются на основе рассматриваемого подхода – концепции SOA. При этом одна часть функций – задачи визуализации карты и формирования запросов к пространственным данным – обеспечивается веб-приложениями, а другая – традиционными средствами для Windows/Unix, например сбор, хранение и предварительная обработка геопространственных данных. Веб-ГИС – это геоинформационная система в сети Интернет/Интранет, в которой могут быть реализованы практически любые функции, доступные в настольной ГИС – навигация по карте, редактирование данных, пространственный анализ, поиск, геокодирование. Для работы в веб-ГИС пользователю не требуется специализированного программного обеспечения или квалификации ГИС-специалиста, достаточно наличия веб-браузера [4].

Сервис-ориентированная архитектура геопространственного веб-приложения основана на модели клиент-сервер, в которой клиентское приложение (интерфейс веб-сайта) предоставляет пользователю доступ к геоданным, которые, в свою очередь, размещены на одном или нескольких серверах пространственных данных. Интерфейс пользователя может предусматривать доступ к различным представлениям данных, для реализация которых может потребоваться создание отдельных самостоятельных сервисов приложения [5].

Будем рассматривать технологии картографических веб-сервисов как системообразующий элемент программного обеспечения прикладной ГИС на основе технологий геопортала. Анализ возможностей существующих программных систем и тенденций в развитии технологий в рассматриваемой предметной области позволил выделить несколько актуальных задач и направлений в разработке программно-технологического обеспечения, решение которых может заметно повысить эффективность выполняемых работ по созданию прикладных региональных геоинформационных систем, обеспечить тиражируемость отдельных компонент между различными системами. Было выделено четыре основных блока:

– подсистема ведения архива базовых геопространственных данных;
– система прикладных программных (картографических) веб-сервисов;
– подсистема управления пространственными метаданными;
– веб-портал.

Автоматизация решения этих задач позволяет заметно сократить время разработки систем для конечных пользователей [6].

Веб-публикация на геопортале ИВМ СО РАН

Геопортал ИВМ СО РАН – это программно-технологическое обеспечение, ориентированное на веб-публикацию междисциплинарных проектов. Рассмотрим на примере проекта «Исследования территории заповедника “Центальносибирский”» возможности веб-публикации пространственных данных на геопортале ИВМ СО РАН. На рис. 1 представлена стартовая страница проекта.

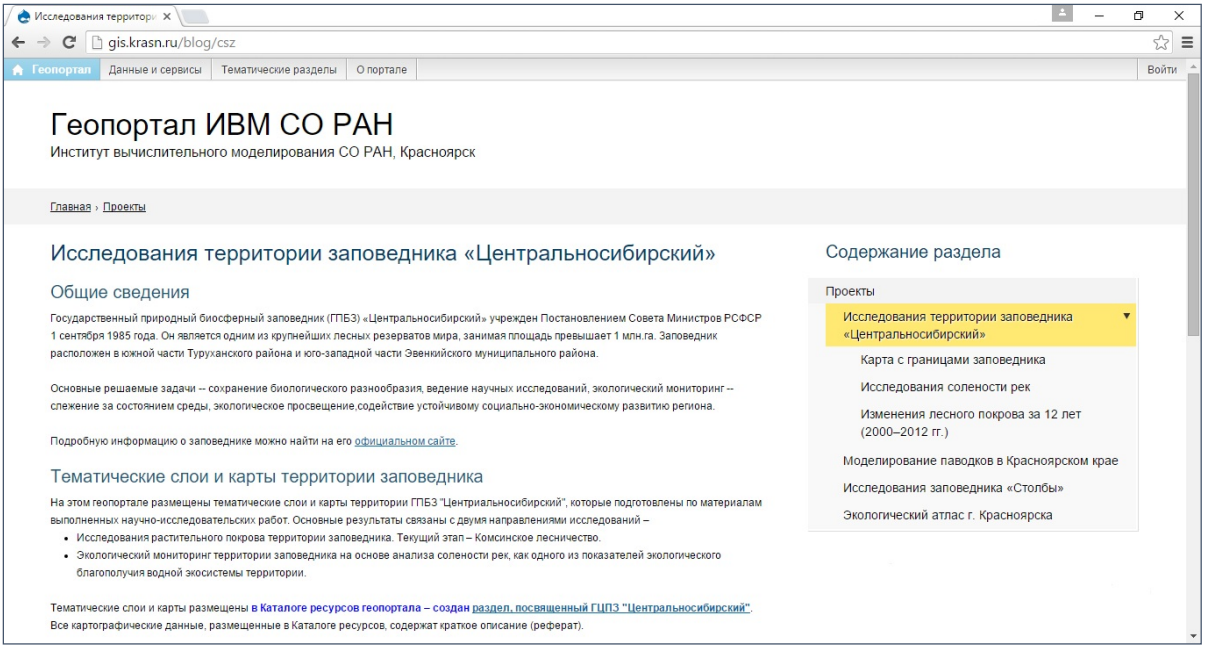


Рис. 1. Стартовая страница проекта ГЦПЗ «Центральносибирский»

В каталоге ресурсов геопортала создан раздел, посвященный ГЦПЗ «Центральносибирский», где размещены тематические слои и карты территории, которые подготовлены по материалам выполненных научно-исследовательских работ. Все картографические данные, размещенные в каталоге ресурсов, содержат краткое описание. После нажатия на кнопку «Показать карту» на странице краткого описания открывается полигональный слой, который отображает данные по выделам березы, ели, кедра, лиственницы, осины, пихты, сосны и болот, как показано на рис. 2.

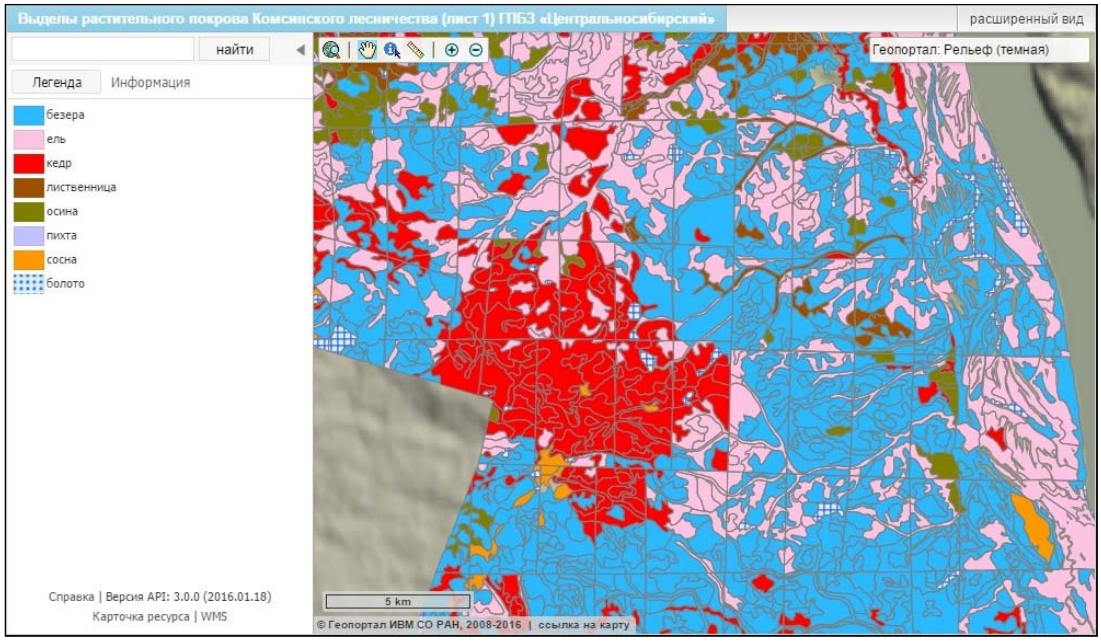


Рис. 2. Выделы растительного покрова ГЦПЗ «Центральносибирский»

Заключение

Геопорталы являются универсальным инструментом для веб-публикации различных пространственных данных. Развитие веб-публикаций – следствие большого интереса к пространственным данным и результатам их анализа и обработки. Такое представление данных удобно для пользователей с разным уровнем подготовки. При разработке геопорталов важно использовать стандарты пространственных данных, которые разрабатывает и утверждает международная некоммерческая организация OGC.

Список литературы

1. Матузко А.К. Геопортал – современный инструмент для органов административного управления // Проблемы информатизации региона. ПИР-2015: Материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Л.Ф. Ноженковой; отв. за вып. А.А. Евсюков. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015.

2. Кошкарев А.В. Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Пространственные данные. 2008. № 2. С. 6–14.

3. Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Разработка программных средств сбора и визуализации данных наблюдений для геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 23–31.

4. Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Сервис-ориентированные веб-системы для обработки геопространственных данных // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2015. Т. 13. № 1. С.37–45.

5. Якубайлик О.Э. Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 1. № 27. С. 40–45.

6. Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Разработка прикладных ГИС на основе технологий геопортала // Образовательные ресурсы и технологии. 2016’2 (14). С. 202–209.

УДК 004.032, 528.88

ОНТОЛОГИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К. В. Раевич, Ю. А. Маглинец
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: ksenia_248@mail.ru
e-mail: maglinets@mail.ru

THE ONTOLOGY OF TASK OF ESTIMATION OF LANDS OF AGRICULTURAL PURPOSE

Разработана онтология задач ранжирования сельскохозяйственных земель на основе оперирования знаниями об их характеристиках и данными ГИС агромониторинга. Рассмотрена архитектура интеллектуальной информационной системы, реализующей разработанную модель.

Ключевые слова: онтололгия, агромониторинг, ГИС.

Введение

Задача оценки состояния земельных ресурсов, используемых в сельскохозяйственном производстве, носит междисциплинарный характер. Она возникает в решении вопросов организации управления АПК, в растениеводстве, землеустройстве, экономике, кадастровом учете и др. Земля, как объект оценивания, представляет собой сложную, иерархическую, многофакторную систему.

В первом приближении все задачи оценивания можно разделить на две категории. В первом случае целью является получение интегральной оценки текущего состояния земельного участка, основанной на натурных измерениях, знаний о предыстории его использования, состояния его инфраструктуры и других значимых факторов. В зависимости от особенностей задачи результатом ее решения может являться оценка рыночной либо кадастровой стоимости, присвоение балла бонитета, ранга в системе сравнительного анализа земель и др. Во втором случае целью является получение частной оперативной оценки состояния растительного покрова либо хода агротехнических мероприятий. Такая необходимость возникает в задачах мониторинга, результаты используются для принятия управленческих решений, контроля эффективности мероприятий, расходования бюджетных средств, прогнозирования урожайности, формирования отчетности и др.

Анализ литературы [1–8] показывает высокую вариабельность задач оценивания ЗСХН и методов их решения. В целом можно отметить наличие в научной литературе по данному вопросу множества частично перекрывающихся систем классификации параметров земель, существенных при оценивании. Основой для непротиворечивого представления информации, полученной из разнородных источников, является онтологический подход. В настоящей работе предлагается способ формирования библиотеки схем решения задач оценивания в диалоге с конечным пользователем, базирующейся на системе упорядочения знаний о землях сельскохозяйственного назначения как об объектах оценивания в форме онтологии, инвариантной к конкретной решаемой задаче.

Материалы и методы

Подходы к построению онтологии оценивания агроэкономического потенциала земель развиты в работах [8–9]. При построении онтологии под объектом оценивания

(ОО) будем понимать пространственно локализованный участок земной поверхности, находящийся в сельскохозяйственном обороте в настоящее время, в прошлые временные периоды либо потенциально рассматриваемый в качестве такового. Согласно российскому законодательству, в данную категорию попадают земли сельскохозяйственного назначения (ЗСХН). Кроме того, в качестве объекта оценивания могут рассматриваться и другие категории земель, относительно которых существуют планы перевода в данную категорию после выполнения мелиоративных мероприятий: например, земли промышленности, лесного фонда.

Онтология оценивания задается четверкой

$$O = <K,T,E,M>, \quad (1)$$

где K – таксономия признаков оценивания; T – множество решаемых задач; E – множество метрик оценивания признаков; M – множество первичных метрик, позволяющих вычислить численное значение признака в натуральном выражении.

В основе рассматриваемой онтологической модели лежит таксономия K-оценивания агроэкономического потенциала земель (ТОАПЗ)

$$K = <N,R>, \quad (2)$$

где $N = \{ni\}$ – множество классов таксономии – признаков объекта оценивания, $R \subset N \times N$ – отношение порядка на N. Корневая вершина таксономического дерева соответствует искомой интегральной характеристике объекта оценивания. В рассматриваемой версии таксономии, верхний уровень классификации задает шесть классов признаков, исчерпывающим образом описывающих предметную область: ФР – физические факторы рельефа; ПК – природно-климатические условия; АЭФОИЗ – агроэкономические факторы использования земель; РП – свойства растительного покрова; ОИ – эффективное расстояние до объектов инфраструктуры.

Далее, при нисходящем построении таксономии оценивания, сформированы поддеревья различной глубины, вершины которых могут быть классифицированы следующим образом: абстрактные вершины; означиваемые вершины. Абстрактные вершины – вершины, используемые при классификации и навигации по ТОАПЗ, для которых не предусмотрена процедура вычисления оценки. Означиваемые вершины – соответственно, вершины, для которых существует формально определенная процедура, позволяющая сопоставлять ОО значение соответствующего признака. Все листовые вершины дерева таксономии являются означиваемыми. Означивание для листовой вершины – это процедура расчета оценки, основанная на измерении натурных параметров ОО. Для узлов ветвления в общем случае существует два способа означивания: 1) способ, аналогичный способу, определенному для листовой вершины; 2) способ, основанный на агрегации параметров, ранее вычисленных для дочерних вершин данного узла. Далее по тексту будем называть их, соответственно, означиванием на основе измерения, означиванием на основе агрегации. Такой механизм позволяет осуществлять оценивание ОО с разной степенью точности, в зависимости от особенностей решаемой задачи, стоимости (в широком смысле) получения данных и т. п.

Для измерения натурных параметров в онтологии используются первичные метрики, представленные в (1) множеством M. Отдельная метрика $mi \in M$ представляет собой функциональное свойство, сопоставленное соответствующему узлу $nj \in N$, для которого установлены интервал допустимых значений и единица измерения.

Для означивания на основе измерений в онтологии представлено множество метрик оценивания $Em \subset E$, также заданных в форме функциональных свойств $ej \in Em$, сопоставленных узлу nj. Для ej определена функциональная зависимость, позволяющая вычислить численную оценку признака ni на основе значения первичной метрики mj.

Результирующая комбинация <ni,mj,ej> ∈ N ×M×Em задает экземпляр соответствующего тернарного отношения, однозначно определяющий правила означивания на основе измерения.

Для означивания на основе агрегации в онтологии представлено множество метрик оценивания Ea ⊂ E; E = Em ∪ Ea.; Em ∩ Ea = Ø. Отдельная метрика ei описывается:

1) функциональным свойством, соотносящим ei оцениваемому признаку nj;

2) взвешенным деревом агрегации глубины 1 с корневой вершиной ei и множеством вершин – метрик оценивания, инцидентных элементам подмножества X множества дочерних вершин Y вершины nj в таксономии оценивания. Веса дуги дерева характеризуют степень влияния оценки соответствующей дочерней вершины на оценку корневой вершины;

3) вычислительной процедурой, позволяющей вычислить оценку ei для признака nj на основе агрегации значений оценок узлов xl ∈X и весов дуг дерева агрегации.

Рассмотренные выше компоненты онтологии задают основу для построения системы решения задач оценивания. Решаемые задачи tj задают множество Т-задач, представленных в ТОАПЗ. Структура описания отдельной задачи ti аналогична структуре ТОАПЗ:

$$ti = <Ki, Ei, Mi>, \quad (3)$$

где Ki ⊂ K – подграф таксономии оценивания, соответствующий решаемой задаче; Mi ⊂ M – множество первичных метрик, релевантных задаче оценивания; Ei – множество метрик оценивания. В качестве Ei может выступать подмножество E. Альтернативный вариант – построение Ei на основе модифицированного подмножества E. Модификация осуществляется с целью подбора более точных способов оценивания, соответствующих решаемой задаче.

Архитектура интеллектуальной информационной системы

Основные компоненты системы показаны на рис. 1. База знаний содержит репозиторий онтологий, поддерживает средства обеспечения целостности информации, управления версиями и изменениями. Редактор базы знаний позволяет эксперту, ответственному за содержание онтологии, осуществлять диалоговые операции по созданию новой онтологии (версии онтологии) и ее редактированию в части описания таксономии, метрик измерения натурных параметров ОО и вычислительных соотношений. Генератор схемы решения задачи (СРЗ) позволяет эксперту, ответственному за представление задачи, создавать и поддерживать модель описания задачи в рамках определенной версии онтологии, а также осуществлять операции по миграции описания задачи в обновленные версии онтологии. При создании и модификации онтологии возникает процедура описания вычислительных соотношений для метрик оценивания. Данная процедура базируется на использовании редактора формул, который входит как компонента в редактор базы знаний и генератор схемы решения задачи. Помимо базовых математических операций, генератор формул содержит возможность формирования таблично заданных функций.

Редактор геопространственных данных (ГПД) служит для подготовки и оперирования геопространственным описанием экземпляра решаемой задачи. При создании пустого экземпляра решаемой задачи модуль выгрузки СРЗ порождает шаблон векторного слоя с предопределенным набором атрибутов, заданных в схеме решения задачи, который помещается в базу ГПД. Затем слой наполняется данными о пространственных координатах ОО, тем самым формируется векторное представление данных на анализируемую территорию, содержащее множество ОО, как геопространственных объектов.

Атрибутивная информация содержит значения натурных параметров ОО. Поставка атрибутивной информации – ответственность модуля импорта-экспорта данных. Данный модуль взаимодействует с автоматизированной системой агромониторинга [10] и другими внешними системами, что позволяет получать данные на основе обработки и анализа космоснимков, наземных измерений, данных метеостанций и других источников.

Расчет промежуточных и финишных оценок осуществляется модулем расчета оценок. Визуализация оценок осуществляется через интерфейс расчетчика, позволяющий формировать пространственное представление данных в виде векторных слоев с вычисленными атрибутами, а также отображать данные в табличной форме либо средствами деловой графики.



Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы оценивания

Результаты и обсуждение

В настоящее время создан действующий прототип системы, осуществляется отработка методик ее функционирования. В качестве инструментального обеспечения системы выступило свободно распространяемое программное обеспечение Protégé 3.5, Quantum GIS 1.8, а также авторское программное обеспечение, созданное на языке C#, реализованное на основе среды программирования Microsoft Visual Studio 2013.

Онтология построена на базе использования концептуальной модели, рассмотренной в [8].

В качестве иллюстрации функционирования системы рассмотрены схемы, полученные в ходе решения следующих задач: 1) определение оценочной степени эффективности сельскохозяйственных угодий при выращивании яровой пшеницы (t1), 2) определение степени засоренности полей под парами (t2).

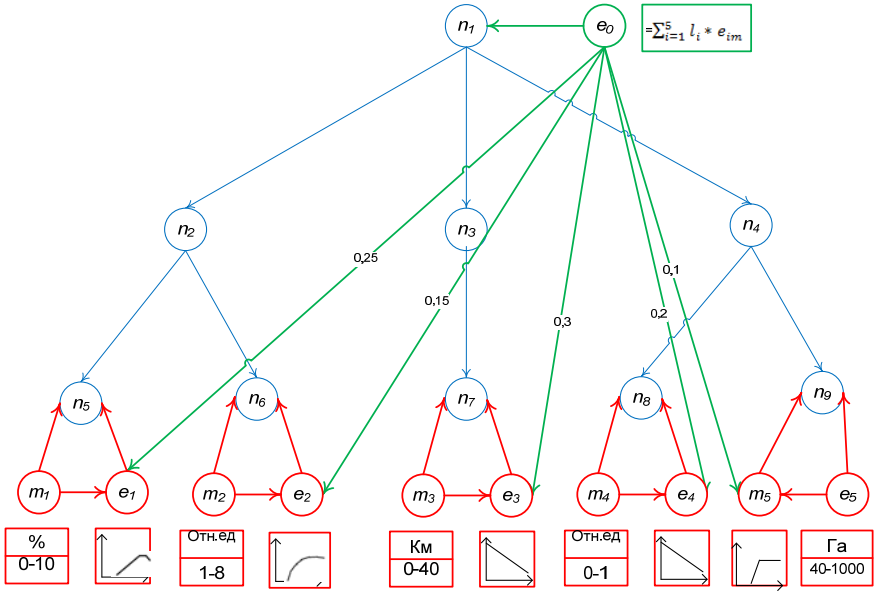
При формировании схемы решения задачи t1 = <K1,E1,M1>, построено дерево классификации признаков оценки K1, показанное на рис. 2 (выделено синим цветом). Каждой из листовых вершин дерева установлено в соответствие функциональное свойство mi ∈ M1, характеризующее численное значение, единицу измерения и допустимый диапазон значений соответствующей первичной метрики, и функциональное свойство ejm ∈ E1m, определяющее способ вычисления оценки. Для удобства оперирования все функциональные зависимости ejm отображают измеримый

интервал значений первичных метрик в диапазон [0..1]. При этом используются аналитически либо таблично заданные функции преобразования. На рис. 2 схематично отображены соответствующие слоты описания данных свойств (красным цветом). Так, значение контурности поля и расстояние до центра переработки обратно пропорционально значению оценки; функции для оценки влияния содержания гумуса, кислотности почвы и площади поля заданы таблично. Множество E1a = {e1a} в описании задачи t1 состоит из единственной вершины, инцидентной корневому узлу дерева K1. Метрике сопоставлено взвешенное дерево, показанное на рис. 2 зеленым цветом. Вычислительное соотношение для данной метрики определено как

$$O(e_{1a}) = \sum_{i=1}^{5} l_i \cdot e_{im}, \quad (4)$$

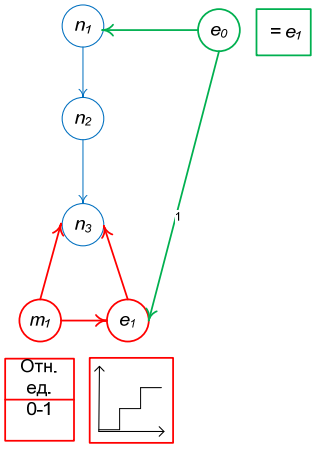
где l_i – вес соответствующей дуги.

На основании сформированной схемы описания задачи t_1 осуществляется ранжирование выделенной совокупности земельных участков по степени пригодности для культивирования яровой пшеницы. Результирующая информация подготавливается в виде атласов земель в разрезе хозяйств, а также в виде столбчатых диаграмм, отображающих ранг того или иного поля.



n_2 – СП; n_3 – ОИ; n_4 – ФР; n_5 – содержание гумуса; n_6 – кислотность; n_7 – расстояние до центра переработки; n_8 – контурность; n_9 – площадь.

Рис. 2. Схема описания задачи t_1



n_2 – РП; n_3 – значение NDVI.

Рис. 3. Схема описания задачи t_2

Граф решения задачи t_2 показан на рис. 3. Схема базируется на использовании единственного параметра – индекса NDVI. Непосредственное применение схемы позволяет осуществить интегральную оценку засоренности поля под паром путем соотнесения с одним из предопределенных классов: «открытая почва», «поле, требующее обработки», «поле с высокой степенью засоренности». Результирующая информация подготавливается в виде атласов земель под паром в разрезе хозяйств, а также в случае применения расчетов на протяжении полевого сезона – в виде графиков изменения степени засоренности полей во времени.

Выводы

Интеллектуальная информационная система оценивания ЗСХН представляет собой инструмент, в котором содержатся постоянно пополняемая и уточняемая система

знаний о землях сельскохозяйственного назначения как о сложных, многофакторных объектах. Механизм уточнения и расширения базы знаний обеспечивается через систему контроля версий. Разработанная система дополняет ранее созданную авторским коллективом автоматизированную систему агромониторинга, позволяя создавать и накапливать библиотеку схем решения задач оценивания ЗСХН, включая возможность динамического наблюдения за их изменением в ходе сезона вегетации и поддержки принятия управленческих решений. Схемы решения задач создаются на базе экспертных оценок и, после отладки на существенном объеме экспериментальных данных, могут использоваться как объективный инструмент, масштабируясь на другие территории, обладающие сходной совокупностью природно-климатических условий. Таким образом, поддерживается четырехуровневое представление информации: 1) система знаний, описывающая предметную область оценивания ЗСХН; 2) схема задачи, описывающая конкретную постановку задачи и содержащая декларативные и процедурные средства для ее решения; 3) экземпляр решаемой задачи, локализованный на местности; 4) решение задачи, локализованное во времени.

Представленные в работе модели в настоящее время проходят экспериментальную апробацию при решении задач оценивания ЗСХН на территории Сухобузимского района Красноярского края в интересах администрации района и хозяйствующих субъектов.

Список литературы

1. Мартынов К.П. Оценка земель сельскохозяйственного назначения // Электронный журнал МГУ Н.П. Огарева. 2012. Вып. 4 (18).

2. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным LANDSATи MODIS / А.Г. Терехов, И.С. Витковская, М.Ж. Барталева, Л.Ф. Спивак // Седьмая Всеросс. открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2009 г. С. 292–304.

3. Анохин Е.И. Понятие, принципы и методы оценки земель сельскохозяйственного назначения // Проблемы современной экономики. N 3 (35). 2010.

4. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Егоров А.В. Методология оценки ресурсного потенциала земель России для сельскохозяйственного производства (на примере хмеля) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2014. Вып. 73. С. 19–53.

5. Стадник А.П., Лукіша В.В. Формування критеріїв та показників для еколого-економічного оцінювання сільськогосподарського землекористування // Агроекологічний журнал. 2011. № 3. С. 5–12.

6. Гуреева О.В. Особенности земель сельскохозяйственного назначения как объекта оценки. // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2008. N 4. С. 78–81.

7. Концептуальная модель предметной области оценивания земель сельскохозяйственного назначения на основе привлечения геопространственной информации / К.В. Шатрова, Ю.А. Маглинец, М.А. Аникьева, М.Г. Герасимчук // Одиннадцатая открытая Всеросс. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН. М., 2013. С. 65.

8. Шатрова К.В., Маглинец Ю.А., Цибульский Г.М. Модель представления информации о состоянии и динамике земель сельскохозяйственного назначения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 8. С. 984–989.

9. Intelligent geoinformation technology for agroecological mapping / S.E. Perfil'ev, Y.A. Maglinets, G.M. Tsibul'skii, E.A. Mal'tsev, A.A. Latyntsev, K.V. Shatrova // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol 23 (4). P. 528–535.

УДК 528.852

ВЫБОР РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАСТЕРНОГО АЛГОРИТМА [1]

В. С. Сидорова
ФГБУН РАН «Институт вычислительной математики и математической геофизики» (ИВМиМГ СО РАН)
e-mail: svs@ooi.sscc.ru

SEARCH DIMENSION of THE SPECTRAL FEATURES SPACE to THE CLUSTER ALGORITHM

V. S. Sidorova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
e-mail: svs@ooi.sscc.ru

Предлагается алгоритм понижения размерности данных в процессе иерархической гистограммной кластеризации данных дистанционного зондирования Земли. Иллюстрировано применение алгоритма к многоспектральным данным.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, кластеризация, многомерная гистограмма, кластерная разделимость, собственный вектор.

В работе рассматривается вопрос о сокращении размерности собственного пространства признаков внутри каждого кластера, полученного методом иерархического гистограммного алгоритма [1]. Гистограмма рассматривается как плотность вероятности векторов. Учитывая сложность данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а именно то, что различные кластеры, относящиеся к разным объектам, могут иметь различную размерность собственного пространства, определение этой размерности оправдано и ведет при кластеризации к сокращению времени вычислений и числа кластеров.

Кластерный алгоритм [1] основан на быстром гистограммном методе Нарендры [2]. То есть кластеризация осуществляется путем деления многомерной гистограммы признаков по унимодальным кластерам. Идея метода Нарендры в том, что каждому локальному максимуму гистограммы соответствует кластер, а граница между кластерами проходит по долинам гистограммы. Ценность алгоритма в том, что он не требует задания a priori никаких параметров, формы и числа кластеров, кроме детальности кластеризации, которая заключается в предварительной подготовке изображения, а именно: число квантовых уровней определялось числом отсекаемых битов в байтах спектральных данных. Этот алгоритм реализован автором в [3, 4]. Алгоритм же [1] предлагает автоматизировать выбор детальности, основываясь на разделимости кластеров. В качестве мер разделимости предложены меры [5]: мера отделимости для отдельного унимодального кластера $m^j(n)$ (1) и мера качества распределения в целом $m(n)$ по $K(n)$ кластерам (2):

$$m^j(n) = \frac{1}{B^j(n) \times H^j(n)} \sum_{i=1}^{B^j(n)} h_i^j(n), \quad (1)$$

$$m(n) = \frac{1}{K(n)} \sum_{j=1}^{K(n)} m^j(n), \quad (2)$$

[1] Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

где $h_i^j(n)$ – значение гистограммы в *i*-й точке границы кластера *j*; $B^j(n)$ – число точек границы кластера; $H^j(n)$ – максимальное значение гистограммы.

Минимумы меры (2) соответствуют лучшим распределениям с наиболее разделенными кластерами в среднем. Всегда $m^j(n) \le 1$ и $m(n) \le 1$. Ценность этих мер в том, что они позволяют сравнивать распределения с тесно расположенными унимодальными кластерами, когда на их границах много общих векторов. Эти меры удовлетворяют условиям мер разделимости [6]: значения их убывает с увеличением расстояния между кластерами и ростом компактности кластеров (в смысле близости векторов кластера к модальному вектору). Кроме того, эти меры легко вычисляются, так как сравнивают скалярные значения гистограммы в центре и на границах кластеров. Границы кластеров легко находятся, используя списки соседей векторов, построенных как составная часть алгоритма Нарендры.

Алгоритм [1] представляет данные в их иерархической вложенности, последовательно увеличивая детальность рассмотрения. Задаваемым параметром кластеризации является отделимость каждого полученного кластера *d*. Иерархический процесс деления кластеров заканчивается тогда, когда достигается максимальное значение признака по каждому спектральному каналу (обычно 255) либо по заданному числу иерархических этапов. Затем автоматически анализируются полученные результаты, и происходит возврат к тем детальностям, на которых отделимость кластера была не больше *d.* Кластеры, не удовлетворяющие этому условию, объединяются в один ложный кластер. Заметим, что тенденция такова, что с ростом детальности средняя разделимость кластеров уменьшается, соответственно (2) увеличивается. Однако отделимость отдельных кластеров (1) может оказаться ниже *d,* поэтому требуется пройти процесс детализации до конца. После кластеризации осуществляется глобальная сегментация изображения. В результате работы алгоритма [1] получаем существенно меньше кластеров, чем прямым алгоритмом Нарендры за счет того, что выбираем детальность рассмотрения области данных так, чтобы не нарушалось условие разделимости. Отделимость всех полученных унимодальных кластеров меньше заданного *d.* В то же время сохраняются достоинства алгоритма Нарендры: независимость от формы и задания числа кластеров, быстрота.

В данной статье предлагается учитывать не только то, что детальность в разных областях данных различна, но и размерность данных различна. Квантование пространства признаков может производиться по разным правилам. У Нарендры оно достигалось отсечением младших битов в каждом спектральном канале. Каждое отсечение уменьшает число уровней квантования вдвое. В работе [5] был предложен другой способ, более плавный, но по-прежнему в каждом спектральном направлении число уровней квантования сохранялось одинаковым. Однако в общем случае данные вытянуты вдоль какого-то направления и правило квантования, обеспечивающее наименьшую потерю информации, требует различного подхода в различных направлениях, а именно: квантование должно сохранять ячейку квантования в форме гиперкуба (а не гиперпараллелепипеда). Это условие будет выполнено, если:

$$\frac{N_{e1}}{S_{e1}} = \frac{N_{e2}}{S_{e2}} = \ldots = \frac{N_{ek}}{S_{ek}}, \qquad (3)$$

где N_{e1}, N_{e2}, ..., N_{ek} – числа уровней квантования вдоль для соответствующих собственных векторов по *k*-ортонормированным осям собственного пространства, а S^2_{e1}, S^2_{e2}, ..., S^2_{ek} – собственные числа.

Зададим максимальное число уровней квантования в собственном пространстве равным N_{em} = 255, таково обычное число уровней серого для данных дистанционного

зондирования по каждому измерению. Тогда в соответствии с пропорциями (1) может быть найдено число уровней квантования и по другим осям собственного пространства. Для задач кластеризации это число должно быть больше или равно 2, иначе эта компонента одинакова для всех векторов и никакой роли в кластеризации не играет. Таким образом, если отношение $S_{em}/S_{ex} < 2$, то соответствующая ось x может не рассматриваться, и мы получаем сокращение размерности пространства признаков.

Ранее [7] было предложено сокращать размерность перед использованием алгоритма кластеризации. Пример: на рис. 1 представлено изображение района Улан-Удэ с целью выделения области загрязнения территории. Это семиспектральное изображение Бурятии со спутника Landsat-8, район Улан-Удэ. Исходный файл предоставлен Сибирским центром ФГПУ НИЦ «ПЛАНЕТА». Построение ковариационной матрицы спектральных данных для всего изображения и ее диагонализация методом Якоби [8] показали, что можно рассматривать три измерения без существенной потери информации. Сокращение размерности приводит к экономии компьютерного времени.

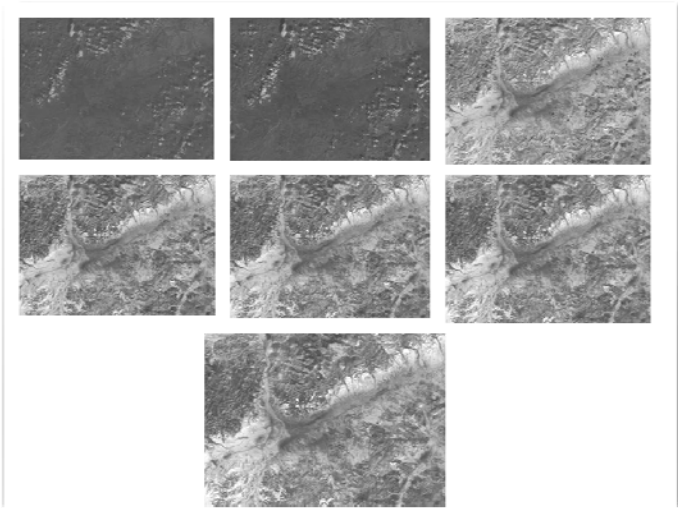


Рис. 1. Семиспектральное изображение со спутника Landsat-8, район Улан-Удэ

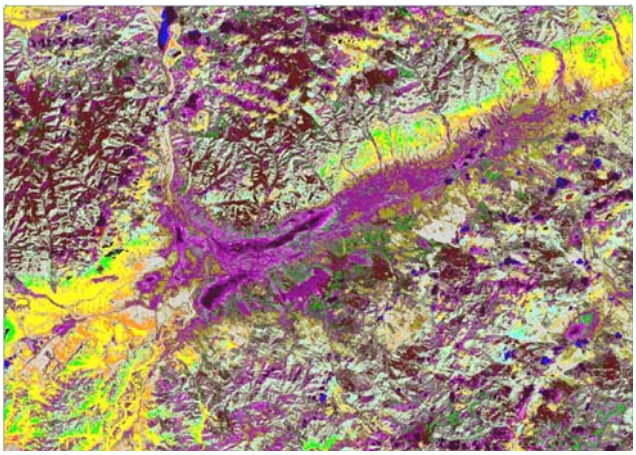


Рис. 2. Кластерная карта, полученная делимым иерархическим гистограммным алгоритмом. 15 этапов иерархии. *d* = 0, 015. 54 кластера (включая маленькие вплоть до 1 пикселя). Загрязнение: лиловые и темно-зеленые оттенки

Здесь рассматривается сокращение размерности внутри каждого кластера. Ковариационная матрица строится для векторов данного кластера. Переходя от

кластера к кластеру, каждый раз определяется максимальное значение S, а затем с использованием (3) определяется квантование других осей и размерность пространства.

Рассмотрим пример. Анализируется изображение поверхности Земли со спутника NOAA 17 от 07.04.2003, полный кадр (1328×624) пикселей представлен в пяти спектральных каналах (один – в видимой части спектра, остальные – в инфракрасной), объем около 4 Мб. На рис. 3 представлено изображение в одном из каналов. Визуальный анализ изображений в каждом спектральном канале показывает, что снизу-вверх слева-направо на рис. 3, *a* видно формирование вихря (по форме напоминает дракона); в верхней части рис. 3 в основном тающие снега, тайга Сибири.

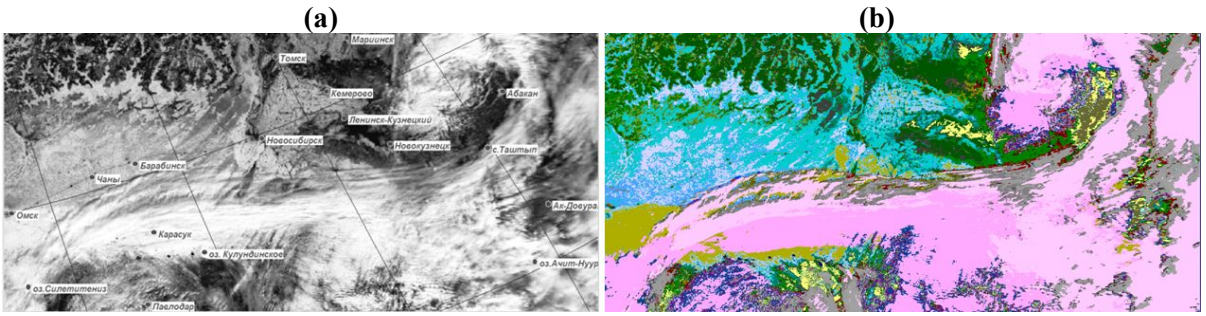


Рис. 3. a) исходное изображение в видимой части спектра; b) кластеризация иерархическим гистограммным алгоритмом с поиском размерности по кластерам; 7 этапов иерархии; задано d = 0,12; получено 29 кластеров

Кластеры с площадью меньше 100 пикселей отнесены в фоновый. Для большинства подкластеров размерность собственного пространства оказалась равна 3, как и для всех данных в целом, но некоторые подкластеры (соответствующие полупрозрачным облакам) потребовали пятиспектрального рассмотрения. Таким образом, сокращение размерности произошло более точно, в зависимости от характера области данных. Время вычислений оказалось в три раза меньше, чем для пятиспектрального варианта, и составило несколько минут на одноядерном компьютере РК 1,6 ГГц 512 МБ.

Предложен иерархический гистограммный алгоритм, который получает иерархическую последовательность кластеров с отделимостью не хуже заданной d ($0 < d < 1$), и определяемой размерностью данных.

Список литературы

1. Sidorova V.S. Detecting Clusters of Specified Separability for Multispectral Data on Various Hierarchical Levels // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014. Vol. 24, No. 1. P. 151–155.

2. Narendra P.M. and Goldberg M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT // Pattern Recognition. 1977. 9. P. 207–215.

3. Сидорова В.С. Кластеризация многоспектральных изображений с помощью анализа многомерной гистограммы // Математические и технические проблемы обработки изображений. СО АН СССР. Новосибирск, 1986. С. 52–57.

4. Сидорова В.С. Классификация многоспектральных космических изображений поверхности Земли с помощью разделения многомерной гистограммы по унимодальным кластерам // Вестник КазНУ. Сер. географическая. 2004. № 2 (19). С. 206–210.

5. Сидорова В.С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом // Автометрия. 2007. Т. 43. № 1. С. 37–43.

6. Halkidi M., Batistakis Y. and Vazirgiannis M. On clustering validation techniques // Journal of Intelligent Information Systems. 2001. № 17 (2–3). P. 107.

7. Сидорова В.С. Гистограммная кластеризация данных дистанционного зондирования Земли // Материалы II Междунар. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск, 2015. С. 213–218.

8. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

УДК 629.783

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПЕРСОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. Тогачев, Г. А. Кочергин, А. Л. Царегородцев
АУ «Югорский НИИ информационных технологий»
e-mail: office@uriit.ru

Статья посвящена решению актуальной для северных территорий проблеме, которая заключается в обеспечении мониторинга местоположения и двухсторонней передачи информации в условиях отсутствия покрытия сигналами сотовой связи в отдаленных и труднодоступных местах, в полярных широтах, в районах Сибири и Дальнего Востока со слаборазвитой дорожной инфраструктурой и низкой плотностью населения.

Введение

В 2014 г. в Югорском научно-исследовательском институте информационных технологий (далее – ЮНИИ ИТ) разработана информационная система [1] отслеживания местонахождения и движения по маршрутам объектов персонального мониторинга с возможностью двухстороннего информационного обмена (далее – информационная система персонального мониторинга, Система). Основным назначением Системы является автоматизированное получение информации о текущем местонахождении подвижной техники или личного состава, выполняющих работы, связанные с длительным передвижением по маршрутам, проходящим вне зон покрытия операторов сотовой связи, и осуществление с ними двустороннего обмена информационными сообщениями.

Главным преимуществом разработанной Системы является использование в ее составе сотового и спутникового каналов связи для обмена пространственными данными и информационными сообщениями. Такой подход позволяет обеспечить глобальное покрытие всей территории вне зависимости от условий приема сигналов сотовой связи. Создание подобной системы особенно актуально в северных регионах со слаборазвитой коммуникационной инфраструктурой и недостаточной протяженностью транспортных сетей, где нередко даже вдоль трасс федерального и регионального значения местами отсутствует покрытие сотовой связью одного или сразу нескольких операторов.

Структура и функционирование Системы

Информационная система персонального мониторинга состоит из трех основных уровней, на каждом их которых используются стандартные сервисы, объединяемые общей интеграционной оболочкой:

– уровень визуализации данных, который позволяет зарегистрированным пользователям системы вести наблюдение за удаленными абонентскими устройствами;

– уровень обработки и хранения данных, на котором осуществляется обмен сообщениями и информацией о местоположении объекта между зарегистрированными пользователями и удаленными абонентскими устройствами;

– уровень сбора данных о местоположении удаленного абонентского устройства.

Система реализована в виде веб-приложения. На рис. 1 представлен веб-интерфейс главной страницы системы персонального мониторинга.

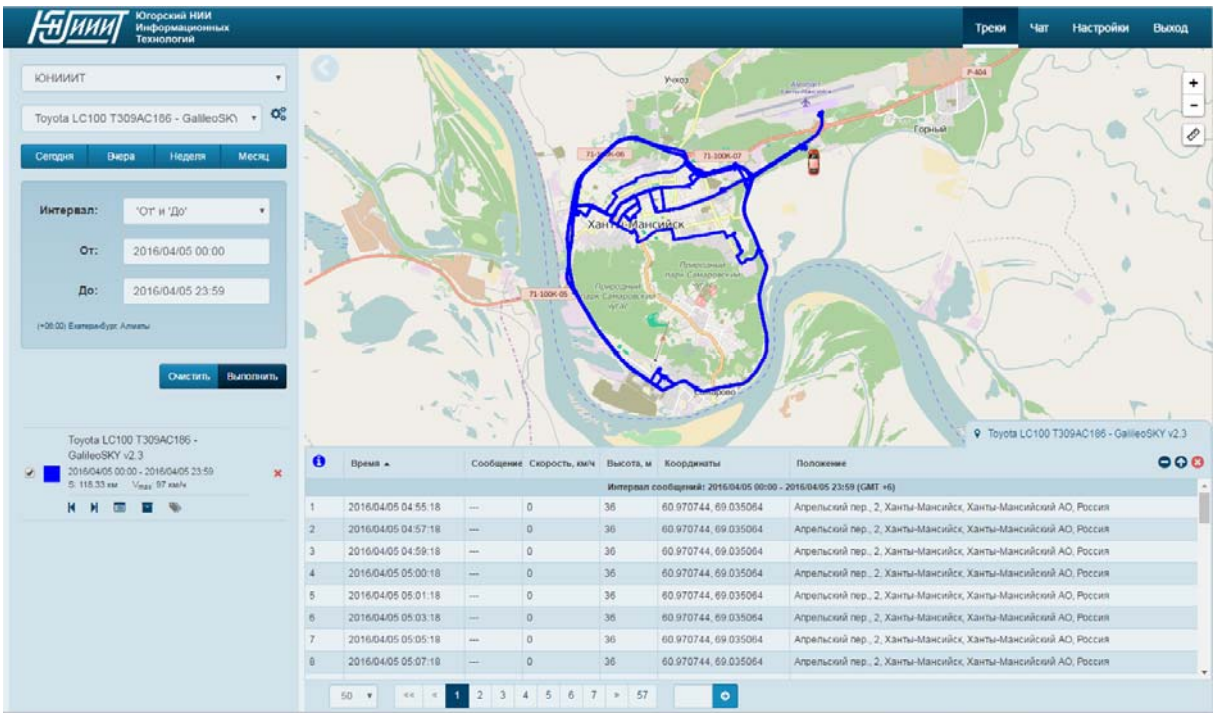


Рис. 1. Веб-интерфейс системы персонального мониторинга

На рис. 2 представлена функциональная диаграмма взаимодействия Системы. Данная диаграмма отражает функции приема и передачи информации, объекты, оборудование, пользователей, участвующих в ее обработке, документы и правила, программное обеспечение и внешние ссылки, которые обеспечивают интерфейс взаимодействия с внешними объектами, находящимися за границами Системы.

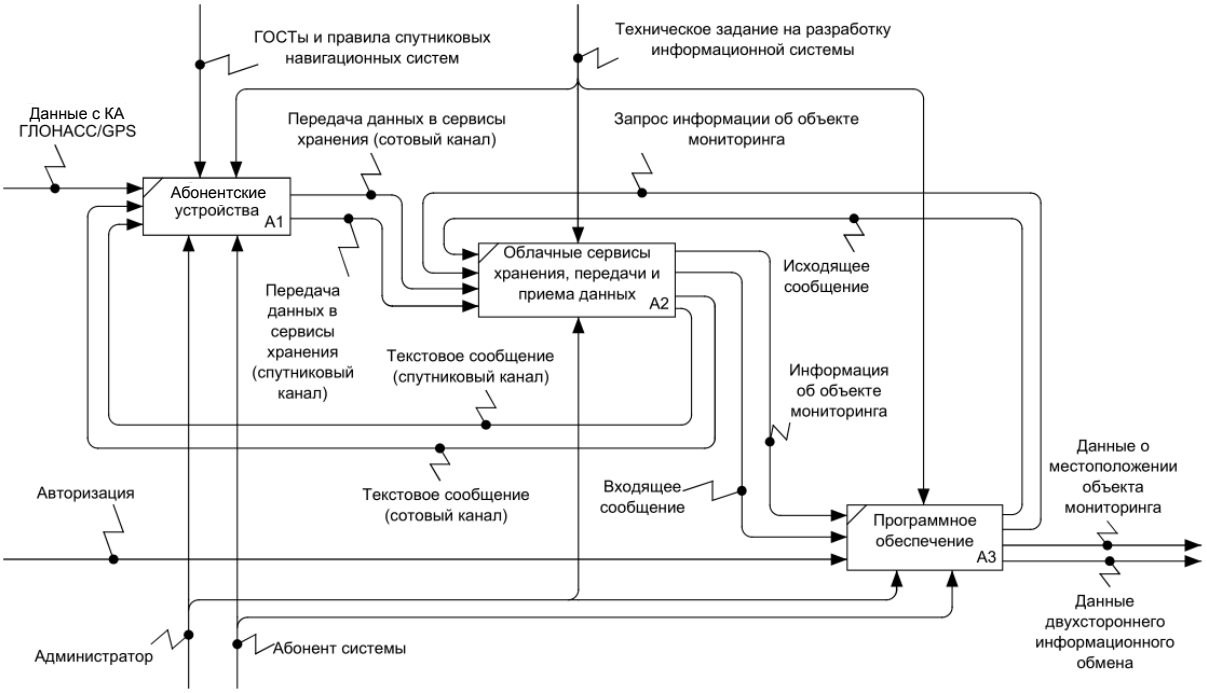


Рис. 2. Функциональная диаграмма взаимодействия Системы

В основе Системы использованы современные носимые (мобильные) абонентские устройства, позволяющие определять местонахождение абонента и вести двухсторонний информационный обмен. Использование облачных сервисов для хранения, передачи и приема данных обеспечивает универсальность решения и позволяет использовать абонентские устройства от разных производителей, осуществляющих передачу данных по спутниковым каналам связи, при этом не исключая возможность вести прием и передачу данных по сотовым каналам связи. Такое решение придаёт созданной системе достаточную гибкость, обеспечивает возможность использования серийно выпускаемых аппаратных средств и облегчает дальнейшее развития системы. Наращивание функциональных возможностей системы обеспечивается путём интеграции в нее новых абонентских устройств и разработке соответствующего программного обеспечения.

Эксплуатация Системы

Апробирование и эксплуатация системы персонального мониторинга проводилось зимой 2015 и 2016 годов. В феврале 2015 года, в ходе уникальной арктической автомобильной экспедиции «Притяжение Арктики – Таймырское кольцо» на один из экспедиционных автомобилей было установлено и подключено абонентское устройство спутниковой системы «Гонец» [2], а членам экспедиции были переданы два персональных устройства InReach SE [3]. В апреле 2015 года прошла другая экспедиция – «Загадки Таймыра». Участникам экспедиции так же были переданы абонентские устройства, подключенные к системе персонального мониторинга [4].

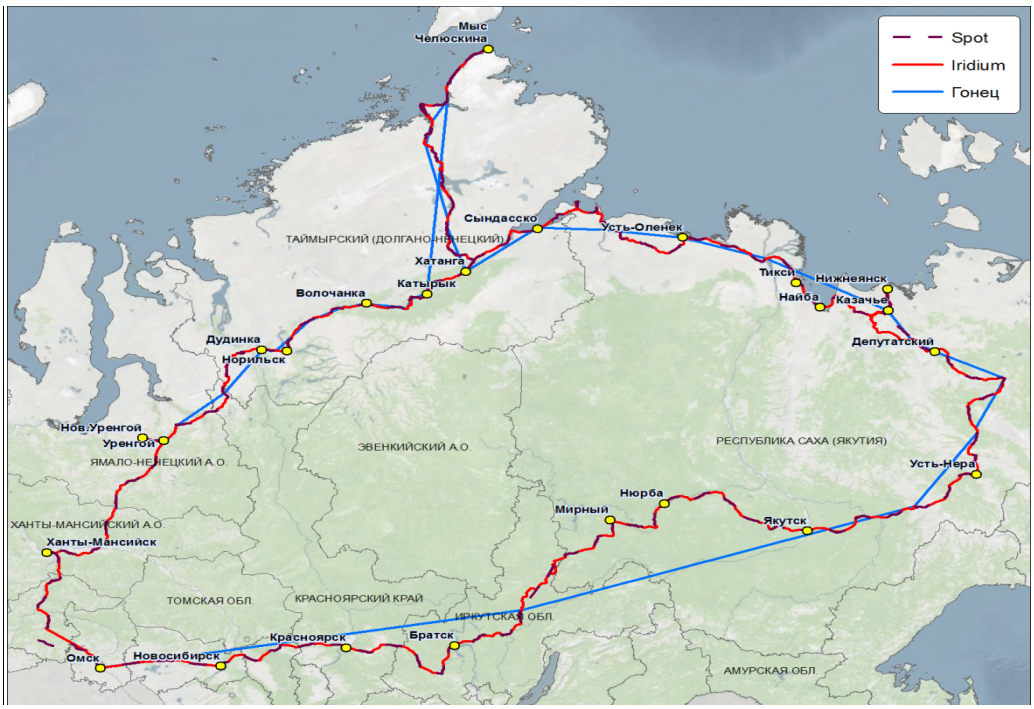


Рис. 3. Пройденный путь экспедиции «Великий Северный Путь-2016»

В 2016 году с февраля по апрель прошла новая арктическая автомобильная экспедиция – «Великий Северный Путь-2016» [5]. Это общероссийский историко-географический экспедиционный проект, который осуществлялся в рамках обширной научно-исследовательской программы «Загадки Российской Арктики». Частью этого проекта и стал автомобильный маршрут вдоль побережья моря Лаптевых и к самой северной материковой точке России – мысу Челюскин. Поскольку на легковом

автомобиле ещё никто не пытался проделать ничего подобного, участники и авторы маршрута подали заявку в Книгу рекордов Гиннесса. Для регистрации рекорда необходимо зафиксировать один и тот же путь как минимум двумя независимыми приборами. На автомобиле был установлен один прибор российского производства – «Гонец» и два зарубежных мобильных устройства Spot gen 3 [6] и Iridium Shout TS [7], находящихся у участников экспедиции.

На основе данных, полученных с устройств персонального мониторинга, находившихся у членов экспедиции, был зафиксирован новый рекорд Гиннесса. На рис. 3 изображен пройденный автомобильной экспедицией маршрут, протяженность которого составляет около 15 000 км.

Заключение

По результатам тестирования разработанной нами системы персонального мониторинга можно сделать вывод о пригодности ее применения для отслеживания местоположения и осуществления двухстороннего информационного обмена в суровых арктических условиях и полном отсутствии сотовой связи. Главным преимуществом Системы является ее универсальность и возможность использования различных абонентских устройств.

Список литературы

1. Тогачев А.А. Информационная система персонального мониторинга подвижных объектов // Материалы II Всерос. науч.-практ. конф. «Геоинформационные технологии в решении задач рационального природопользования». Ханты-Мансийск: Югорский формат, 2015. С. 30–32.

2. Спутниковая система «Гонец» [Электронный ресурс]: сайт ОАО Спутниковая система «Гонец». Режим доступа: http://www.gonets.ru/

3. DELORME InReach [Электронный ресурс] / USA. Режим доступа: http://www.inreachdelorme.com/

4. Уникальная арктическая автомобильная экспедиция «Притяжение Арктики – Таймырское Кольцо» [Электронный ресурс] : сайт ЮНИИ ИТ. Режим доступа: https://www.uriit.ru/taimyr/

5. «Великий Северный Путь-2016» [Электронный ресурс] : сайт «Русское географическое общество» в ЯНАО. Режим доступа: http://yanaorgo.ru/s/02_16/index.html

6. SPOT Gen3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.findmespot.com/en/index.php?cid=100

7. Iridium Shout TS [Электронный ресурс] : сайт ООО СТЭК.КОМ. Режим доступа: http://iridium.steccom.ru/?page_id=961

УДК 550.8.053, 681.3.068

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ГОРНЫХ ПОРОД ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА И ХАРАКТЕРОМ РЕЛЬЕФА

Ж. В. Фирчук, Д. А. Белоусова
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: tihaya187@mail.ru
e-mail: queen.rana@rambler.ru

DEVELOPING A MODULE FOR STUDYING THE CORRELATION BETWEEN ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF ROCK CROSS-SECTION AND THE RELIEF

Zhanna Firchuk, Daria Belousova
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: tihaya187@mail.ru
e-mail: queen.rana@rambler.ru

Данная статья рассматривает проблему определения взаимосвязи свойств рельефа и электромагнитных параметров горных пород в исследуемой местности. В статье выявлена и обоснована необходимость создания специального программного обеспечения для корреляционного анализа полевых данных геофизической разведки и представлено описание разработанного программного модуля, производящего расчет корреляции геофизических данных.

Ключевые слова: разведочная геофизика, электроразведка, дипольное электромагнитное профилирование, корреляционная зависимость.

Введение

Геофизика в наши дни занимает особое место в современной науке. Ее целью является разработка методов геофизической съемки и геофизической разведки для поиска месторождений полезных ископаемых. Одним из разделов геофизики является разведочная геофизика, изучающая строение Земли с целью поиска и выявления предпосылок образования залежей полезных ископаемых. Методы разведочной геофизики нацелены на то, чтобы исследовать недра Земли, не нарушая при этом структуры геологической среды, и чтобы уменьшить затраты времени и средств на их изучение [1].

Раздел разведочной геофизики состоит из нескольких подразделов: сейсморазведка, гравиразведка, магниторазведка и электроразведка. Далее речь будет идти об электроразведке и о ее методе дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). Для метода ДЭМП используется переменный ток, и вследствие использования данного метода в полевых работах исследователи получают набор измерений параметров электромагнитного поля. После этого производится анализ полученных данных, на основе которого производится заключение о том, целесообразно ли производить дальнейшую разработку недр данного участка. Результатами анализа является выявление аномальных зон на основе методов корреляции между рельефом и показателями приборов и определение причин появления этих зон [2].

Актуальность работы. Наличие автоматизированного программного обеспечения для произведения расчета и обработки геофизических данных,

уменьшающего временные и денежные затраты, является очень узкоспециализированной и актуальной проблемой современной разведочной геофизики.

Из вышеизложенного следует, что на сегодняшний день проблема определения корреляционной связи между данными о рельефе и электромагнитными параметрами горных пород геологического разреза действительно актуальна.

Научная новизна. В зависимости от рода деятельности и применяемых разведывательных методов (электроразведка, сейсморазведка, химическая разведка и другие) каждая организация определяет собственные узкоспециализированные цели и задачи. Поэтому для анализа полевых данных разведочной геофизики отсутствует единое и легкодоступное для рядовых организаций программное обеспечение. Существующие же на сегодняшний день программные комплексы в основном ориентированы на конкретные предприятия или организации, а также требуют больших финансовых затрат для их приобретения. Из этого очевидна необходимость программной реализации методов расчета и обработки полевых геофизических данных, позволяющей автоматизировать и оптимизировать этот процесс [2].

Объект исследования. Процесс определения корреляционной зависимости между электромагнитными параметрами горных пород геологического разреза исследуемой местности и характером рельефа.

Предмет исследования. Прикладные аспекты моделирования корреляции свойств рельефа и электромагнитного поля Земли.

Цель работы. Моделирование процесса корреляционного анализа между электромагнитными параметрами, полученными в процессе использования метода ДЭМП, и особенностями рельефа и разработка программного модуля, производящего автоматизированный расчет корреляции и генерации на ее основе карты, отображающей корреляционную зависимость данных.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ предметной области, в рамках которого изучаются закономерности соответствия:

а) электромагнитных параметров горных пород исследуемого геологического разреза в искусственном поле переменного тока;

б) характера рельефа исследуемой местности;

2. Построение математической модели корреляционного анализа данных.

3. Создание программного модуля на основе заранее разработанного архитектурного решения.

Алгоритм решения задачи

Модуль для расчета корреляции данных создан на основе уже разработанной ранее архитектуры. Данная архитектура была специально разработана для реализации программного комплекса, моделирующего процесс расчета и обработки полевых данных разведочной геофизики.

Разработанный модуль получает входные данные (см. рис. 1), которые представляют собой набор точек *X* и *Y* (с соответствующими значениями эффективного сопротивления слоев пород), которые впоследствии располагают на карте с помощью инструментов ГИС-пакета Surfer в виде участков повышенных и пониженных показателей эффективного сопротивления. Входные данные поступают в ModuleDataModel (объект архитектуры разрабатываемого программного комплекса, где перечислены используемые доменные объекты), где происходит преобразование входных данных в площадную матрицу. Полученная матрица потом используется для произведения анализа по формулам, которые прописаны в ModuleDataWorker (объект архитектуры, хранящий реализации геофизических функций).

	A	B	C	D	E	F
1	X	Y	FI	Fr		
2	16504646	6672170	-0,27469	-0,2209		
3	16504686	6672170	-0,27469	-0,2209		
4	16504726	6672170	-0,27469	-0,2209		
5	16504766	6672170	-0,27469	-0,2209		
6	16504806	6672170	-0,27469	-0,2209		
7	16504846	6672170	-0,27469	-0,2209		
8	16504886	6672170	-0,27469	-0,2209		
9	16504926	6672170	-0,27469	-0,2209		
10	16504966	6672170	-0,27469	-0,2209		
11	16505006	6672170	-0,27469	-0,2209		
12	16505046	6672170	-0,27469	-0,2209		
13	16505086	6672170	-0,27469	-0,2209		
14	16505126	6672170	-0,27469	-0,2209		
15	16505166	6672170	-0,27469	-0,2209		
16	16505206	6672170	-0,27469	-0,2209		
17	16505246	6672170	-0,27469	-0,2209		
18	16505286	6672170	-0,27469	-0,2209		
19	16505326	6672170	-0,27469	-0,2209		
20	16505366	6672170	-0,27469	-0,2209		

Рис. 1. Пример входных данных для программы

В данном модуле расчет коэффициента корреляции (1) и выборочного среднего (2) производится с помощью метода «скользящего окна» на всей площади карты.

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i. \quad (2)$$

После применения формул модуль получает таблицу корреляции (см. рис. 2), хранящую географические координаты и связанные с ними значения коэффициентов. Данная таблица впоследствии используется для генерации карты в программе Surfer, которая наглядно показывает связь между аномалиями, обнаруженными при полевых работах, с характером рельефа. Пример такой карты представлен на рис. 3. Данная карта предназначена для сравнения плотности полевых показателей с показателями зависимости и оценки ситуации в географических масштабах, что, несомненно, облегчает задачу исследователя и вместе с тем повышает точность анализа. Достижение высокой точности анализа позволит делать более достоверные заключения о наличии залежей полезных руд и их месторасположении [1].

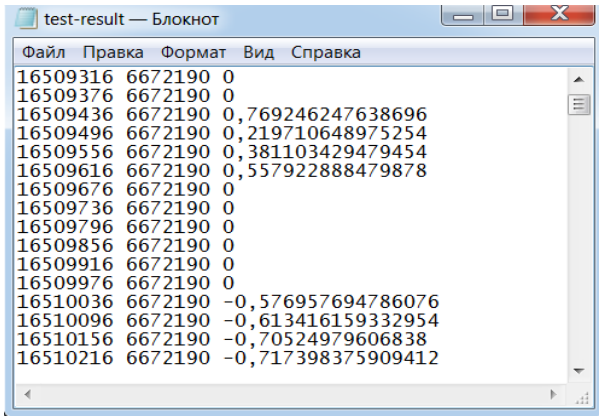


Рис. 2. Выходные данные программного модуля

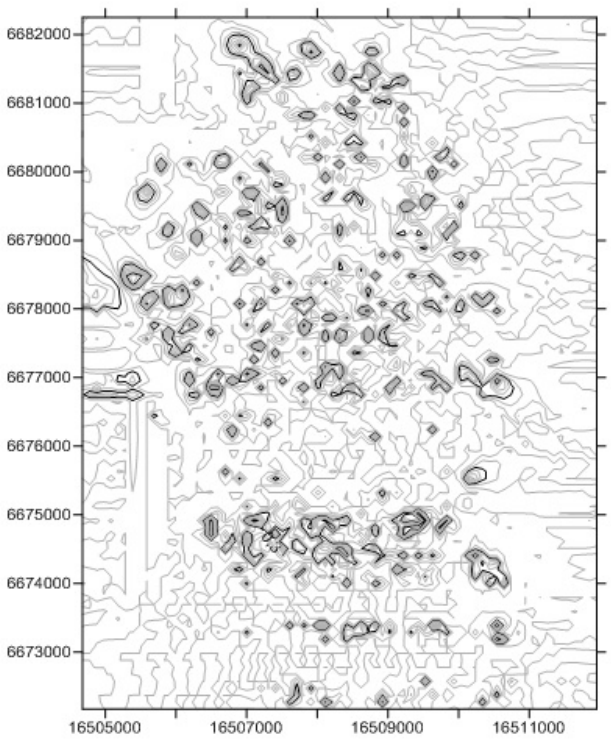


Рис. 3. Пример карты, построенной в результате работы модуля

Также использование ModuleViewModel (объект архитектуры, реализующий функции взаимодействия пользовательского интерфейса и модели данных) предусматривает в разработанном программном модуле защиту от некорректного ввода данных пользователем: например, запрещен некорректный ввод размера «окон», в том числе больший размера матрицы.

Заключение

Исследование электромагнитного поля геологической среды проводится с помощью аппаратуры ЭММ, выпуском которой занимается ООО «Ар ДиСайнс Россия» совместно с СФУ. Программное обеспечение разрабатывается впервые. Это позволит ускорить расчет и обработку данных, а также повысить точность вычислений. На конференции «Молодежь и наука: проспект Свободный – 2016» данная работа была удостоена диплома I степени и рекомендована к участию в конкурсе У.М.Н.И.К. 2016 г.

Список литературы

1. Белоусова Д.А., Молокова Н.В. Разработка программного обеспечения для определения взаимозависимости свойств рельефа с геофизическими характеристиками залегающих руд // Молодежь в науке: Новые аргументы: сб. науч. работ III Междунар. молодежного конкурса (Россия, г. Липецк, 29 февраля 2016 г.). Ч. I / отв. ред. А.В. Горбенко. Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2016. С. 22–25.

2. Каратаев Г.Д., Панфилов А.Е. Разработка программного обеспечения для интерпретации результатов электромагнитных методов геологической среды [Электронный ресурс] // Сб. материалов Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект Свободный-2015», посвященной 70-летию Великой Победы. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15–25 апреля 2015 г. URL: http://nocmu.sfu-kras.ru/direction/src/техническое/Геология%20и%20разведка%20месторождений.pdf

УДК 528.8.04

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ SMOS LEVEL 1C

А. С. Ященко
ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»
e-mail: x_rays1@mail.ru

Приведено описание особенностей работы 2-D-интерферометрического радиометра MIRAS спутника SMOS. Описаны особенности формата хранения данных Earth Explorer Format, используемого ESA. Приведён пример одного из важных преобразований данных SMOS, являющегося основой для их дальнейшей обработки.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, программа SMOS ESA.

Введение

В данный момент изменения, обусловленные антропогенным воздействием, для некоторых регионов планеты могут превалировать над естественными климатическими и геологическими процессами. В связи с этим возрастает важность оперативного мониторинга того или иного параметра, например влажности почв, как в глобальном, так и региональном масштабах. По ряду причин радиометрические данные L-диапазона являются наиболее подходящими для дистанционного определения влажности поверхностного слоя почв в глобальном масштабе. С 2009 г. на орбите функционирует спутник SMOS с установленным на борту 2-D-радиометрическим интерферометром MIRAS. Данные, предоставляемые им, обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать в процессе их обработки

1. Особенности приема излучения радиометром MIRAS и радиометрических данных SMOS Level 1C

Антенна радиометра MIRAS представляет собой три вытянутых прямоугольных лепестка, расположенных в одной плоскости под углом 120° относительно друг друга. Такая конструкция позволяет реализовать 2-D-съёмку радиояркостной температуры на *p*-поляризации (T_{Bp}) [1]. Приём излучения MIRAS осуществляется в плоскости, образованной векторами OY и вектором направления приёма излучения (*Y*-поляризация), а также в плоскости, ортогональной ей (*X*-поляризация) (см. рис. 1). Эти плоскости образуют некоторый угол ψ (geometric rotation angles) с плоскостями *V*- и *H*-поляризаций у поверхности Земли. Также в MIRAS реализован приём в режиме кросс-поляризации (*XY*): два лепестка антенны ведут приём на одной поляризации (*X* или *Y*), третий лепесток – на ортогональной ей. Этот режим необходим для пересчёта данных SMOS из *X*- и *Y*-поляризаций в значения, соответствующие *H*- и *V*-поляризациям вблизи поверхности Земли. Выражение, с помощью которого ведётся пересчёт, имеет вид [2]

$$\begin{bmatrix} T_{BH} \\ T_{BV} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \end{bmatrix}_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & \sin^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & 0 \\ \sin^2(\alpha) & \cos^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & -\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_\theta^{-1} \begin{bmatrix} T_{BX} \\ T_{BY} \\ 2\,\mathrm{Re}(T_B) \\ 2\,\mathrm{Im}(T_B) \end{bmatrix}_\theta, \qquad (1)$$

где T_{BH}, T_{BV} – радиояркостная температура на *H*- и *V*-поляризациях соответственно; T_{B3}, T_{B4} – третий и четвёртый параметр Стокса соответственно; T_{BX}, T_{BY} – радиояркостная температура на *X*- и *Y*-поляризациях соответственно; $\mathrm{Re}(T_B)$, $\mathrm{Im}(T_B)$ – действительная и мнимая часть T_B, измеренная в режиме кросс-поляризации; $\alpha = \varphi + \psi$, где φ – угол поворота плоскости поляризации, обусловленный эффектом Фарадея.

Поле зрения 2-D-интерферометрического радиометра MIRAS велико. В отдельных случаях радиометр может принимать излучение космического пространства

(direct sky). Радиометр MIRAS также получает шесть копий основного снимка (alias или replicas). После удаления данных direct sky и alias выделяется область AF-FOV (Alias Free Field of View) [3]. Данные о T_{Bp}, относящиеся к области AF-FOV, отличаются наименьшей погрешностью. Кураторы программы SMOS также генерируют кадр EAF-FOV (Extended Alias Free Field of View), который имеет большее поле зрения, но отличается большой погрешностью измерений T_{Bp} вблизи края кадра. Однако именно кадр EAF-FOV используется при создании продуктов более высокого уровня. Разрешение MIRAS в пределах EAF-FOV не является постоянной величиной, убывая от центра к периферии; наилучшее разрешение при зондировании в надир – 32 км, наихудшее для угла зондирования (θ) в 60° – 110 км (рис. 2).

Снимок Level 1C представляет собой продукт, созданный путём объединения отдельных кадров EAF-FOV, полученных за время пролёта спутника от одного географического полюса к другому. Пиксели Level 1C привязаны к координатной проекции ISEA 4H9 Grid [4]. Каждый узел этой проекции, называемый DGG (Discrete Global Grid), имеет уникальный номер (ID) и координаты, т. е. относится к строго определённому участку поверхности. Диапазон значений θ, под которыми была измерена T_B, определяется тем, в какие части кадров EAF-FOV попадает участок поверхности в процессе пролёта SMOS

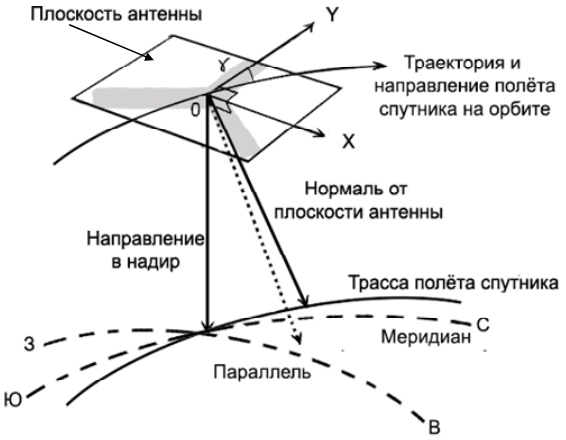


Рис. 1. Схематическое изображение полёта спутника SMOS на орбите. Серым цветом показаны лепестки антенны. XOY – система координат относительно плоскости антенны. Точечная линия – направление приёма излучения в данный момент времени. γ = 32,5°

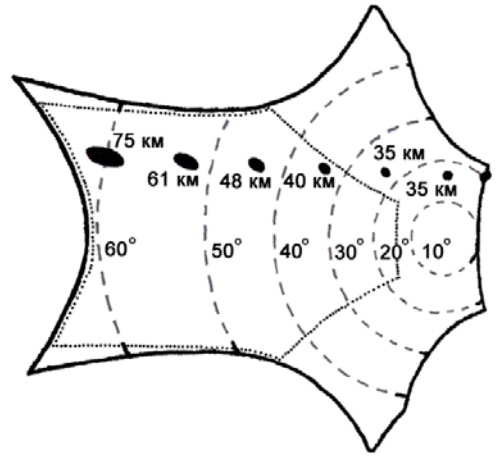


Рис. 2. Контур радиометрического снимка SMOS Level 1C. Чёрный непрерывный контур – кадр EAF-FOV, точечный непрерывный – контур-область AF-FOV. Пунктирные линии – изолинии для соответствующих углов зондирования. Черные эллипсы – характерный размер пикселя радиометрического снимка в данном месте кадра

2. Структура данных SMOS Level 1C

Снимок SMOS Level 1C хранится в формате Earth Explorer Format [5] и состоит из двух файлов: HDR и DBL. Данные, содержащиеся в HDR, являются служебными. Файл DBL можно разбить на два логических блока:

- перечень кадров EAF-FOV, использовавшихся при создании файла Level 1C;
- данные о ID DGG, находящихся в пределах полосы съёмки спутника.

Чтение данных из файла DBL можно осуществлять с помощью любого компилятора, рассматривая этот файл как простой бинарный. Файл DBL начинается с записи длиной 4 байта о числе N кадров EAF-FOV, использовавшихся при создании файла Level 1C. Далее следует N блоков по 166 байт с данными о кадрах. Из каждого блока для дальнейшей обработки необходимы данные о номере кадра (Snapshot ID) и соответствующее ему время съёмки общим объёмом 16 байт. Данные о T_B поверхности начинаются после (N × 166 + 4) байта с записи длиной 4 байта об общем числе участков поверхности с ID DGG им соответствующим в снимке Level 1C. Каждый ID DGG

описывается двумя блоками данных. Первый блок данных (табл. 1) несёт общую информацию об участке поверхности, для которого приведены радиометрические данные.

Таблица 1

Блок данных, описывающий положение участка поверхности

Наименование поля	Обозначение	Объём в байт
Номер в сетке DGG	ID DGG	4
Широта	Grid Point Latitude	4
Долгота	Grid Point Longitude	4
Высота	Grid Point Altitude	4
Тип поверхности (суша, смешанный тип)	Grid Point Mask	1
Число блоков данных о T_B для ID DGG	BT_Data_Counter	2
Общее количество байт		19

Общее количество измерений T_{Bp} для участка поверхности с определённым ID DGG на всех поляризациях и углах зондирования равно значению BT_Data_Counter. Блок данных о T_{Bp} содержит следующую информацию (см. табл. 2). Общий объём всех блоков данных о T_{Bp} для участка с определённым ID DGG составляет (BT_Data_Counter*28) байт.

Таблица 2

Блок данных о T_B и сопутствующая ей информация для определённого ID DGG

Наименование поля	Обозначение	Байт
Метка, описывающая тип данных	Flags	2
Действительная часть T_B	BT Value _Real	4
Мнимая часть T_B	BT Value _Imag	4
Точность определения T_B	Pixel Accuracy	2
Угол зондирования	Incidence Angle	2
Азимутальный угол зондирования	Azimuth Angle	2
Вращение плоскости поляризации	Faraday rotation	2
	Geometric rotation	2
Номер снимка	Snapshot ID	4
Большая полуось пикселя	Footprint Axis 1	2
Малая полуось пикселя	Footprint Axis 2	2
Общее количество байт		28

В процессе анализа данных о T_{Bp} большую важность имеет значение Flags. Каждый бит этого двухбайтного числа несёт информацию о 15 параметрах, описывающих данный пиксель кадра. Наиболее важными для анализа являются биты числа Flags, находящиеся в разрядах, приведённых в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики пикселя, описываемые значениями бит в соответствующих разрядах двухбайтного числа Flags

Разряд числа Flag	Значение бит	Смысл
1,2	00	«Горизонтальная» поляризация (X)
	01	«Вертикальная» поляризация (Y)
	01 или 11	Кросс-поляризация (XY)
11	1	Пиксель находится в области AF-FOV
	0	Пиксель находится вне области AF-FOV
16	1	Помехи на всех поляризациях
	0	Отсутствие помех на всех поляризациях

3. Пример реализации процедуры пересчёта данных из *X*- и *Y*-поляризаций в *H* и *V* соответственно

Формула (1) для пересчёта данных из *X*- и *Y*-поляризаций в *H* и *V* соответственно предполагает использование данных, полученных под одинаковыми углами зондирования. Однако данные на разных поляризациях измеряются в разные моменты времени и соответствуют разным углам зондирования. Использовать выражение (1) можно только после процедуры интерполяции данных на соответствующие углы зондирования.

На рис. 3 приведён результат пересчёта данных по формуле (1). Как можно видеть из приведённых данных, наибольшие отличия между значениями T_{BX}, T_{BY} и T_{BH}, T_{BV} наблюдаются приёме излучения в направлении, перпендикулярном направлению полёта.

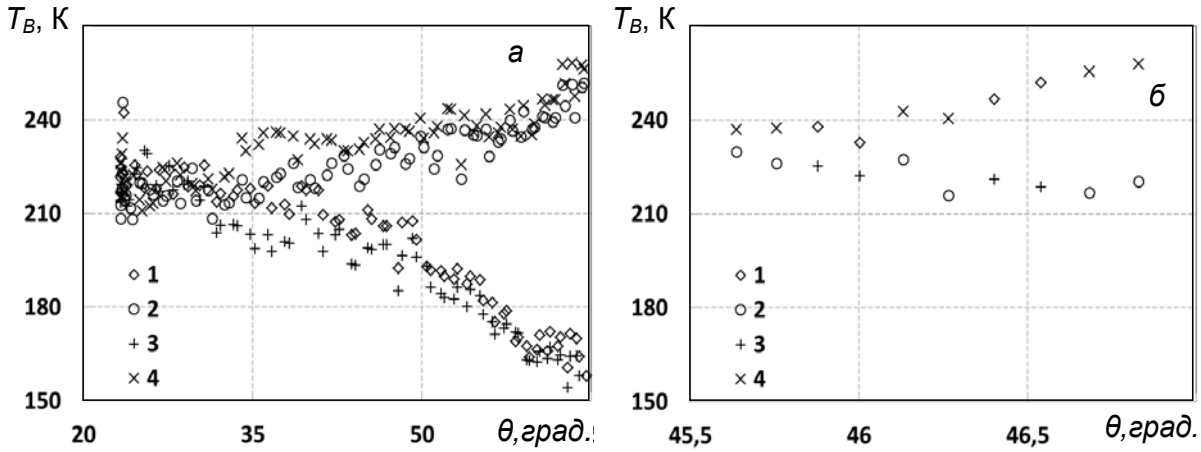


Рис. 3. Угловые зависимости для одного из пикселей радиометрического снимка расположении вблизи трассы пролёта спутника (а) и вблизи края радиометрического снимка (б). 1, 2 – исходные данные на *X*- и *Y*-поляризациях соответственно; 3, 4 – данные на *H*- и *V*-поляризациях, найденные с помощью выражения (1)

Вывод

Данные SMOS Level 1C имеют ряд отличительных особенностей, обусловленных конструктивными особенностями радиометра MIRAS, которые необходимо учитывать в процессе обработки. Одной из таких особенностей является несовпадение плоскостей поляризации относительно антенны MIRAS с плоскостями относительно поверхности Земли. Этот эффект в большей степени заметен для пикселей, находящихся в направлении, перпендикулярном направлению полёта спутника.

Список литературы

1. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle / Y. Kerr, P. Waldteufel, J. Wigneron [et al.] // Proc. IEEE. Vol. 98. № 5. P. 666–687. May 2010.

2. CESBIO. SMOS blog [Электронный ресурс]. URL: http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?page_id=749

3. ESA Earth online [Электронный ресурс]. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/950389/05_OCT2013+SMOS_NREUL_partI.pdf

4. CESBIO. SMOS blog [Электронный ресурс]. URL: http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?tag=isea-grid

5. ESA Earth online [Электронный ресурс]. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1514862/Earth_Explorer_Ground_Segment_File_Format_Standard

Секция
«МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

УДК 528.71

ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ СО СПУТНИКА TERRA ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ НЕФТЕПЕРСПЕКТИВНЫХ ГЕОСТРУКТУР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А. Ю. Белоносов, А. Е. Кудрявцев, Д. В. Борисов
ФГБУ «Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука» СО РАН
e-mail: belonosov74313@mail.ru
e-mail: kudryavtsevae85@mail.ru
e-mail: dimbo2007@yandex.ru

Использование материалов дистанционного зондирования Земли из космоса, основанное на специализированном алгоритме обработки тепловых изображений земной поверхности, совместно с геолого-геофизическими данными упрощает выделение нефтеперспективных геоструктур.

Ключевые слова: материалы дистанционного зондирования Земли из космоса, тепловая космическая съемка, температура земной поверхности, конвективный тепловой поток, скорость испарения влаги, тепловая инерция, цифровая модель рельефа, нефтеперспективные геоструктуры.

Введение

Многомерный регрессионный анализ размещения залежей углеводородов (УВ) и материалов дистанционного зондирования Земли (МДЗЗ) из космоса показал, что большинство месторождений нефти и газа расположены вблизи тепловых как линейных, так и кольцевых зон [1–6].

Ведущим методом в прогнозировании нефтеперспективных геоструктур по дистанционным данным является тепловая космическая съемка – ТКС [7–11].

Постановка задачи

Классический метод расчета теплового потока (ТП) из земных недр основан на теории кондуктивной теплопроводности. В то же время в земной коре существует другой физический процесс передачи тепла – конвективная составляющая тепломассопереноса [4].

Конвективный тепловой поток (КТП) зависит от скорости подъема глубинного флюида. Температура земной поверхности (ТЗП) будет выше в местах, где в земной коре наблюдается более высокая скорость подъема флюида. Области с кондуктивным характером теплопередачи могут быть приняты в качестве фоновых. Над местами с высоким конвективным тепломассопереносом на земной поверхности (ЗП) фиксируются положительные температурные контрасты.

Высокие значения КТП в земной коре явились физической основой для разработки алгоритма обработки изображений ТКС, включающего математическую модель годовых и суточных вариаций ТЗП.

Исходные материалы

Для решения задачи были использованы материалы спутника Terra (MODIS) на территории самого юга Западной Сибири, где месторождения нефти и газа пока не открыты (Курганская область).

Цифровые изображения в ближнем и дальнем ИК-диапазоне, полученные спектрорадиометром MODIS, были отобраны на московской станции приема спутниковой информации. Проанализировано 400 сцен, из которых 15 взяты для обработки.

В территориальных фондах геологической информации были собраны и систематизированы материалы геолого-геофизического содержания.

Обработка материалов

Термодинамическая ТЗП определялась исходя из радиационной температуры и коэффициентов излучения.

На первом этапе была проведена *калибровка* интенсивности излучения по различным яркостям изображения с использованием калибровочных функций.

На втором этапе была проведена *радиометрическая коррекция.* Значения интенсивности излучения L были пересчитаны в яркостную температуру T_R согласно обратной функции Планка.

На третьем этапе была проведена *атмосферная коррекция,* которая основана на предположении о линейной связи термодинамической температуры T_{td} и яркостных температур в 4-м T_{R4}- и 5-м T_{R5}-каналах.

Важным элементом расчетов являлось априорное знание значений излучательных способностей земной поверхности ε_4 и ε_5.

Для обработки тепловых изображений были использованы программные продукты с сайта MODIS.

После проведения вышеперечисленных этапов важными операциями для получения тепловых изображений являлись привязка к картографической проекции и учет геометрических искажений МДЗЗ из космоса.

После получения обработанного теплового изображения следующим этапом специализированной обработки явилось определение физических характеристик ЗП, от которых зависит ТЗП.

Для дистанционного определения ТП, поступающего из недр, необходимо из исходных результатов ТКС элиминировать воздействия других факторов: влияния коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации, затрат тепла ЗП на турбулентный теплообмен с атмосферой, затрат тепла на испарение и затрат тепла вследствие суточных и годовых тепловых ритмов.

Основной целью специализированной обработки тепловых космических данных является расчет физических характеристик ЗП: плотности потока суммарной солнечной радиации, альбедо, коэффициента излучения, тепловой инерции (ТИ), КТП из недр, влажности почвы, геометрии дневной поверхности, структуры грунта, метеорологических условий, концентрации в атмосфере оптически активных газов (CO_2, SO_2) и времени. Они использовались для районирования территории, определения параметров залегания геологических тел и параметров процессов, протекающих в земной коре.

Для построения карт КТП, ТИ и скорости испарения влаги (СИ) использовался стандартный набор метеоданных (температура, влажность и давление воздуха на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, облачность), полученных на метеостанциях юга Тюменской области. Суммарная солнечная радиация рассчитывалась по значениям облачности по формуле Берлянд.

Алгоритм определения КТП, ТИ и СИ базировался на математической модели суточного хода ТЗП.

Для решения обратной задачи, то есть для определения по данным ТКС трех основных параметров – КТП, ТИ и СИ, была выполнена трехразовая съемка в различное время суток.

Для учета влияния рельефа земной поверхности, поглощающего солнечную радиацию, в алгоритме предусмотрено использование цифровой модели рельефа (ЦМР).

Обратная задача решалась через задаваемый критерий соответствия измеренных и идеальных (находящихся в «библиотеке») ТЗП. С помощью метода наименьших квадратов находились искомые значения КТП, ТИ и СИ.

Исходя из среднеквадратической погрешности измерения КТП, значения, превышающие 10 Вт/м^2, считались достоверными. Отклонения, превышающие 30 Вт/м^2 для единичного пикселя, принимались за аномалию.

После проведения регулярных наблюдений ТЗП в Курганской области и восстановления по МДЗЗ из космоса количественных характеристик ЗП были получены *временные ряды*. Далее осуществлялся математический анализ временных вариаций количественных характеристик.

Было реализовано два подхода к анализу временных рядов: *дифференциальный* – сводится к вычитанию двух карт восстановленных характеристик поверхности, полученных в различное время; *статистический* – основанный на расчётах статистических параметров исследуемых количественных характеристик, восстановленных по МДЗЗ.

Далее применялись следующие процедуры математического анализа изображений, осуществленные через программный комплекс ERDAS IMAGINE: *цветовое кодирование, факторный анализ, безэталонная классификация,* э*талонная классификация, многомерный регрессионный анализ*.

Обработка подготовленного комплекта изображений проводилась для дешифрирования термически активных линейных и кольцевых зон.

Для районирования территории были созданы *цифровые мозаики*, состоящие из разных характеристик.

На полученных тепловых изображениях ТЗП, СИ, ТИ, КТП, а также изображениях линеаментов, кольцевых структур, ЦМР и других признаков были выделены похожие зоны, глубинные структуры, тела для геологического распознавания.

Для дешифрирования нефтеперспективных геоструктур была применена процедура *классификации данных*. Использованы три способа классификации цифровых данных: построение цветовых композиционных изображений, безэталонная классификация методом К-средних и эталонная классификация методом максимального правдоподобия.

В эталонной классификации признаковое пространство включало около 20 признаков. В качестве обучающей выборки использованы нефтяные, нефтеконденсатные и газоконденсатные месторождения, указанные в ГИС «Природные ресурсы России». Для анализа были выбраны 37 эталонов.

Обсуждение результатов

Анализ тепловых изображений осуществлялся для выявления возможной связи термических кольцевых и линейных зон различных порядков с нефтегазоносностью отложений юга Западной Сибири.

Результаты анализа тепловых изображений и размещения месторождений углеводородов на юге Западной Сибири позволил сформулировать *дешифровочные критерии*: наличие термически активных линейных зон; наличие термических кольцевых зон первого и второго порядков, осложненных кольцевыми зонами третьего порядка; наличие областей пониженных значений КТП, примыкающих к термически активным зонам различного типа и порядка.

На самом юге Западной Сибири (Курганская область) зафиксирована лишь единственная, наиболее перспективная на поиски углеводородов площадь, которая расположена в центральной части Звериноголовско-Варгашинской палеодолины доюрского фундамента, где развиты морские карбонатные отложения верхнего палеозоя.

Выводы

1. Для выделения нефтеперспективных геоструктур на самом юге Западной Сибири по тепловым космическим изображениям были использованы количественные характеристики: коэффициент излучения ЗП, альбедо ЗП, ТИ, СИ, КТП, ЦМР и различные их композиты.

2. Для прогнозирования нефтеперспективных площадей применена методика ТКС. Проведено тепловое районирование ЗП юга Западной Сибири.

3. Для обнаружения залежей УВ по тепловым космическим изображениям установлены дешифровочные критерии.

4. Наиболее перспективной на поиски залежей УВ является центральная часть Звериноголовско-Варгашинской палеодолины доюрского фундамента (восточная часть Курганской области).

5. Методика ТКС для прогнозирования скоплений УВ на обширных, малоизученных и труднодоступных территориях является перспективной, малозатратной и экспрессной.

Список литературы

1. Белоносов А.Ю. Комплексирование результатов тепловизорной аэросъемки и приповерхностной геотермической съемки на нефтяных месторождениях Западной Сибири // Материалы IV Республиканской конф. «Прямые методы поисков залежей нефти и газа». ИГГГИ. Львов, 1990. С. 41–44.

2. Горный В.И., Степанов И.В. Комплексирование тепловой многоспектральной и аэромагнитной съемок при решении прогнозно-поисковых задач // Разведка и охрана недр. Вып. 9. 2001. С. 39–43.

3. Запивалов Н.П., Белоносов А.Ю. Локальный прогноз нефтегазоносности с помощью тепловых методов // Геолого-геохимические условия формирования нефтегазоносных отложений Западной Сибири. Труды ЗапСиБНИГНИ, Тюмень, 1991. С. 123–126.

4. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.

5. Горный В.И., Крицук С.Г. Прогноз нефтеперспективных площадей в Республике Чувашия на основе визуального и инструментального анализа цифровых космических материалов // Вторая Междунар. конф. «Перспективы развития и освоения топливно-энергетической базы Северо-Западного экономического района Российской Федерации». Тезисы докладов. 2000. С. 41–42.

6. Белоносов А.Ю., Туренко С.К. Интерпретация спутниковых данных конвективного теплового потока при прогнозировании залежей углеводородов в Курганской области // Известия вузов. Нефть и газ. 2009. № 6. С. 4–9.

7. Белоносов А.Ю. Поиск неантиклинальных залежей нефти и газа в Западной Сибири методом дистанционной и наземной геотерморазведки // Материалы II Междунар. геофизического конгресса Казахстана. Алма-Ата, 1998. С. 153–158.

8. Belonosov A.Yu. The distant heat investigations within the oil and gas areas of the Western Siberia // International conference «The earth’s thermal field and related research methods». Proceedings, Moscow, 1998. C. 33–39.

9. Belonosov A.Yu. Application of remote thermal surver for detection of hydrocarbon pools in West Siberia // IV International conference “The earth’s thermal field and related research methods ". Proceedings. Moscow. Russia. 2002. C. 17–25.

10. Belonosov A.Yu. Ground Surface Verification of Satellite Prognosis of Promising Oil and Gas Fields // GORS XIV international Symposium on "Remote Sensing and Development", Damascus, Syria, 2004.

11. Белоносов А.Ю., Мартынов О.С., Шешуков С.А. Космические исследования конвективного теплового потока при прогнозировании залежей нефти и газа на юге Западной Сибири // Междунар. академическая конф. «Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири»: материалы конф. Тюмень, 2008.

УДК 528.8.04, 528.88

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО РЕГИОНУ ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА НА СПУТНИКОВЫХ КАРТАХ

Н. Н. Воронина, Н. В. Инюшина, Н. Л. Мамчур
ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»
e-mail: voronina.nataly@mail.ru
e-mail: inushina@yandex.ru
e-mail: natalymamchur@gmail.com

В работе изложен метод визуализации геофизических параметров региона Черного моря как «накладки» на спутниковую карту в качестве альтернативы существующим статическим изображениям. Использованы существующие современные графические средства в программных продуктах R, JS, PHP, HTML, а также инструменты картографического сервиса Google Maps API.

Ключевые слова: Черное море, визуализация, геофизические параметры, температура морской поверхности, соленость морской среды, средства программирования R, JS, PHP, HTML, картографический сервис Google Maps API.

Введение

На протяжении пяти с лишним столетий, с момента появления первого в мире географического атласа, визуализация геопривязанных данных практически не менялась – это было простое статическое изображение с разной степенью дизайна карт.

Однако во второй половине XX столетия, благодаря освоению космического пространства с помощью искусственных спутников Земли, а также появлению и стремительному развитию компьютерной техники, уровень достоверности результатов интерпретации данных геофизических, географических, геологических исследований приобрел совершенно иное, значительно более высокое качество. Наряду с этим появились и новые возможности для реализации целей совершенствования наглядного мониторинга Мирового океана.

На протяжении нескольких лет авторы данной статьи в составе коллектива Морского гидрофизического института (МГИ) РАН были участниками проекта Европейского союза MyOcean [1], посвященного сбору и отображению геофизических параметров состояния Морового океана (результаты спутниковых мониторингов, контактных измерений, прогнозов состояния морской среды и др.). Все данные проекта находятся в свободном доступе. Присутствуют в проекте и отображения геофизических параметров морей на спутниковых картах, однако такие изображения реализованы с помощью специализированных технических средств.

В рамках этого проекта в МГИ был создан и функционирует в настоящее время сайт МГИ Operational Oceanography Branch [2], предоставляющий широкий спектр геофизических данных по акватории Черного моря на оперативной основе. Эти данные представлены визуально современными программно-техническими средствами. Именно в ходе работ над проектом MyOcean появилась цель получения таких изображений геофизических полей, которые пользователь сможет мгновенно просмотреть с максимальным диапазоном возможностей без использования специализированных технических ресурсов.

Поставленную задачу авторы реализовали на примере локального района Черноморского бассейна. Были использованы данные оперативной работы Экспериментального центра морских прогнозов (ЭЦМП) [3] МГИ РАН. В ходе работы был сделан акцент на выбор свободно распространяемых программных средств

построения графики. Работа носит и научный, и практико-ориентированный характер, так как ее результаты в настоящее время используются в оперативном режиме при построении изображений ежедневных морских прогнозов.

Появление картографического сервиса Google Maps API [4] (а позже и других аналогичных картографических спутниковых сервисов) с мощным набором инструментов, позволяющих использовать этот сервис при разработке собственных программных продуктов, открыло совершенно иной, более высокий уровень визуализации с выкладкой спутниковых карт с собственными полученными результатами на страницы Web-сайтов. Это, в свою очередь, сделало возможным донести результирующие изображения в любую точку мира. Данный уровень визуализации включает уже и возможность снятия значений координат любой интересующей точки на изображении, чего нет при построении статических изображений без использования картографического спутникового сервиса. Вдобавок язык сценариев JavaScript (JS), с помощью которого функционирует инструментарий Google Maps API, позволяет динамически просматривать изображения на Web-страницах, что необходимо при наглядной оценке изменчивости геофизических параметров морской среды. Однако прежде чем придать изображению динамику, необходимо это изображение создать, что и было нами сделано средствами языков программирования R (собственно графическое отображение данных) и PHP (обработка построенных статических изображений геофизических данных на стороне сервера).

Статические изображения

Многочисленные примеры изображений в стиле географических атласов, получаемых ежедневно в результате автоматизированной оперативной работы, можно увидеть на Web-сайте ЭЦМП http://innovation.org.ru/instan_param.php. Данные статические изображения построены с помощью языка программирования R, выбранного авторами по многим причинам, среди которых важное место занимает наличие мощного набора средств работы с графикой, а также свободно распространяемой программной среды вычислений. В качестве входных были использованы данные результатов расчетов морских прогнозов в формате NC (международный стандарт для геофизических данных). Необходимо отметить, что входной формат может быть любым (DAT, NC, GRD, …), содержащим геофизические данные, так как программа построения графики предварительно использует функцию чтения геофизических данных, а такие функции могут быть написаны под любой формат. В нашем случае написана функция для чтения файлов именно формата NC (NetCdf), так как результатом оперативной работы модели расчета морских прогнозов являются именно файлы в формате NC, и именно эти файлы далее получают графическое представление с их последующей выкладкой на страницы сайта. Однако построенные таким образом статические изображения имеют серьезные недостатки:

– отсутствует возможность определения координат любой точки изображения;

– отсутствует возможность масштабирования изображения.

Использование спутниковых карт

Применение в работе картографического сервиса Google Maps API с мощным набором инструментов для использования в скриптах сценарного языка программирования JS позволило визуализировать геофизические данные в качестве «накладок» собственных результатов на спутниковые карты, размещенные на страницах Web-сайта ЭЦМП [4, 5]. Реальный пример использования спутниковых карт совместно с локальными изображениями приведен на рисунке. Отметим, что некоммерческое использование сервисов Google Maps, как и в случае использования программной среды R, предполагает свободное и бесплатное распространение как

самого инструментария, так и разработанного приложения. Данный уровень визуализации позволяет определять значения географических координат любой интересующей точки на изображении, наряду с удобным наглядным масштабированием, что отчетливо видно на рисунке.

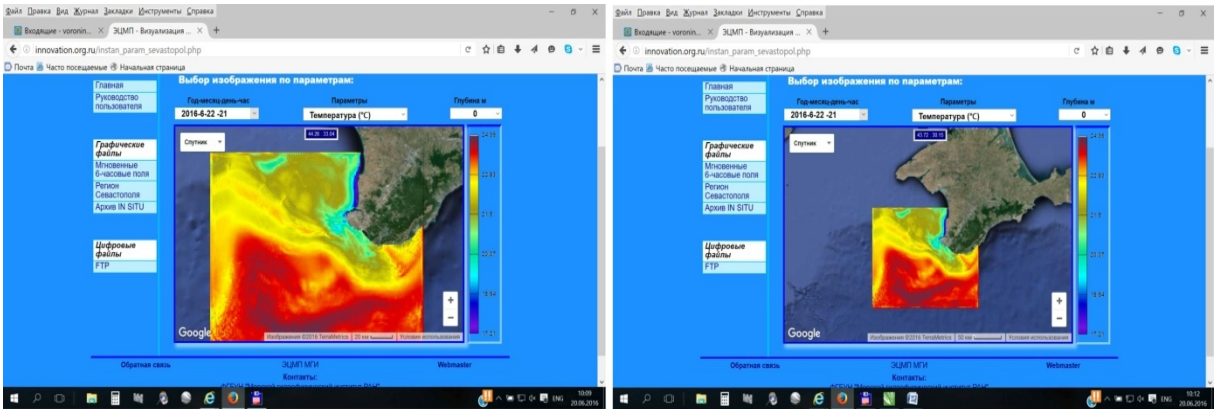


Рис. Изображение геофизического параметра температуры Севастопольского региона Черного моря в виде «накладки» на спутниковую карту Google Maps с использованием различных масштабов

Это кардинально отличает изображения на спутниковых картах от обычных графических изображений, на которых мы уже подробно останавливались выше, и позволяет полностью избавиться от присущих им недостатков. Разработанные скрипты JS обеспечивают просмотр изображений в режиме анимации (можно выбрать в секции «Год–месяц–день–час» на странице сайта для Севастопольского региона), что весьма полезно для наглядной оценки изменчивости геофизических параметров морской среды за весь расчетный период времени. В частности, на сайте ЭЦМП таким периодом времени является период рассчитанного прогноза.

Необходимо заметить, что появлению изображений на спутниковой карте соответствующей страницы сайта предшествует предварительная работа:

– вначале программа, разработанная в среде программирования R, извлекает цифровые значения геофизических параметров из файла типа NC, на их основе формирует графический файл в формате PNG с локальным изображением геофизических параметров и выкладывает полученный графический файл на сервер HTTP;

– затем происходит обработка данного файла средствами скриптового языка программирования PHP на стороне сервера с целью придания изображению вида, приемлемого для выкладки на спутниковую карту;

– непосредственно выкладка окончательного изображения на сервер HTTP для дальнейшего просмотра на соответствующих страницах сайта.

Таким образом, предлагаемый подход к решению задачи визуализации данных с помощью картографического сервиса Google Maps состоит в программной реализации наложения на спутниковую карту Google Maps статических изображений с геофизическими параметрами, что позволяет использовать собственные статические изображения со всем спектром инструментов Google Maps API и благодаря этому уйти от недостатков, присущих статическим изображениям. А добавление механизма встраивания данных разработок в оперативную работу позволяет регулярно просматривать текущие геофизические параметры Черного моря в виде изображений на спутниковой карте.

Заключение

Само по себе применение карт Google Maps не ново, и, например (как уже было упомянуто выше), в проекте Европейского союза MyOcean можно найти широкое применение карт Google Maps. Однако в сочетании со всеми нашими потребностями (районирование, снятие значений координат любой точки на карте, масштабирование) применение перечисленных выше программных инструментов придает нашей работе уникальность и своевременность.

Изложенная в статье методика визуализации геофизических данных на спутниковой карте может быть использована в любой сфере научной деятельности, так или иначе связанной с визуализацией геопривязанных данных.

В статье рассмотрена опробованная авторами на практике визуализация результатов расчетов оперативной океанографии и наглядно показано, что только комплексное применение современных программных графических продуктов в совокупности с картографическим сервисом Google Maps API дает оптимальный положительный эффект. Поэтому в ближайшем будущем, на наш взгляд, ориентир графических разработок в области океанографии (так же как и в других областях наук, связанных с геовизуализацией) в целом будет направлен на обязательное взаимное использование статической графики и картографических спутниковых сервисов, таких как Google Maps API, Yandex Maps API и т. п.

Работа, представленная в статье, проведена в рамках конкурсного проекта № 14-41-01635 при поддержке РФФИ, более подробное описание приведено в статье [6].

Список литературы

1. Marine environment monitoring service [Электронный ресурс]. URL: http://www.myocean.eu/
2. Black Sea Marine Forecasting Centre [Электронный ресурс]. URL: http://bsmfc.net
3. Экспериментальный центр морских прогнозов [Электронный ресурс]. URL: http://innovation.org.ru/instan_param.php
4. Alper Dincer, Balkan Uraz Google Maps JavaScript API Cookbook. BIRMINGHAM – MUMBAI: Packt Publishing. 2013. 316 p.
5. JavaScript API сервиса карт Google [Электронный ресурс]. URL: https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/
6. Анализ и сопоставление программных средств визуализации морских прогнозов на основе расчетных данных оперативной океанографии по черноморскому бассейну на примерах Севастопольского и Крымского регионов / Н.Н. Воронина, Н.В. Инюшина, Н.Л. Мамчур, М.В. Крыль // Научная визуализация. Электронный журнал. ISSN 2079-3537, № гос. рег. 0421100125/0013. № 1. Т. 8. 2016. С. 146–155. URL: http://sv-journal.org/2016-1/09.php?lang=ru.

УДК 004.932

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОГО КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. Г. Зотин, А. И. Пахирка, Е. И. Савчина
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М. Ф. Решетнёва»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: zotin@sibsau.ru pahirka@sibsau.ru oreshkinaei@gmail.com

THE USE OF INFRARED DATA TO ENHANCE VISUAL QUALITY OF IMAGES

A. G. Zotin, A. I. Pakhirka, E. I. Savchina
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

Рассматривается возможность повышения визуального качества изображений с использованием методов слияния инфракрасных (*IR*) и визуальных (*RGB*) изображений. Поскольку в системах видеонаблюдения важна скорость обработки данных, применяются алгоритмы на основе подхода попиксельного слияния с установкой весовых коэффициентов.

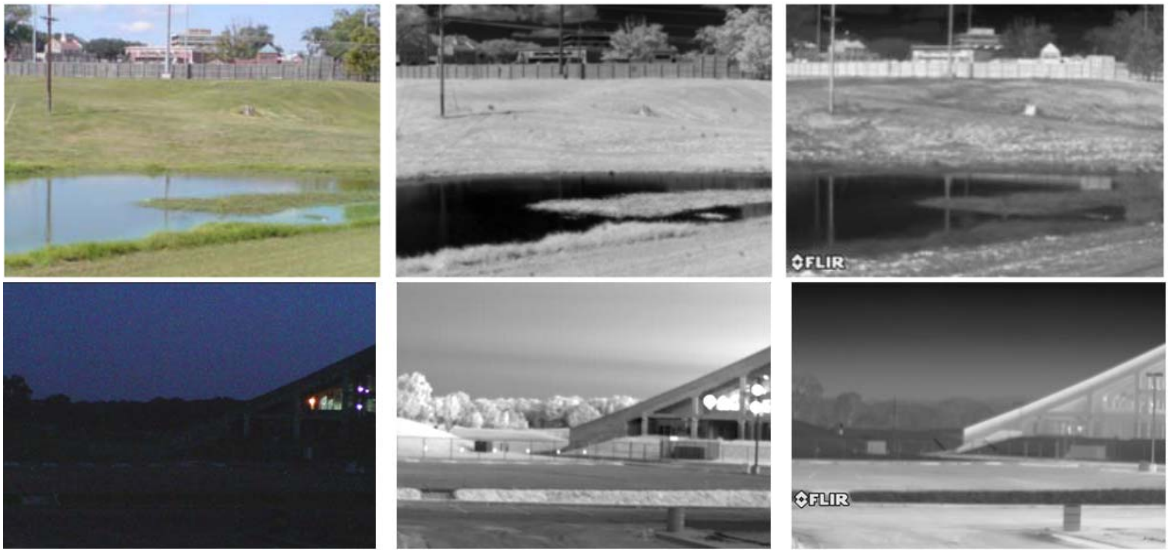
Ключевые слова: обработка изображений, анализ изображений, слияние изображений, инфракрасные изображения, Retinex, NIR, Image fusion.

Многие организации в последние годы используют системы охранного видеонаблюдения на основе цифровых камер, при этом в большинстве случаев такая система ограничивается простой установкой камер и работой операторов. Оператору довольно часто приходится сталкиваться с проблемой плохой видимости наблюдаемого объекта ввиду плохого освещения и погодных условий. Для решения такого рода проблем плохой видимости могут применяться различные методы цветовой коррекции и шумоподавления [1–3]. Однако эти методы могут не всегда давать приемлемые результаты. Так, в случае наличия засвеченного участка в видимом спектре не представляется возможным восстановить данные в этой области. Еще одним примером, когда может быть нецелесообразным использование алгоритмов на основе технологии *Retinex*, является недостаток освещения. В таком случае происходит усиление шумов, проявляющихся ввиду особенности работы матриц в цифровых камерах.

В последние годы становятся доступными цифровые устройства захвата изображений, работающие не только в видимом диапазоне. Так, распространение получают инфракрасные (*IR – infrared*) камеры, позволяющие частично решить проблему плохой видимости наблюдаемого объекта из-за погодных условий (туман, дымка, пыль и т. д.) или недостаточного освещения (ночь, отсутствие искусственного освещения). На рис. 1 представлены примеры инфракрасных изображений в ближнем инфракрасном (*NIR – Near Infrared Range*) и длинноволновом инфракрасном (*LWIR – Long Wavelength Infrared Range*) диапазонах.

В системах видеонаблюдения инфракрасные видеоданные обычно представляются как оттенки серого, что создает хороший контраст между объектами и их фоном. Однако это не всегда является удобным для оператора.

Объединение данных, полученных с помощью инфракрасной (*IR*) и традиционной (*RGB*) камер, позволит получить информацию, которую нельзя было бы получить путем просмотра данных по отдельности. Для этой цели могут применяться различные методы слияния инфракрасных и визуальных (*RGB*) изображений [4–7]. Методы можно разделить на три обширных класса в зависимости от уровня объекта, с которыми они работают: пиксели изображения, характерные особенности изображения, конкретные объекты изображения.



а) **б)** **в)**

Рис. 1. Примеры изображений в различных спектральных диапазонах: а) видимый спектр RGB-изображения; б) инфракрасное NIR-изображение; в) инфракрасное LWIR-изображение

Слияние изображений на основе пикселей является наиболее простым и представляет нижний уровень обработки. Наиболее известными подходами попиксельного слияния изображений являются алгоритмы простого усреднения, усреднение с весовыми коэффициентами (α-*blend*), метод переноса хроматических характеристик (*color transfer*), метод главных компонент (*PCA – principal component analysis*), слияние с использованием пирамиды изображений, вейвлет-преобразование.

Методы слияния изображений на основе сложения данных являются наиболее простыми и быстродействующими, поскольку яркость результирующего изображения может быть получена как среднеарифметическое значение инфракрасных (*IR*) и визуальных (*RGB*) данных. Однако помимо вычисления среднеарифметического значения при расчете результирующей яркости может быть использовано максимальное или минимальное значение. Развитием метода на основе сложения данных является использование весовых коэффициентов, позволяющих определять вклад исходных изображений при выполнении слияния. При этом весовые коэффициенты могут быть применены к изображению в целом или корректироваться для каждого пикселя на основе разумного правила. Иногда метод, при котором задается коэффициент для всего изображения, называют α-смешивание (α-*blend*).

При объединении визуальных (*RGB*) и инфракрасных изображений типа *Near Infrared* (*NIR*) или *Short Wavelength Infrared* (*SWIR*) часто используются алгоритмы, основанные на использовании цветовой модели *HSI*. Широко известны два вида реализации. В первом случае *RGB*-изображение переводится в модель *HSI*, после чего его яркостная составляющая заменяется яркостью из *NIR* изображения. Второй подход принимает во внимание особенность *NIR*-изображения, при которой некоторые темные пиксели *NIR*-изображения могут не являться таковыми у *RGB*-изображения. В таком случае при простой замене яркостей у результирующего изображения понижается интенсивность цветов пикселей или они просто становятся черными. Для частичного решения этой проблемы используются данные о насыщенности и яркости пикселей визуального (*RGB*) изображения. При этом расчет нового значения яркости пикселя осуществляется по формуле:

$$I_{NEW} = Sat_{RGB} \times I_{RGB} + (1 - Sat_{RGB}) \times I_{IR},$$

где I_{NEW} – новое значение яркости; I_{RGB}, I_{IR} – яркость пикселей входных *RGB*- и *IR*-изображений соответственно; Sat_{RGB} – значение насыщенности пикселя *RGB*-изображения.

Однако сформированные с использованием такого способа изображения будут отображать растительность (кустарники, деревья и т. п.) в неестественных цветах.

Поскольку в системах видеонаблюдения одним из значимых факторов является скорость обработки, то целесообразно использование попиксельных методов. Так, для улучшения визуального качества видеопоследовательности с использованием *IR*-данных целесообразно использовать алгоритм [7], в котором можно выделить два основных этапа – подготовительный этап и этап обработки. На подготовительном этапе формируются данные, необходимые для выполнения слияния, а на этапе обработки происходит формирование улучшенного визуального изображения.

В ходе подготовительного этапа, при получении изображений в инфракрасном (*IR*) и видимом (*RGB*) спектрах, формируются гистограммы яркости $Hist_{RGB}$ и $Hist_{IR}$ с одновременным вычислением значений средней яркости $AvgI_{RGB}$ и $AvgI_{IR}$. Параллельно с формированием гистограммы яркости визуального (*RGB*) ряда происходит генерация карт хроматических компонент (*UV*) и карты яркости (*Y*) с использованием цветовой модели *YUV*. Поскольку инфракрасные изображения в зависимости от типа обладают разными характеристическими особенностями, то выполняется расчет коэффициента коррекции яркости инфракрасного изображения, при котором отклонение средней яркости минимально бы отличалось от значения эталонной яркости. Эталонная яркость определяется на основе средней яркости *RGB*- и *IR*-изображений.

В ходе этапа обработки выполняются следующие действия. Сначала происходит формирование карты яркости улучшенного изображения путем слияния с адаптивной подстройкой коэффициента в каждом пикселе. Подстройка происходит с учетом особенности обрабатываемой области (темная, нормальная, светлая), значений яркостных характеристик инфракрасного (*IR*) и визуального (*RGB*) изображений, а также насыщенности цвета пикселя. После формирования карты яркости для улучшенного изображения оценивается диапазон яркости и при необходимости производится линейное контрастирование. Завершающим шагом осуществляется формирование итогового изображения путем совмещения с хроматической картой.

Для тестирования алгоритмов по работе с инфракрасными изображениями *NIR* была использована тестовая база *IVRL* (*RGB-NIR Scene Dataset*), в которой представлены 477 пар изображений, разделенных на 9 категорий. В качестве демонстрационного примера выбрано изображение № 25 из категории *Street* (рис. 2).

Оно представляет собой сцену, снятую в дневное время, на которой расположенная в левой части живая изгородь попадает в тень. Из-за этого она плохо различима на визуальном изображении, но хорошо видна на инфракрасном. Также на визуальном изображении есть засвеченная область, фрагменты объектов в которой хорошо различимы в инфракрасном диапазоне. Как можно заметить из примера, алгоритмы на основе технологии *Retinex* позволяют разглядеть детали объектов, находящихся в тени (с искажением цветов), но они не способны исправить засвеченную область изображения. Алгоритмы слияния с инфракрасными данными позволяют восстановить информацию в засвеченной области.

В ходе экспериментального исследования было выяснено, что при использовании инфракрасных данных типа *NIR* алгоритм хорошо справляется с задачами улучшения визуального качества при наличии контрастных областей, засветов и эффекта «тумана».



Рис. 2. Пример обработки набора *Street* 25: а) исходное *RGB*-изображение; б) исходное инфракрасное *NIR*-изображение; в) алгоритм *Retinex GIMP*; г) α-*blend*, α = 0,6; д) слияние с использованием модели *HSI*; е) предлагаемый алгоритм

Существенным недостатком методов слияния на основе сложения без адаптивной подстройки коэффициентов является занижение контраста в результате слияния. Использование метода α-*blend* позволяет снизить негативное воздействие. Слияние с использованием модели *HSI* делает различимыми детали, в том числе и в засвеченной области. Однако у него проявляется недостаток в виде снижения уровня яркости в области с низкой насыщенностью, и растительность приобретает неестественный оттенок. Алгоритм с адаптивной подстройкой коэффициента слияния инфракрасных и визуальных данных дает наилучшие результаты в большинстве случаев.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-07-00121 А.

Список литературы

1. Зотин А.Г., Пахирка А.И., Буряченко В.В. Система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 191–197.

2. Petro A., Sbert C., Morel J-M. Multiscale Retinex // Image Processing On Line. 2014. P. 71–88.

3. Зотин А.Г., Пахирка А.И. Адаптивный алгоритм шумоподавления в системах видеонаблюдения при низком уровне освещения сцены // Доклады 18-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2016». 2016. Т. 2. С. 838–843.

4. Zin T., Takahashi H., Hiromitsu T. Fusion of Infrared and Visible Images for Robust Person Detection. Image Fusion, Osamu Ukimura (Ed.). 2011. P. 239–264.

5. Malviya A., Bhirud S. G. Image Fusion of Digital Images // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. Vol. 2. № 3. P. 146–148.

6. Nikolakopoulos G. K. Comparison of Nine Fusion Techniques for Very High Resolution Data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2008. Vol. 74. № 5. P. 647–659.

7. Улучшение визуального качества изображений на основе инфракрасных данных в системах видеонаблюдения / А.Г. Зотин, А.И. Пахирка, М.В. Дамов, Е.И. Савчина // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2016. № 2. URL: http://swsys-web.ru/improved-visual-quality-of-images-in-video-surveillance-systems.html

УДК 004.932

АДАПТИВНЫЙ ФИЛЬТР ШУМОПОДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАТИЧНЫХ СЦЕН В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

А. Г. Зотин, А. И. Пахирка, А. И. Томилина
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: zotin@sibsau.ru pahirka@sibsau.ru, nastomila@gmail.com

THE ADAPTIVE NOISE REDUCTION FILTER FOR STATIC SCENES IN VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

A. G. Zotin, A. I. Pakhirka, A. I. Tomilina
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
Institute of Informatics and Telecommunications
e-mail: zotin@sibsau.ru pahirka@sibsau.ru, nastomila@gmail.com

Рассматривается вопрос повышения качества видеопотока в системах видеонаблюдения на основе IP-камер. Для этих целей предлагается использование пространственно-временного фильтра с адаптивной подстройкой коэффициентов. Адаптация обработки основана на использовании данных контурного представления, динамики изменения по временной оси и уровня яркости локальной окрестности.

Ключевые слова: видеонаблюдение, обработка изображений, анализ изображений, фильтры изображения.

Системы охранного видеонаблюдения на основе цифровых камер получили широкое распространение, однако в большинстве случаев построение систем такого рода ограничивается простой установкой камер и работой операторов. При такой организации оператору необходимо постоянно следить за происходящим на нескольких камерах, при этом данные могут отображаться на нескольких мониторах. В таком случае на оператора приходится очень большая нагрузка. Для облегчения работы операторов в последние годы совершенствуется программное обеспечение для систем видеонаблюдения. Так, в него добавляют различные модули, позволяющие выполнять оценку происходящего в поле зрения камеры и при необходимости привлекать внимание оператора [1].

В случаях организации видеонаблюдения на открытой местности часто возникают проблемы плохого качества съемки, в частности при неблагоприятных условиях, вызванных природными явлениями и характером освещения. Также недостаток освещения влияет на качество видеопотока, полученного и внутри помещения. Так, в случае низкого уровня освещенности проявляются шумы в виде разноцветных точек, хаотично распределенных по экрану (рис. 1). Это связано с принципами работы матриц захвата изображений в цифровых камерах.

Наличие шума в видеопоследовательности может приводить к ложным срабатываниям в интеллектуальных модулях системы видеонаблюдения. В связи с этим можно сказать, что шумоподавление имеет большое значение для общего функционирования системы, поскольку наличие шумов в видеосигнале не только ухудшает визуальное качество изображения, но и влияет на последующие процессы обработки данных.

На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов, реализующих разные способы подавления шума. Поскольку шум в видеопоследовательности можно условно разделить на пространственный и временной, то, соответственно, фильтры шумоподавления также делятся на пространственные и временные [1, 2]. Данные виды

фильтров обладают своими недостатками. Так, при использовании пространственного шумоподавления возможно размытие краев объектов, а также мелких деталей на изображении. В свою очередь, для временного шумоподавления негативным фактором является эффект размытия движения, возникающий при попытке усреднить пиксели по временной оси вдоль границ движущихся объектов. Для устранения подобных негативных влияний используются комбинация в виде пространственно-временной обработки, а также различные адаптивные алгоритмы, учитывающие локальные вектора движения [3–5].



а) **б)** **в)**

Рис 1. Пример кадра с камеры при недостаточном освещении:
а) оригинальное изображение; б) карта насыщенности (S-модели HSV);
в) карта хроматических компонентов модели YUV

С точки зрения последующего анализа кадра видеопоследовательности идеальным был бы такой фильтр, который мог бы полностью подавить шум, не искажая формы контуров объектов. Эффективным является использование алгоритмов с учетом векторов движения, однако в зависимости от реализации их скорость работы может быть не вполне приемлема.

Поскольку в большинстве случаев видеонаблюдение организовывается для статичной сцены, то возможно использование пространственно-временных фильтров, без учета локальных векторов движения. Так, в случае установки камер внутри помещения возможно не учитывать дрожание камеры (ввиду отсутствия внешнего воздействия), а для случая наружного наблюдения возможно применение дополнительной обработки в виде алгоритмов стабилизации.

На основе анализа видеопоследовательностей, полученных в условиях низкого освещения (вечернее, ночное и утреннее время с искусственным источником освещения), было выяснено, что возникающий шум выделяется не только в яркостной компоненте, но и в зависимости от матрицы камеры в хроматических составляющих изображения в форме блочной структуры.

Для подавления шумов предлагается использовать адаптивную пространственно-временную обработку видеопотока. Поскольку предполагается проводить шумоподавление для статических сцен с движущимися объектами и областями, обладающими свойствами динамических текстур, то общую схему работы можно представить в виде следующих шагов.

Шаг 1. Формирование карты активности движения (Map_{Gm}) на основе вычитания фонового изображения (F_{Bg}) и межкадровой разности между текущим (F_{Cur}) и предыдущим кадром (F_{Prev}). Значение карты вычисляется на основе яркостных характеристик по формуле:

$$Map_{Gm}(x,y) = \left|F_{Cur}(x,y) - F_{Bg}(x,y)\right| \times w_{Bg} + \left|F_{Cur}(x,y) - F_{Bg}(x,y)\right| \times (1 - w_{Bg}),$$

где x, y – координаты пикселя; wBg – весовой коэффициент влияния фонового изображения.

Шаг 2. Расчет контурного представления (Map_E) для вновь поступившего (текущего) кадра. Для ускорения расчета возможно использование метода Робертса [2].

Шаг 3. Расчет параметров обработки кадров. На шаге с учетом данных карты активности движения принимается решение о выборе уровня обработки. Так, если значение Map_{Gm} в обрабатываемом пикселе (x, y) меньше установленного порога чувствительности к движению Ts_{Gm}, то задается максимальное количество обрабатываемых кадров L_{Max} (рекомендуется использовать 1–3 кадра по временной оси). Вычисление средней интенсивности I_{Avg} контурного представления в локальной окрестности обрабатываемого пикселя (размер окрестности 5×5 или 7×7). Дополнительно формируется карта яркостной разности по локальной окрестности.

Шаг 4. Определение фильтров, которые будут применяться для обработки. Значения яркостных и хроматических компонентов обрабатываются по-разному. Так, если значение I_{Avg} больше заданного порога Ts_E граничных значений и отклонение яркости (Y) пикселя от среднеарифметического значения в окрестности 5×5 пикселей выше порога Ts_Y, то применяется медианный фильтр. В иных ситуациях для яркостной компоненты расчет нового значения (Y_{New}) осуществляется по формуле:

$$Y_{New}(Ts,r)=\frac{\sum_{l=0}^{L_{Max}}\sum_{i=-r}^{r}\sum_{j=-r}^{r}Sv(i,j,l,Ts)}{\sum_{l=0}^{L_{Max}}\sum_{i=-r}^{r}\sum_{j=-r}^{r}Cc(i,j,l,Ts)},$$

где Ts – значение порога, характеризующего возможность обработки; r – ранг окрестности (вид окрестности – квадрат со стороной $2 \cdot r + 1$); $Sv(i, j, l)$ – функция отсечения значения яркости по порогу; $Cc(i,j,l)$ – функция указания пригодности значения спектра по порогу. Эти функции рассчитываются следующим образом:

$$\mathrm{Sv(i,j,l)}=\begin{cases} I_{i,j,l}\times Kf_{i,j,l}, & \text{если } sv_{i,j,l}\le Ts \\ 0, & \text{если } sv_{i,j,l}>Ts \end{cases} \quad \mathrm{Cc(i,j,l)}=\begin{cases} Kf_{i,j,l}, & \text{если } sv_{i,j,l}\le Ts \\ 0, & \text{если } sv_{i,j,l}>Ts \end{cases}$$

где $Kf_{i,j,l}$ – значение коэффициента влияния сглаживания; $sv_{i,j}$ – значение абсолютной разницы яркости между элементом с условными координатами (0,0,0) и (i,j,l), вычисляемое по формуле:

$$sv_{i,j}=\left|Y_{0,0,0}-Y_{i,j,l}\right|$$

Значение коэффициента влияния сглаживания рассчитывается в зависимости от координат локальной окрестности (i, j) и глубины по временной оси (l). Значение глубины для текущего кадра равно 0, для предыдущего 1, для предпредыдущего 2 и т. п. В общем виде значение коэффициента вычисляется по формуле:

$$Kf_{i,j,l}=\begin{cases} 1/(l\times\sqrt{i^2+j^2+l^2}), & \text{если } l>0 \\ 1/(\sqrt{i^2+j^2+l^2}), & \text{если } l\ne 0 \\ 1, & \text{если } i=0,\ j=0,\ l=0 \end{cases}$$

Для хроматических компонентов производится сглаживание фильтром Гаусса [2], в котором величина размытия определяется в зависимости от типа области (темная, с нормальным освещением, светлая) и величины интенсивности контурной карты.

Шаг 5. Применение фильтров с установленными параметрами.

Шаг 6. Коррекция фонового изображения путем смешивания яркостных и хроматических компонентов с отфильтрованным кадром на величину 5–9 и 7–16 % соответственно.

Для оценки работы алгоритма было взято несколько видеопоследовательностей, полученных с *IP*-камер. Так, были использованы последовательности, передаваемые в формате *MJpeg* и *AVC*(*H264*) с разрешением от 640×480 до 1920×1080. В качестве параметров оценки использовались данные межкадровой разности для каждого пикселя, которые проверялись на вхождение в категории, определяющие уровни искажения в зависимости от динамического диапазона яркости изображения: минимальное искажение (0,1–1,5 % динамического диапазона); малое искажение (1,5–3 % динамического диапазона); визуально заметное искажение (3–7 % динамического диапазона); явный шум (более 7 % динамического диапазона). При выполнении тестирования было использовано вычисление величины искажения по компонентам цветовой модели *RGB*. Такой подход оценки связан с тем, что шум, возникающий при низком уровне освещения сцены, создает значительные искажения хроматических данных. На графике (рис. 2) представлены усредненные данные распределения искажений в зависимости от величины искусственно наложенного шума для последовательности *THouse*_70 (800×600 *MJpeg*), полученной в нормальных условиях освещения и содержащей минимальное движение. Шум, накладываемый на видеопоследовательность, содержал 70 % аддитивной и 30 % импульсной компоненты.

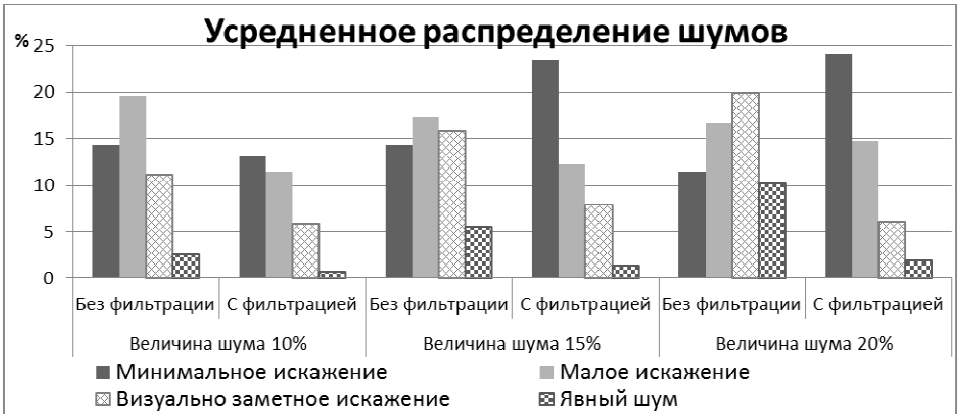


Рис 2. Оценка работы алгоритма

Предлагаемый алгоритм при искусственном добавлении шума в видеопоследовательность позволяет повысить значение *PSNR* в среднем на 9–18 % и снизить долю искажений, обладающих значениями отклонения выше 3 % динамического диапазона в 1,5–3,2 раза. В ходе экспериментов выяснено, что с применением предлагаемого алгоритма количество пикселей, отнесенных к шуму, снижается в среднем на 25–47 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-07-00121 А.

Список литературы

1. Зотин А.Г., Пахирка А.И., Буряченко В.В. Система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // Программные продукты и системы. 2013 № 2. С. 191–197.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер.с англ.; под ред. П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.

3. Yan L., Yanfeng Q. Novel adaptive temporal filter based on motion compensation for video noise reduction // Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT '06). 2006. P. 1031–1034.

4. Mishra S., Swami P.D. Spatio-temporal video denoising by block-based motion detection // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2013. Vol. 4. № 8. P. 3371–3382.

5. Зотин А.Г., Пахирка А.И. Адаптивный алгоритм шумоподавления в системах видеонаблюдения при низком уровне освещения сцены // Доклады 18-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2016». 2016. М. Т. 2. С. 838–843.

УДК 004.415.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ В МОНИТОРИНГЕ ЭКОСИСТЕМ И АГРОЦЕНОЗОВ

В. А. Исаев
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: vadim.an.isaaev@yandex.ru

USE OPEN SOURCE SOFTWARE FOR MONITORING ECOSYSTEMS AND AGROCENOSIS

V. A. Isaev
Reshetnev Siberian State Aerospace University
Institute of Informatics and Telecommunications
e-mail: vadim.an.isaaev@yandex.ru

Рассматривается возможность применения готовых программных средств для систем хранения, ввода и вывода данных мониторинга экосистем и агроценозов.

Ключевые слова: программирование, открытый исходный код, мониторинг, экосистемы, агроценоз.

Введение

На сегодняшний день мониторинг любой существующей или могущей произойти проблемы включает в себя не только средства и методики сбора необходимых данных, но и средства хранения и обработки уже собранных данных и ввода их по запросу заинтересованного лица. Обычно для этого применяются или готовые программные средства, или, в случае отсутствия готовых программ с нужным функционалом, необходимо самостоятельно создать свою.

Поскольку создание собственной программы на одном из общераспространенных языков программирования (C++, ObjectPascal, VisualBasic и т. п.) может занять довольно длительное время, то большой интерес представляет либо использование готовых программ для геоинформационных систем (ГИС, GIS), либо использование набора готовых компонентов. При использовании веб-технологий, которые позволяют создавать как программы для локального использования, так и для сети Интранет или Интернет, можно применять готовые компоненты этого профиля.

Выбор пути решения

Поскольку речь идет о системе обработки уже существующих данных, нам потребуется:

- Система хранения данных.
- Система вывода данных по запросу пользователя.
- Система ввода данных.
- Самое главное – карта того района, где нужно проводить мониторинг, в электронном виде.

Электронная карта района представляет собой первичный интерфейс, на котором обозначены ареалы распространения того или иного явления (к примеру, почв) и точки забора образцов, на основе которых проводится анализ составляющих веществ. При

выборе того или иного ареала или точки забора образца у пользователя программы появляется на экране информация с необходимой степенью детализации.

Наиболее быстрый вариант создания подобной карты с данными – использование какой-либо ГИС-системы с открытым исходным кодом [1]. Для запуска подобной программы в работу нужно только загрузить в нее карту и данные к ней. К сожалению, большой недостаток подобных систем – плохая русификация (или вообще отсутствие таковой) пользовательского интерфейса, а также очень скудная (или вообще отсутствующая) документация на русском языке по работе с программой.

Промежуточный вариант по времени создания, между использованием готовой программы ГИС и написанием собственной, занимает создание приложения из готовых компонентов. Хотя в этом случае невозможно избавиться от процесса программирования, однако этот процесс занимает минимум времени, так как не нужно самому создавать все компоненты от начала до конца. Поскольку сейчас очень популярны веб-технологии, можно создать такое приложение, которое будет использовать одни и те же компоненты как при локальном применении, когда нет возможности подключения к компьютерной сети, так и при работе с подключением к сети Интернет. При создании информационной системы (ИС) «Почвы Красноярского края», которое происходит совместно с кафедрой географии Сибирского федерального университета, был выбран именно такой способ создания универсального приложения.

Для создания ИС потребуются следующие компоненты:

- Система управления базами данных. Для хранения, ввода и вывода данных по почвам. Желательно использовать такую систему, которая не требует больших ресурсов компьютера, например SQLite [2] или Firebird [3].
- Веб-сервер. Он производит обработку всех запросов пользователя к базам данных и пересылку информации из базы данных пользователю. Исходя из критерия нетребовательности к ресурсам, можно использовать легкие и быстрые веб-серверы, типа Lighttpd [4] или nginx [5].
- Интерпретатор языка программирования. С помощью него организуются взаимодействие веб-сервера с сервером баз данных, а также возможности построения элементов управления программой на стороне пользователя. Например, таким интерпретатором может быть PHP [6].
- Веб-браузер. Для организации ввода-вывода информации у пользователя. Может быть любой, который работает в графическом режиме.

Электронная карта

Это очень важный компонент программы, который составляет основу интерфейса пользователя. Формат карты должен иметь следующие свойства:

- Возможность просмотра карты с помощью веб-браузера. Сегодняшние браузеры могут открывать для просмотра все распространённые форматы графических файлов.
- Иметь небольшой собственный объем. Если речь идет о локальном компьютере или сети Интранет, то это свойство можно игнорировать, однако для сети Интернет оно является очень важным, так как не везде можно обеспечить высокую скорость передачи данных. Малым собственным объемом обладают сжатые форматы растровой графики (например, GIF или JPEG), а также векторной графики при условии, что они не перегружены входящими в них объектами.
- Возможность масштабирования карты в широких пределах без потери качества изображения. Такими возможностями обладают только векторные форматы графики.
- Интерактивные возможности. Например, при щелчке мышью по тому или иному объекту должна вызываться соответствующая функция, которая выводит

информацию об этом объекте. Такой возможностью обладает формат векторной графики SVG.

Каким образом можно получить карту? К сожалению, для Красноярского края это составляет большую проблему. Готовых карт требуемого формата получить не удалось, однако можно использовать следующие пути для их изготовления:

- Использовать общедоступные интернет-сервисы, такие как «Яндекс-карты» или Google map, откуда можно скачать карту в растровом формате. После редактирования рисунка карты под требуемые параметры нужного района преобразовать его в векторный формат, например, с помощью открытого графического редактора Inkscape [7]. По умолчанию Inkscape работает как раз с форматом SVG, поэтому изготовить интерактивную карту не составит проблем. Недостаток этого способа – отсутствие возможности получить информацию о составе почв того или иного района;
- Можно договориться со специализированным учреждением, где имеются необходимые карты почв в бумажном виде, содержащие нужную информацию. Бумажные карты необходимо отсканировать и, как в предыдущем варианте, преобразовать в векторный формат. Недостаток – карты старые и находятся в очень плохом состоянии. Чтобы привести их в нормальный вид, необходим очень хороший специалист по компьютерной графике.

Менее затратным по времени способом изготовления электронной карты является первый способ, так как при этом потребуется специалист по компьютерной графике с минимальными навыками работы с ней. Однако с учетом необходимости получения данных о почвах необходимо использовать оба способа одновременно.

Возможный вариант карты представлен на рис. 1.

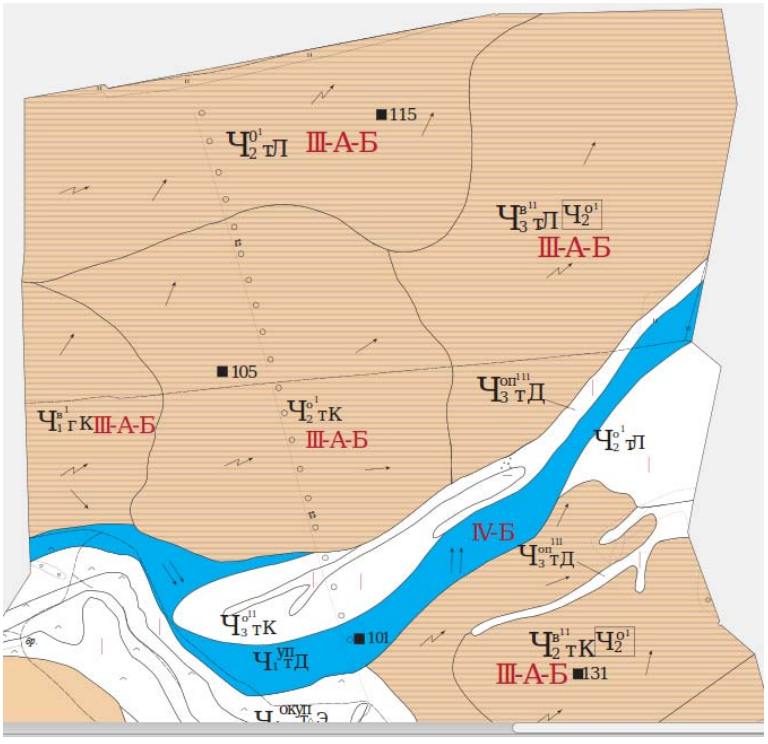
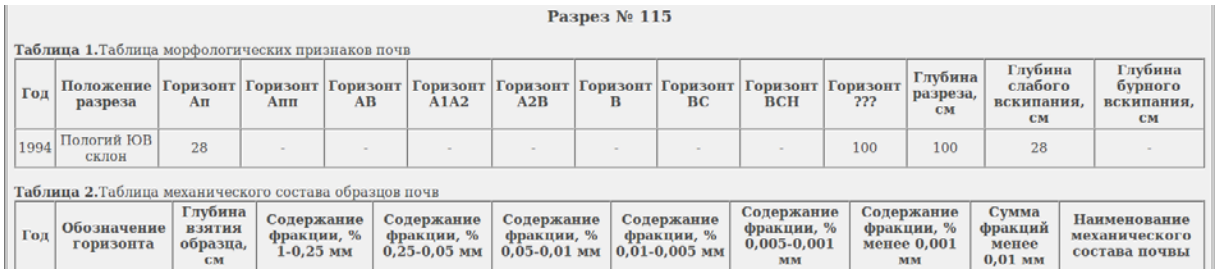


Рис. 1. Вариант представления электронной карты почв одного из районов Красноярского края

Каждое из обозначений на карте является определенным объектом. Если мы открываем такую карту в любом веб-браузере, то можно будет просматривать

информацию по каждому из объектов. Для этого необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по соответствующему объекту. Например, если щелкнуть мышью по небольшому черному квадрату вверху карты, рядом с которым стоит число «115», то откроется страница сведений по составу почвы, сделанному в месте, которое называется «разрез № 115» (см. рис. 2). Данные по разрезу берутся веб-сервером из базы данных, параметры запроса к которой передаются в виде параметров POST(GET)-запроса, например:

http://localhost/query.php?region=11&partition=soil_profile&id=115



Разрез № 115

Таблица 1. Таблица морфологических признаков почв

Год	Положение разреза	Горизонт Ап	Горизонт Апп	Горизонт АВ	Горизонт А1А2	Горизонт А2В	Горизонт В	Горизонт ВС	Горизонт ВСН	Горизонт ???	Глубина разреза, см	Глубина слабого вскипания, см	Глубина бурного вскипания, см
1994	Пологий ЮВ склон	28	-	-	-	-	-	-	-	100	100	28	-

Таблица 2. Таблица механического состава образцов почв

Год	Обозначение горизонта	Глубина взятия образца, см	Содержание фракции, % 1-0,25 мм	Содержание фракции, % 0,25-0,05 мм	Содержание фракции, % 0,05-0,01 мм	Содержание фракции, % 0,01-0,005 мм	Содержание фракции, % 0,005-0,001 мм	Содержание фракции, % менее 0,001 мм	Сумма фракций менее 0,01 мм	Наименование механического состава почвы

Рис. 2. Информация об объекте электронной карты «Разрез № 115»

Заключение

Использование готовых компонентов при изготовлении программ для хранения и обработки данных мониторинга участков земной поверхности позволяет, в отличие от готовых программ, лучше приспособить приложение под свои нужды и, по сравнению с написанием собственного приложения с нуля на общераспространенном языке программирования, значительно сократить сроки ввода приложения в работу.

Список литературы

1. Дубинин М.Ю., Рыков Д.А. Открытые настольные ГИС: обзор текущей ситуации [Электронный ресурс] // GIS-LAB. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. URL: http://gis-lab.info/qa/os-gis.html
2. Домашняя страница SQLite [Электронный ресурс]. URL: http://www.sqlite.org/
3. Домашняя страница Firebird [Электронный ресурс]. URL: http://www.firebirdsql.org/
4. Домашняя страница lighttpd [Электронный ресурс]. URL: http://www.lighttpd.net/
5. Домашняя страница nginx [Электронный ресурс]. URL: http://nginx.org/ru/
6. Домашняя страница PHP [Электронный ресурс]. URL: http://php.net/
7. Домашняя страница Inkscape [Электронный ресурс]. URL: https://inkscape.org/ru/

УДК 004.032.24

ПРИМЕНЕНИЕ УЧЕБНО-ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ В ИНТЕРЕСАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

И. Н. Ищук, В. В. Родионов, Н. А. Волков, М. А. Пылаев, В. В. Согомонян
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
e-mail: boerby@rambler.ru

I. N. Ischuk, V. V. Rodionov, N. A. Volkov, M. A. Pylaev, V.V. Sogomonyan
MTRC of the AF "AFA named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin"
(Voronezh)
e-mail: boerby@rambler.ru

В данной статье рассматриваются перспективы применения технологий автоматизации учебного процесса на примере унифицированного учебно-тренажерного комплекса (УУТК) «Тренировка». Анализируются преимущества и недостатки внедрения данного комплекса в воздушно-космические силы РФ. Рассматривается проблема автоматического обнаружения объектов вооружения и военной техники.

Развитие научного и технического потенциала Вооруженных сил Российской Федерации является одним из важнейших вопросов, решаемых государством в рамках организации обороны нашей страны. Вопросы современного состояния и подготовки кадров Российской армии, направления дальнейшего ее развития являются объектом пристального внимания и предметом для активного обсуждения не только в российском обществе, но и в зарубежных странах.

В данных условиях обеспечение национальной безопасности государства приобретает все более сложную и комплексную ориентацию. С учетом этого повышение боевых возможностей Вооруженных сил Российской Федерации, подготовки высококвалифицированных военных профессионалов является одной из ведущих задач государства. Совершенствование информационных технологий и внедрение их во все сферы общества позволило найти новые формы и методики обучения специалистов, одна из которых – применение учебно-тренажерных комплексов, отвечающих современным требованиям. Таковым является унифицированный учебно-тренажерный комплекс «Тренировка». В данном изделии реализованы задачи обучения основных специалистов, работающих на наземных пунктах управления комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА). В программу обучения входят такие вопросы, как выбор района расположения БЛА, планирование полета и разбор программ полетов, обработка поступающей информации, управление целевой нагрузкой, дешифрирование изображения, формирование отчетных документов. Эти задачи охватывают наиболее важные функции, выполняемые операторами при подготовке и в ходе полетов. При этом по каждой решаемой задаче проводится как одиночная (теоретическая и практическая) подготовка, так и подготовка в составе расчета в ходе отработки комплексного тренажа в обстановке, приближенной к реальной. Важно отметить, что в задачи изделия, по замыслу его разработки, не входило обучение собственно пилотированию БЛА, поскольку эта задача решается, как правило, с использованием учебно-тренировочных средств, разрабатываемых создателями комплексов. В связи с этим важно определить роль и место УУТК в общей системе подготовки операторов БЛА.

Учебный класс из состава изделия обеспечивает теоретическую подготовку и практическую одиночную подготовку операторов, при этом операторы управления БЛА используют для практической подготовки также учебно-тренировочные средства из состава комплексов, использующих виртуальную информационную среду, в которую входит программный комплекс подготовки сценариев (ПКПС), позволяющий сформировать тактическую обстановку и динамику ее изменения путем создания сценария тренировки либо загрузки ранее созданного сценария. Комплекс позволяет запустить тренировку по созданному сценарию и визуально, с использованием окон отображения трехмерных сцен и картографической информации, проконтролировать ход выполнения тренировки. Сценарий задается множеством объектов моделирования с заданными координатами, углами и маршрутами, по которым объекты будут следовать в процессе проведения тренировки, объектов геометрических, объектов навигационных. Комплекс позволяет ввести все эти параметры в графическом и текстовом виде, а также задать метеообстановку для проведения тренировки [1]. Также в данной среде возможно взаимодействие объектов военной техники: атака по наземным и воздушным целям, имитация работы артиллерии и т. п.

Автоматизацию учебного процесса решают последовательным выполнением частных задач подготовки и организации обучения, управлением проведения занятия, работы обучаемого на занятии, контроль занятий и анализа результатов обучения. Подготовку обучаемых проводят как в составе группы – при этом проводят совместную подготовку обучаемых группы, так и в составе подгруппы – при этом проводят раздельную подготовку обучаемых по специальности [2].

Подготовка наземных пунктов управления (НПУ) комплексов с беспилотными летательными аппаратами реализованы по типам действия: ближний, средний и дальний. Программный комплекс тренажера предназначен для имитации автоматизированного рабочего места (АРМ) НПУ комплекса с БЛА с обеспечением следующих характеристик: точное соответствие по внешнему виду и соответствие по размещению органов управления, точное соответствие по размещению органов индикации и воспроизведение функциональных возможностей. Функциональные возможности тренажера НПУ комплексов с БЛА обеспечивают имитацию подготовки полетного задания, имитацию исполнения полетного задания, визуализацию получаемых имитируемой бортовой аппаратурой наблюдения БЛА данных, взаимодействие с унифицированным программно-аппаратным комплексом (УПАК) виртуальной информационной среды. Проведение учебно-тренировочных занятий на реальных БЛА связано с некоторым рядом трудностей. Основными являются: существенные материальные затраты на обучение оператора, особенно в том случае, когда применяются БЛА одноразового применения; недостаточный контроль за действиями оператора в ходе выполнения задачи; невозможность быстрого перезапуска выполнения тренировочного полета при возникновении внештатных ситуаций и другие немаловажные критерии.

Возможности комплекса позволяют проводить съемку в различных диапазонах длин волн, что повышает эффективность обнаружения объектов при проведении учебно-тренировочных полетов, но на сегодняшний день недостаточно проводить обнаружение только оператором дешифрирования, поэтому одна из важнейших задач – построение алгоритма автоматического обнаружения объектов вооружения и военной техники (ВВТ). С использованием материалов съемки учебно-тренировочным комплексом в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн проводились эксперименты по обнаружению объектов ВВТ средствами графического программирования Nation Instruments Vision Builder. В основу эксперимента брались кадрированные изображения видеопотока, на которых выделялось эталонное изображение и проводилась обработка данных корреляционным методом. На рис. 1 и 2 представлены результаты обработки.

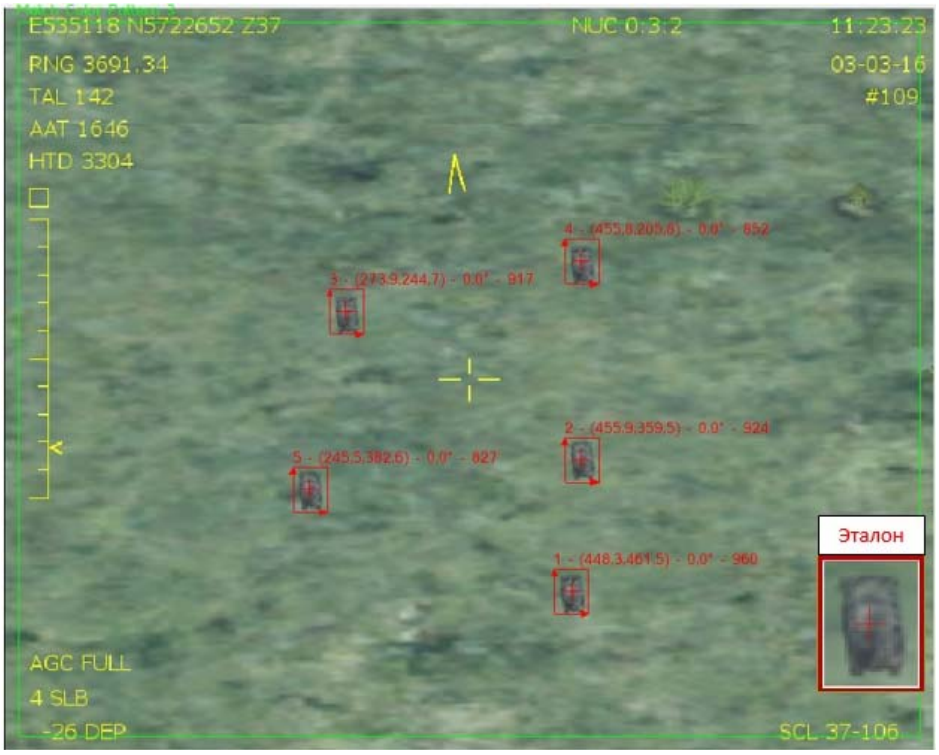


Рис. 1. Автоматическое обнаружение объектов ВВТ в видимом диапазоне длин волн

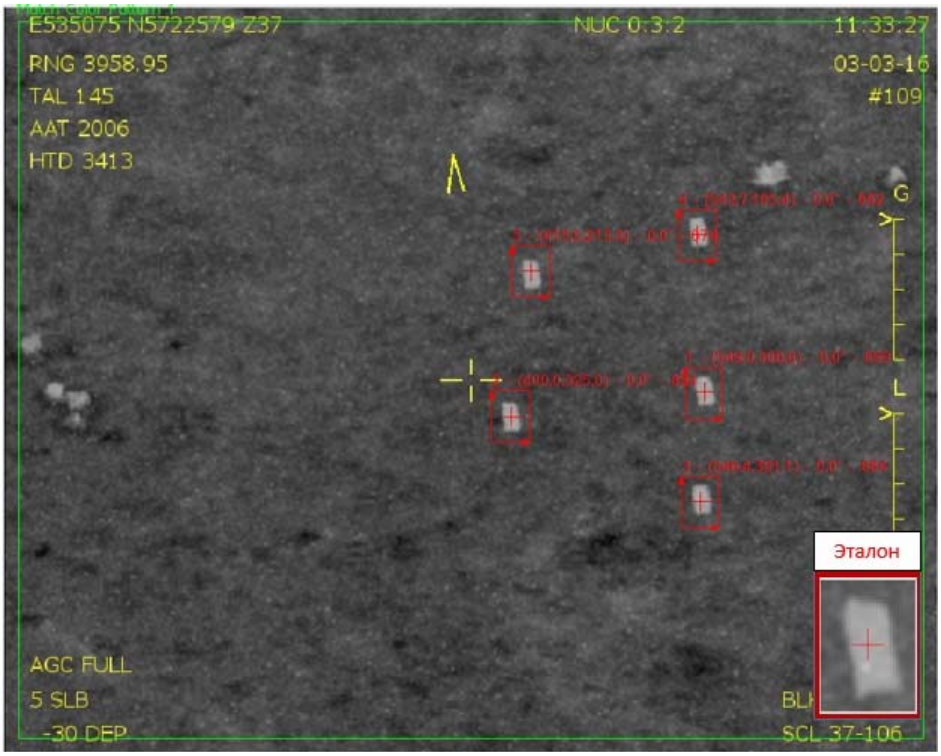


Рис. 2. Автоматическое обнаружение объектов ВВТ в инфракрасном диапазоне длин волн

Обработка видеоаэрофотоизображений корреляционным методом в среде National Instruments производилась для каждого кадра. В процессе эксперимента в случае обнаружения 5 объектов из 5 возможных результат обработки считался положительным, отрицательным – если не обнаружен хотя бы один объект. Так,

в видимом диапазоне в результате обработки 33 кадров, положительный результат был зафиксирован 23 раза, что соответствует вероятности правильного обнаружения 0,69, а в инфракрасном диапазоне к 33 обработанным кадрам с полностью обнаруженными объектами, два кадра на которых обнаружили не все объекты, т. е. вероятность положительного исхода составляет примерно 0,93. Следовательно, проводя гиперспектральную съемку в различных диапазонах длин волн (так как гиперспектральная съемка реализует для заданного района местности одновременное получение десятков изображений одной и той же сцены, зафиксированных в очень узких соприкасающихся спектральных диапазонах), можно добиться большей вероятности обнаружения интересующих объектов за счет одновременного анализа кадров в различных диапазонах длин волн, тем самым повысив эффективность обнаружения. Вероятность правильного обнаружения рассматриваемой в представленном эксперименте группы из пяти объектов ВВТ в результате их наблюдения в двух спектральных диапазонах (видимом и инфракрасном) на основании [3] составит:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{23}{33}\right) \cdot \left(1 - \frac{31}{33}\right) = 1 - 0{,}0217 = 0{,}97.$$

Из чего следует, что вероятность положительного исхода обнаружения объектов близка к 1 и составляет 0,97.

Таким образом, в связи с развитием технологий беспилотной авиации и все большим внедрением комплексов с беспилотными летательными аппаратами во все рода войск необходимо решать задачи автоматического, интеллектуального обнаружения объектов ВВТ, а также совершенствовать учебно-тренировочные комплексы подготовки расчетов путем реализации гиперспектральной съемки, что позволит повысить достоверность обнаружения искомых объектов. Основными направлениями развития тренажеров в настоящее время являются совершенствование техники отображения и создания обстановки, адекватной реальной, использование микропроцессорной техники на основе концепции распределенной обработки и локальной вычислительной сети. Задействованные мощные запоминающие устройства позволят проводить тренировки в реальном масштабе времени, реализовать комплексность в подготовке не только отдельных операторов, но и экипажей в целом, а также моделирование любых вариантов оперативно-тактической обстановки. Не менее важным направлением является поддержка технологий дистанционного обучения с использованием телекоммуникационных систем и поддержка возможности одновременной подготовки нескольких расчетов комплексов с БЛА различных типов, взаимодействующих между собой.

Список литературы

1. Руководство оператора программного комплекса подготовки сцен. СПб., 2015. 55 с.

2. Руководство оператора программного комплекса автоматизации учебного процесса. СПб., 2015. 296 с.

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк, 1999. 576 с.

УДК 518.6, 536.6

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧЕ РЕДУКЦИИ КУБОИДА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И. Н. Ищук, А. М. Филимонов, К. В. Постнов, Е. А. Степанов
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
e-mail: boerby@rambler.ru
e-mail: flyfil87@mail.ru
e-mail: konstantin_postnov_88@mail.ru
e-mail: stepanovevgeniy@mail.ru

В статье рассматривается пассивный метод обнаружения и распознавания техногенных объектов, основанный на анализе нескольких изображений, полученных в ходе длительной или периодической ИК-съемки. Представлен результат применения генетического алгоритма для решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности. Приведен результат обработки динамических ИК-сигнатур, полученных в ходе математического моделирования процессов теплообмена техногенных объектов.

Ключевые слова: инфракрасное изображение, обратная задача теплопроводности, генетический алгоритм, тепловая томограмма.

Существует множество методов дистанционного наблюдения, отличающихся составом, содержанием операций и технических приемов. Наиболее существенными являются активные и пассивные методы, основанные на регистрации искусственного или естественного освещения объектов, получении соответствующих изображений и поиске демаскирующих признаков.

Рассмотрим пассивный метод обнаружения, основанный на приеме и обработке собственного теплового излучения объектов поиска. Сущность такого метода заключается в проведении операций, связанных с регистрацией теплового поля, состоящего из собственного излучения объектов, отраженного, рассеянного объектами излучения внешних источников искусственного или естественного происхождения. Регистрация теплового излучения производится тепловизионным приемником, работающим в инфракрасном (ИК) диапазоне. В результате последовательного выполнения единых операций формируются изображения, по результатам обработки и анализа которых принимается решение об обнаружении объекта.

Достижения научно-технического прогресса способствовали совершенствованию средств ведения мониторинга земной поверхности. Основными направлениями развития явились улучшение качества получаемых изображений, оперативность передачи данных мониторинга для обработки, увеличение длительности полета. Все это обусловливает необходимость создания метода анализа результатов, при котором большинство этапов обработки ИК-изображений будет производиться автоматизированно. В качестве нового метода обнаружения и распознавания техногенных объектов можно использовать методы, реализующие в себе анализ нескольких изображений, полученных в ходе длительной или периодической ИК-съемки [1]. Они позволяют анализировать динамику изменения температур, а также на основе полученной информации производить расчеты, связанные с выделением контуров и определением размеров объектов. Математический аппарат, реализующий такой метод обнаружения, позволяет находить не только объекты, находящиеся на поверхности земли, но и выделять заглубленные сооружения и замаскированную технику.

Для решения задачи теплового обнаружения и распознавания техногенных объектов требуется постановка двух математических моделей: модель прямой (ПЗТ) и обратной задачи теплопроводности (ОЗТ). Математическая модель ПЗТ необходима для постановки ОЗТ. Результатом решения ОЗТ будет пространственное распределение теплофизических параметров – томограмма, по которой принимается решение об обнаружении объектов.

Основой для математической модели ПЗТ является дифференциальное уравнение теплопроводности.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\nabla^2 T\,, \tag{1}$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; T – температура; τ – время; a – температуропроводность.

Наиболее универсальным способом исследования физических моделей является применение численных методов для нахождения приближенного решения, в связи с этим постановку ОЗТ как оптимизационной задачи произведем на основе численного решения ПЗТ конечно-разностным методом по неявной схеме.

Составим функционал невязки, которая вычисляется между расчетными избыточными температурами и измеренными тепловизионным приемником с использованием евклидовой нормы [2]:

$$\left\{ \underset{g}{\mathbf{J}}[\mathbf{\Psi}] = \left\| \mathbf{T}[\mathbf{\Psi}] - \tilde{\mathbf{T}} \right\|^2 \right\} \to \min_{a,\lambda,E}, \tag{2}$$

где a – температуропроводность; λ – теплопроводность; E – энергетическая светимость; $\mathbf{\Psi}: a, \lambda, E$ – вектор параметров математической модели; g – размеры рассматриваемой прямоугольной области; $\mathbf{T}[\mathbf{\Psi}]$ – результат решения ПЗТ разностными схемами; $\tilde{\mathbf{T}}$ – матрица значений экспериментально измеренных термодинамических температур на исследуемой поверхности.

Для решения ОЗТ используем генетический алгоритм оптимизации. Достоинством генетического алгоритма является то, что он не имеет значительных математических требований к видам целевых функций и ограничений. Нет необходимости упрощать модель объекта, теряя ее адекватность, и искусственно добиваться возможности применения доступных математических методов. При этом могут использоваться самые разнообразные целевые функции и виды ограничений (линейные и нелинейные), определенные на дискретных, непрерывных и смешанных универсальных множествах [3].

В постановке задачи на выполнение генетического алгоритма определим значение функционала невязки $\underset{g}{\mathbf{J}}[\mathbf{\Psi}]$ целевой функцией, а параметры функции a, λ, E – генетическим материалом (генами). Совокупность генов составляет хромосому $\mathbf{\Psi}$. Каждая «особь» обладает своей хромосомой, а следовательно, своим набором параметров. Совокупность «особей» образуют популяцию. Генетический алгоритм будет работать с популяцией заранее заданного фиксированного размера $N_{ГА}$. Начальную популяцию получим путем задания значений генов из заранее определенного интервала допустимых значений. Для каждой популяции вычислим вектор целевых значений, по которому определим приспособленность (fitness) индивида.

В процессе выполнения алгоритма задействуются операции селекции, мутации и скрещивания. Таким образом формируется новая популяция допустимых решений, которая воспроизводит лучших представителей предыдущего поколения, скрещивая их и получая множество новых особей.

Селекция отвечает за выбор направления развития популяций. На этом этапе отбрасываются решения с наименьшей приспособленностью, что способствует улучшению средней приспособленности всей популяции с одновременным наследованием генной информации от обоих родителей.

Для восстановления численности популяции путем *скрещивания* получим новые решения. Скрещивание проводится путем выбора из популяции двух решений, прошедших через отбор, и за счет рекомбинации их составных частей получают новое решение, которое остается в популяции. Скрещивание проведем операцией одноточечного кроссинговера.

Родители			Потомки
$w_1, w_2, w_3, \ldots, w_{n-1},$	$w_n, \ldots, w_m$	$\rightarrow$	$w_1, w_2, w_3, \ldots, w_{n-1}, v_n, \ldots, v_m$
$v_1, v_2, v_3, \ldots, v_{n-1},$	$v_n, \ldots, v_m$	$\rightarrow$	$v_1, v_2, v_3, \ldots, v_{n-1}, w_n, \ldots, w_m$

Рис. 1. Одноточечный кроссинговер

где $w_1 \ldots w_m$, $v_1 \ldots v_m$ – элементы родительских особей.

Для предотвращения преждевременной сходимости и попадания в локальный экстремум применим операцию *мутации*, которая выполняется путем изменения случайно выбранного гена в хромосоме.

$$w_1, w_2, w_3, \ldots, w_{n-1}, w_n, \ldots, w_m \rightarrow w_1, w_2, w_3, \ldots, w_{n-1}, \overline{w}_n, \ldots, w_m$$

Рис. 2. Операция мутации над геном w_n

В результате выполнения операций селекции, мутации и скрещивания из поколения в поколение хорошие характеристики распространяются по всей популяции, и в конечном итоге популяция будет сходиться к оптимальному решению задачи.

Итерации генетического алгоритма будем продолжать до тех пор, пока не выполнится условие останова (3), то есть пока не найдется особь, гены которой представляют оптимальный набор параметров, при которых значение целевой функции $\underset{g}{\mathbf{J}}\left[\boldsymbol{\Psi}\right]$ близко к минимуму либо равно ему.

$$\underset{g}{\mathbf{J}} \min\left[\boldsymbol{\Psi}^d\right] - \underset{g}{\mathbf{J}} \min\left[\boldsymbol{\Psi}^{d-1}\right] < \xi \ , \tag{3}$$

где d – шаг итерации генетического алгоритма (номер поколения), $\underset{g}{\mathbf{J}} \min\left[\boldsymbol{\Psi}^d\right]$ – минимальное значение целевой функции в текущей популяции генетического алгоритма.

Оптимизацию реализуем путем последовательного выполнения этапов следующего алгоритма:

1. Задание начальных параметров:
- Размер популяции $N_{ГА} = 100$.
- Вероятность скрещивания $P_{скр} = 0{,}95$.
- Вероятность мутации $P_{мут} = 0{,}15$.
- Условие останова $\xi < 10^{-8}$.

2. Создание начальной популяции. Задание генома каждому из индивидов. Расчет вектора целевых функций $\underset{g}{\mathbf{J}}[\Psi]$.

3. Определение приспособленности для особей популяции (оценивание) путем оценки функционала с точки зрения поиска минимального значения.

4. Выбор индивидов из текущей популяции (селекция).

5. Скрещивание и/или мутация.

6. Определение приспособленности для всех особей.

7. Проверка критерия останова (3). Если выполняется поставленный критерий, то окончание расчетов и вывод полученных значений генома, иначе формирование нового поколения и переход к пункту 3.

Для реализации генетического алгоритма на языке объектно-ориентированного программирования C# разработана программа, которая позволяет производить оптимизацию целевой функции на основе расчета прямой задачи теплопроводности для двумерного и одномерного случая, а также выполняет расчет и построение томограммы.

Для проверки адекватности математической модели и работоспособности алгоритма оптимизации был проведен эксперимент по нагреву источником тепла объектов с заранее известными теплофизическими параметрами. Графики экспериментально измеренных избыточных температур, а также графики расчета температурного поля с использованием двумерной математической модели до и после применения генетического алгоритма представлены на рис. 3.

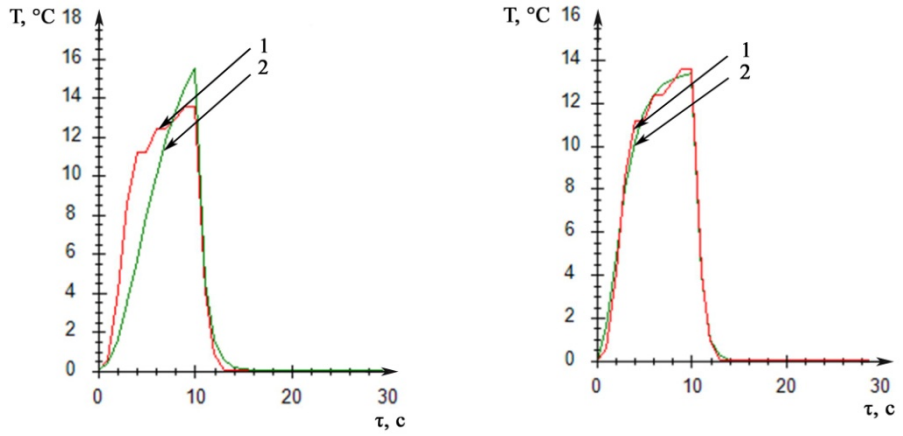


Рис. 3. Графики экспериментально измеренных избыточных температур – 1, и графики расчета температурного поля с использованием двумерной математической модели – 2 до (а) и после (б) применения генетического алгоритма

Для имитации процессов теплопередачи в естественных условиях была использована среда трехмерного теплового моделирования. На грунте были расположены трехмерные модели объекта военной техники, здания, бункера, а также эталонных материалов (сталь, песок, пенопласт, деревянная плита (сосна), бетонная плита, плита из красного полнотелого кирпича).

По данным метеорологических наблюдений погоды, зафиксированных в интервале времени с 06:10 до 08:50 следующих суток в г. Воронеже в июне 2016 г., смоделирована суточная погодная обстановка. С интервалом в 30 мин получены ИК-сигнатуры.

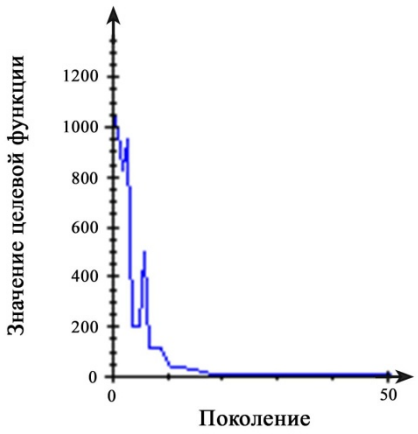


Рис. 4. График сходимости генетического алгоритма

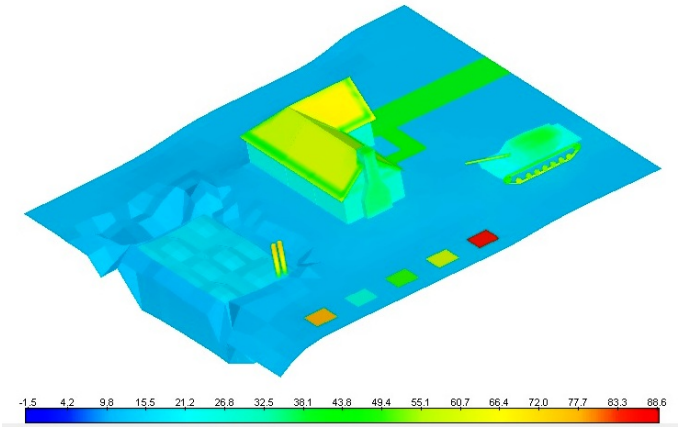


Рис. 5. Модельная обстановка

Решив ОЗТ в каждой точке пространственного разрешения с использованием разработанной программы, получим тепловую томограмму, которая является основой для более эффективного решения задач мониторинга земной поверхности, дефектоскопии и обнаружения объектов в ИК-диапазоне длин волн.

Результат расчета томограммы представлен на рис. 6.

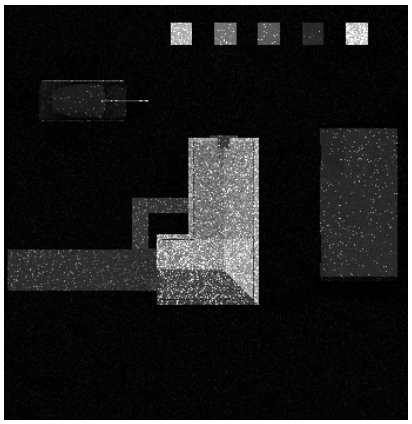


Рис. 6. Томограмма

Таким образом, по рассчитанной томограмме без применения методов сегментации возможно выделить контуры и определить форму исследуемых объектов, что свидетельствует об эффективности применяемого метода редукции кубоида ИК-изображений при решении задач обнаружения и распознавания техногенных объектов.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 15-08-02611 А.

Список литературы

1. Методика дистанционного контроля изотропных материалов путем редукции кубоида инфракрасных изображений / И.Н. Ищук, В.В. Обухов, А.В. Парфирьев, А.М. Филимонов // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 41–45.

2. Метод диагностики скрытых объектов по данным кубоида инфракрасных изображений, полученных с беспилотного летательного аппарата / И.Н. Ищук, В.В. Михайлов, А.М. Филимонов, Г.Я. Шайдуров // Наукоемкие технологии. 2015. № 4. Т. 16. С. 31–37.

3. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учеб.-метод. пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.

УДК 528.8.04, 528.88, 551.46

ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ВОДНЫХ СИСТЕМ

А. В. Картушинский
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт экологии и географии
Институт биофизики СО РАН
e-mail: kartushka@mail.ru

GRADIENT METHOD WITH USING SATELLITE DATA FOR THE APPLICATION OF NUMERICAL MODELS OF AQUATIC SYSTEMS

A. V. Kartushinsky[(1,2)]
[(1)]Siberian Federal University, Institute of Ecology and Geography
[(2)]Institute of Biophysics SB RAS
e-mail: kartalvas@rambler.ru

Предлагается к применению градиентный метод обработки спутниковых данных для использования в численном моделировании процессов в водных экосистемах и интерпретации космических изображений для выявления горизонтальных неоднородностей физических и биологических компонент. Представлена информационная технология изучения изменчивости поверхностных градиентных полей водных систем как показателя, отражающего границы динамичности процессов и структуры поверхностного слоя на примере оз. Шира (Хакасия).

Ключевые слова: спутниковые данные, градиентные характеристики, поверхностные неоднородности, пространственно-временная изменчивость, математические модели.

Для изучения динамики процессов физической и биологической природы в водных системах и для оценки экологического состояния водных объектов важной задачей является качественная обработка данных. Изменчивость процессов в поверхностном слое водных систем во многом обусловлена динамической связью между биологическими и физическими компонентами, а также стратификацией водного объекта [1, 2].

Спутниковый мониторинг и данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) в настоящее время являются звеньями наиболее интенсивно развивающейся технологии изучения природных процессов и явлений на различных пространственных и временных масштабах [3, 4]. Информационные технологии обработки спутниковых данных являются эффективным методом выявления, оценки и прогноза функционирования природных систем [5]. Оценка и прогнозирование скорости изменения характеристик водных систем с использованием методов численного моделирования и данных ДЗЗ является важной научной задачей в фундаментальном и прикладном значении.

Применение информационных технологий обработки спутниковых данных позволяет создавать системы мониторинга экологического состояния природных объектов, в том числе для определения условий и масштабов возникновения природных катастроф и аномальных явлений. Численные математические модели дают возможность рассчитать риски аномальных явлений и возможности для развития неблагоприятных экологических условий, в том числе и для человека, который является звеном пищевой цепи.

Расчеты градиентных характеристик поверхности природных систем необходимы для выявления зон с различной динамической активностью [6]. Спутниковые измерения в видимом и инфракрасном диапазонах представляют собой изображения

с пространственными полями различных характеристик природных объектов поверхности Земли [3, 4]. Основными характеристиками измерений из космоса являются абсолютные и калиброванные значения отражательной способности поверхности на различных спектральных каналах. Однако расчеты пространственно-временных градиентов параметров состояния поверхности Земли могут показать несколько другую картину динамического проявления процессов, в особенности в водных системах. С крупными водными объектами на основе спутниковых данных исследователи работают достаточно давно [7]. А при увеличении пространственного разрешения спутниковых изображений появилась возможность изучать динамику поверхностного слоя и малых водных объектов [6].

Таким образом, основной целью данной работы является реализация метода расчета градиентных характеристик малоразмерной водной системы (озеро Шира, Хакасия) по температуре поверхности воды и мутности по спутниковым данным для использования в математических моделях с применением разработанных информационно-программных средств и соответствующего программного обеспечения.

Материалы и метод расчета градиентных показателей по спутниковым данным

Изучению озера Шира (Хакасия) посвящено достаточно много работ, которые выполнены на научном стационаре Института биофизики СО РАН, находящемся на побережье озера [2, 8]. Градиентный метод расчета градиентных характеристик, которые представляют собой дифференцированные показатели скорости изменения параметров исследуемого объекта (поля), применяется в ряде работ [6, 7, 9]. Однако используется метод не в полной мере, особенно для малоразмерных объектов, каким является оз. Шира. При этом расчеты динамики исследуемых полей основываются на совмещении или композиции исходных изображений (снимков), сравниваемых в абсолютных количественных показателях и усредненных интерполированных значениях [3–5].

Методологическая концепция необходимости расчета пространственных градиентов поверхности оз. Шира обусловлена возможностью выявления зон с различной динамической активностью температурных полей и поля мутности воды по нормализованному индексу мутности [6, 10].

В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные аппаратными средствами с высоким и низким разрешением AVHRR MCSST, CZCS, MODIS, MSS, за различные периоды времени со спутников NOAA, TERRA, AQUA. Основным исходным материалом, используемым в работе, являются спутниковые данные SPOT-4, LandSat-7, LandSat-8 за весенне-летний период 2013, 2014, 2015 гг. Для обработки спутниковых данных и получения значений градиентных характеристик по данным дистанционного зондирования использовался прикладной пакет ENVI 4.7 с разработанными макросами в среде IDL.

Для оценки действия физических факторов на формирование градиентных полей мутности и температуры воды, пространственно-временных масштабов динамических процессов использовалась одномерная численная TSP-модель [1] и параметрические модели, основанные на теории подобия [11].

Принципиальную важность при математическом моделировании водных экосистем приобретает необходимость оценки действия факторов окружающей среды на живые организмы. Основным продукционным звеном в данном случае является фитопланктон, который при соответствующем распределении биомассы формирует кормовую базу для других звеньев пищевой цепи [12]. Неоднородность пространственного распределения фитопланктона обусловлена его биологической

активностью функционирования и физическими механизмами воздействия внешней среды. Поэтому в работе основное внимание уделяется расчетам градиентов температуры поверхности воды и нормализованного индекса мутности [6].

Усреднение по пространству градиентов, осуществляемое в работе, дает возможность рассчитывать средние градиенты по площади, что позволяет оценивать как мелкомасштабные особенности структуры градиентных полей, так и крупномасштабные квазистатические процессы.

Обсуждение и выводы

Математическое моделирование динамических процессов водной экосистемы оз. Шира основано на детерминированном подходе с численной аппроксимацией задач решения дифференциальных уравнений с различными начальными и граничными условиями. Проблемой построения численной модели, основанной на спутниковых данных, является совмещение географических координат снимка и расчетной сеточной области модели. При математическом моделировании динамических процессов в малоразмерном озере необходимо учитывать нелинейность при реализации моделей озерных систем, определяемых сеточным масштабом расчета модели и совмещения с пространственным разрешением спутникового изображения.

В работе используются данные численных экспериментов на математической модели для описания связи: структурные изменения параметров среды обитания – пространственно-временные изменения биотических компонент водной экосистемы. Моделируется воздействие на фитопланктон факторов, связанных с турбулентным перемешиванием, вертикальными движениями вод, распределением пищи и света. Анализируется влияние отдельных факторов на формирование неоднородностей по вертикали и горизонтали (плоская задача).

На основании численных экспериментов и сравнении с данными дистанционного зондирования оз. Шира можно сделать некоторые выводы:

в водных системах происходит периодическое формирование упорядоченных структур из хаотических и наоборот. Такие переходы характерны для природных систем из-за нелинейности процессов с основными свойствами:

1. Чем больше компоненты системы отклоняются от равновесия и возрастает амплитуда колебаний, тем быстрее идет процесс формирования неоднородностей экосистемы.

2. Величина пространственного градиента компонент водной системы может быть определена как граница формирования медленного и быстрого процесса или явления в верхнем слое водной экосистемы.

3. При усилении турбулентной активности в водной среде при моделировании динамики системы возможно «забывание» начальных условий и начальных данных возникновения процесса. Это приводит к спонтанному возникновению «упорядоченности» и формированию локализованных структур распределения температуры воды и концентрации хлорофилла, фитопланктона (мутности воды).

Природа возникновения гидробиологических неоднородных зон различна. В первую очередь, на пространственное распределение концентрации фитопланктона влияет характер динамики вод и географическая широта места. Время существования и биопродуктивность в этих зонах связаны с концентрацией биогенных элементов, температурой вод и световыми условиями, определяющими интенсивность биосинтеза.

Одним из эффективных признаков, пригодных для выявления динамики фитопигментов, является пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла (в особенности ее суточный и сезонный ход) и термодинамического режима водного объекта.

Градиентный метод обработки спутниковых данных может применяться как интегральный подход для оценки пространственно-временной изменчивости процессов в экосистемах. Использование градиентного метода обработки спутниковых данных в численных моделях может упростить оценку скорости переноса вещества, тепла и массы в вертикальном и горизонтальном направлении (адвективная, конвективная составляющие), а также оценить вклад диффузионной компоненты переноса. Таким образом, горизонтальные градиенты пространственного распределения данных дают широтную и меридиональную составляющие с возможностью получения вектора развития (затухания) процесса и определение границ динамики водной системы.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-00853 а.

Список литературы

1. Картушинский А.В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 112–124.

2. Degermendzhy A.G., Zadereev Y.S., Rogozin D.Y., Prokopkin I.G., Barkhatov Y.V., Tolomeev A.P., Khromechek E.B., Janse J.-P., Mooij W.-M., Gulati R.-D. Vertical stratification of physical, chemical and biological components in two saline lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia) // Aquatic Ecology. 2010. Vol. 44, N. 3. P. 619–632.

3. Стругайло В.В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2012. № 5. URL: http://technomag.edu.ru/doc/411847.html

4. Коберниченко В.Г., Тренихин В.А. Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 4. С. 22–31.

5. PlanetaMonitoring. Программный комплекс обработки спутниковых данных / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.А. Кровотынцев [и др.] // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.

6. Картушинский А.В., Кукоба Н.А. Изучение градиентных полей поверхности Земли по спутниковым данным // Вестник СибГАУ. 2015. 3(16). С. 587–596.

7. Kazmin A.S., Rienecker M.M. Variability and frontogenesis in the large-scale oceanic frontal zones // J. of Geoph. Res.: Oceans. 1996. Vol. 101, C1. P. 907–921.

8. 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.

9. Картушинский А.В. Градиентные характеристики поверхности Земли для спутникового мониторинга природной среды // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: сб. материалов II Междунар. науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. ред. М.В. Носков. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. С. 268–271.

10. Gardelle J. Hiernaux P. Kergoat L., Grippa M. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali) // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 14. P. 309–324.

11. Картушинский А.В. Информационные системы. Динамические процессы в воздухе и воде: учеб. пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. 103 с.

12. Diehl S. Phytoplankton, light, and nutrients in a gradient of mixing depths: Theory // Ecology. 2002. Vol. 83, N 2. P. 386–398.

УДК 004.932, 517.443

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУМЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

О. И. Киселев, В. С. Тутатчиков
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: okiselev@sfu-kras.ru
e-mail: vtutatchikov@mail.ru

В современных системах дистанционного зондирования Земли широкое распространение получило двумерное быстрое преобразование Фурье для обработки космоснимков и последующей фильтрации изображений. Рассмотрим подробнее способы его применения на примере снимка поверхности Красноярска и его окрестностей.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов.

Введение

В настоящее время дистанционное зондирование Земли тесно связано с цифровой обработкой изображений, так как получаемые аэрокосмические снимки представлены в цифровой форме в виде растровых изображений. Для улучшения изображений обычно применяют изменение яркости и контрастности, пространственную фильтрацию, преобразование Фурье и последующую частотную фильтрацию [1]. Традиционно применяемый алгоритм вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) представляет собой последовательное применение одномерного БПФ сначала для всех строк, затем для всех столбцов. В статье рассмотрен вариант применения аналога алгоритма Кули-Тьюки вычисления двумерного БПФ, в котором уменьшено число комплексных операций по сравнению с традиционно применяемым алгоритмом.

Фильтрация изображений

Представим изображение в виде функции $f(x,y)$, где x,y принимают натуральные значения – координаты пикселя изображения, а значение функции $f(x,y)$ – значение яркости указанного пикселя [2]. При этом величина изменения значения яркости данных на единицу расстояния на любой части изображения называется пространственной частотой. Резкое изменение яркости на участке в несколько пикселей рассматривается как высокая частота, плавное изменение яркости на достаточно большом участке – как низкая. Соответствующие участки называются областями высокой и низкой частоты. К области с низкой частотой можно отнести изображение гладкой поверхности озера. Области с городской застройкой с дорожными сетями являются областями высокой пространственной частоты. Нулевая пространственная частота соответствует однородному изображению, в котором яркости всех пикселей имеют одинаковое значение.

Реальные изображения состоят из участков с разной пространственной частотой. Методы фильтрации для таких изображений направлены на такие преобразования, чтобы в результате объекты были четко различимы глазом. При этом фильтры можно разделить на следующие категории:

1. Фильтры низкой частоты – подчеркивают детали низкой частоты, чтобы сгладить шум и уменьшить ступенчатость изображения (сглаживающие, усредняющие фильтры), применяются для расфокусировки изображения и подавления шумов. Расфокусировка может быть использована как предварительный шаг обработки

изображения для удаления мелких деталей перед обнаружением больших объектов или для устранения разрывов в линиях.

2. Фильтры высокой частоты – подчеркивают детали высокой частоты, выделяют и подчеркивают линейные особенности – дороги, границы земля/вода, увеличивают детализацию без воздействия на элементы низкой частоты (фильтры резкости), выделяют области резких переходов на фоне постепенных изменений, увеличивают резкость изображений, контрастность между отдельными пикселями и фоном, но при этом также увеличивают шум.

3. Фильтры подчеркивания границ – подчеркивают границы, окружающие объекты изображения, чтобы сделать их более различимыми, например линии разломов в геологии. Результатом является изображение с серым тоном и черно-белыми линиями, окружающими границы объектов на изображении.

Один из способов улучшения качества изображения – это вычисление преобразования Фурье для перехода в частотную область, фильтрация полученного изображения и обратное преобразование. Его обычно применяют для удаления шумов, таких как полосчатость, крапины или вибрация изображения, посредством выявления периодичности их появления (областей высокой пространственной частоты).

Преобразование Фурье

Пространственное распределение яркости на снимке *f(x,y)*, фиксируемое последовательностями пикселей строк *N* и столбцов *M*, может быть представлено в частотной области преобразованием Фурье *F(u,v)* – линейной комбинацией периодических функций синусов и косинусов с некоторыми коэффициентами в комплексном пространстве (1):

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x,y) e^{-2\pi i \left(\frac{ux}{N} + \frac{vy}{M} \right)} \quad (1)$$

Обратное преобразование Фурье применяется для получения обработанного изображения и вычисляется по формуле:

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} F(u,v) e^{2\pi i \left(\frac{ux}{N} + \frac{vy}{M} \right)} \quad (2)$$

Широко распространен алгоритм Кули-Тьюки вычисления одномерного быстрого преобразования Фурье, в котором число пикселей кратно степени 2. Пусть в двумерном случае нам дан сигнал $f(x,y)$ с числом отсчетов $N \times N, N = 2^s$. Тогда стандартным способом вычисления двумерного ДПФ является последовательное применение одномерных БПФ сначала для строк сигнала, потом для столбцов [3], для вычисления которого потребуется $N^2 \log_2 N$ комплексных операций умножения и $2N^2 \log_2 N$ сложения. В [4] описан аналог алгоритма Кули-Тьюки вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье, требующий всего $3/4 N^2 \log_2 N$ комплексных операций умножения и $2N^2 \log_2 N$ сложения.

Полученные результаты

Для сравнения времени работы двух алгоритмов вычисления двумерного преобразования Фурье была написана программа на языке программирования C++. В качестве тестового сигнала использовался снимок Красноярска и его окрестностей со спутника LandSat-8 от 07.04.2016 [5] на рис. 1 слева. Исходное разрешение снимка составляет 8081×8171 пикселей, оно было преобразовано до ближайшей степени

двойки: $2^{13} = 8192$, а затем масштабировано для степеней 10–15. На правой части рис. 1 представлен результат высокочастотной фильтрации изображения. В данном случае более контрастно заметны контуры: река, границы скалистых участков.

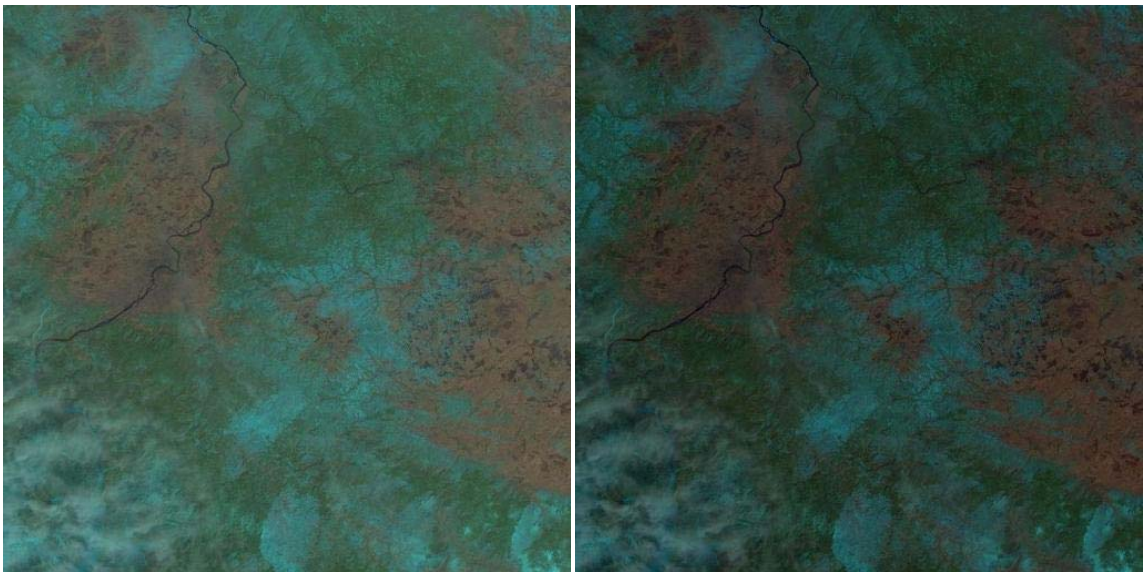


Рис. 1. Исходное изображение – результат высокочастотной фильтрации

На рис. 2 слева показано исходное изображение, справа – результат низкочастотной фильтрации. В данном случае небольшие резкие изменения гористой местности не так заметны на общем фоне, то есть убраны мелкие детали.

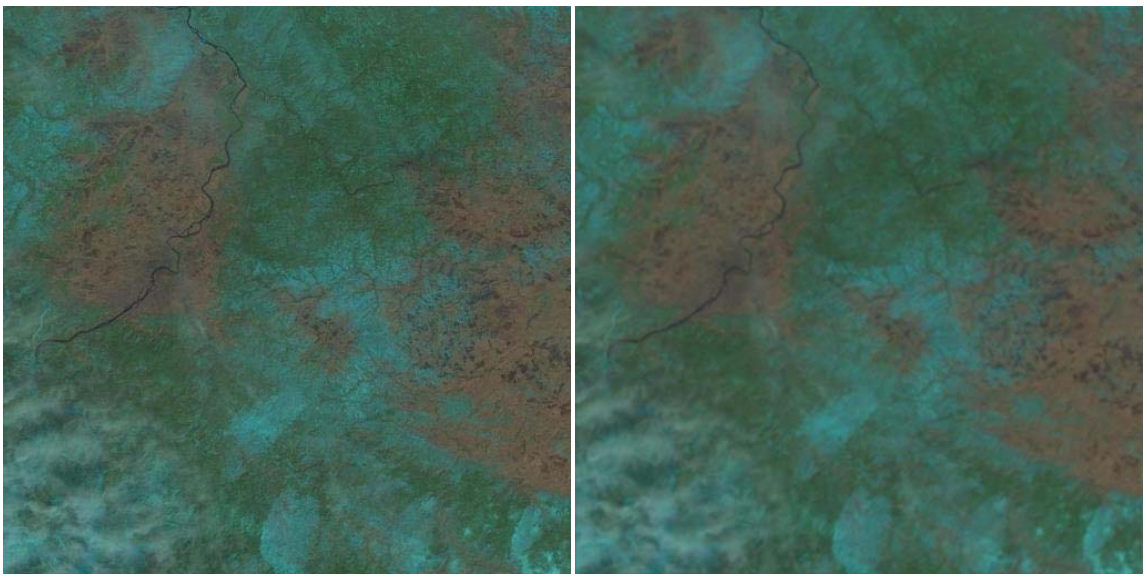


Рис. 2. Исходное изображение – результат низкочастотной фильтрации

Тестирование проводилось на одном узле кластера суперкомпьютера СФУ с IBM HS21 XM Xeon Quad core E5450 3.0 GHz, 64 Gb ОЗУ [6]. Средние результаты тестирования в секундах представлены в табл. 2. Наглядно эти результаты приведены на рис. 3.

Таблица 2

Результат тестирования на кластере

Размер снимка	2D БПФ по строкам и столбцам	2D БПФ по аналогу алгоритма Кули-Тьюки	Отношение 2D БПФ по строкам и столбцам / 2D БПФ по аналогу алгоритма Кули-Тьюки
1024×1024	0,560	0,360	~1,6
2048×2048	2,550	1,590	~1,6
4096×4096	10,470	6,900	~1,5
8192×8192	50,290	30,010	~1,7
16384×16384	242,040	129,510	~1,9
32768×32768	1243,910	564,270	~2,2

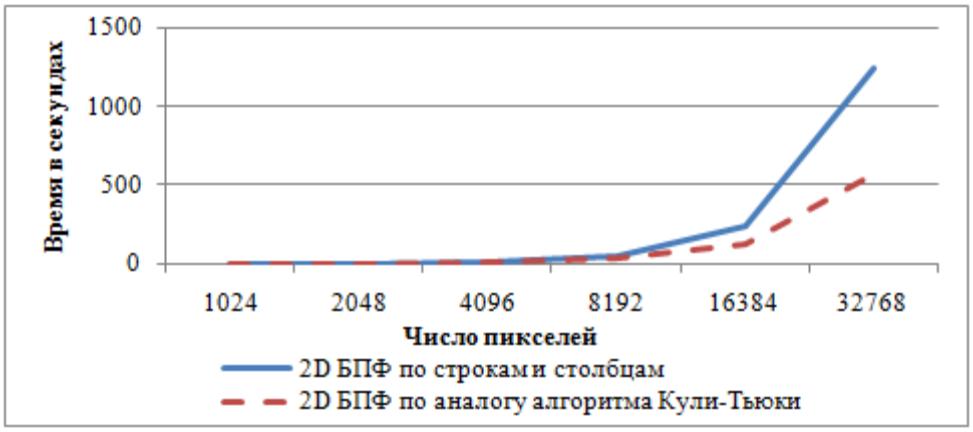


Рис. 3. Результаты тестирования на кластере

Заключение

В статье показано, что аналог алгоритма Кули-Тьюки вычисления двумерного БПФ требует меньшее количество комплексных операций умножения и выполняется в среднем в 1,7 раза быстрее стандартного способа вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье по строкам и столбцам.

Список литературы

1. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 148 с.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.

4. Tutatchikov V.S., Kiselev O.I., Noskov M.V. Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23. № 3. P. 429–433.

5. Снимок Красноярска и его окрестностей от 07.04.2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://earthexplorer.usgs.gov/.

6. Суперкомпьютерный комплекс СФУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cluster.sfu-kras.ru/.

УДК 550.383

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЯДРА ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

В. А. Кочнев
Институт вычислительного моделирования СО РАН
e-mail: kochnev@icm.krasn.ru

Источники иногда аппроксимируются магнитными диполями или токовыми петлями. В данной работе они представлены намагниченными призмами. Такая постановка справедлива в силу эквивалентности токовых и намагниченных объектов [2]. Распределение интенсивности эффективной намагниченности каждой из призм находится в результате решения обратной задачи. Исходными данными для решения обратной задачи являются Z-компоненты векторов главного магнитного поля модели IGRF-2005 в геоцентрической системе координат.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, эффективная намагниченность, обратная задача, магнитный момент, токи ядра.

Постановка задачи

Для построения модели источников в ядре приходим к обратной задаче, которая сводится к решению системы из 2450 алгебраических уравнений с 354 неизвестными. Задача решается адаптивным методом. По эффективной намагниченности, по известным формулам получено распределение токов и магнитных моментов призм двухслойного ядра.

Результаты решения обратной задачи

На рис. 1, *a*, *b* видим эффективные намагниченности моделей Северного и Южного полушария, которые меняются, соответственно, от 0 до 1580 и от –605 до 1315 А/м. Полученные модели существенно отличаются от априорных. На рис. 3, *c*, *d* видим разрез модели эффективной намагниченности ядра в двух сечениях – широтном и субдиагональном. На рис. 3, *e*, *f* – графики исходного и модельного полей, а также их разности. Как видим, исходные и модельные графики Z-компоненты поля близки. Наибольшие разности находятся в экваториальной части, но не превышают 4000 нТл. Следует обратить внимание на то, что исходные и, соответственно, модельные графики Северного полушария отличаются от графиков Южного полушария, отражая особенности распределения намагниченности в этих полушариях (рис. 3, *c*, *d*).

Магнитное поле вблизи поверхности ядра

Имея модель ЭН ядра, мы можем рассчитать МП на любой заданной поверхности и в любом сечении.

На рис. 2, *a*, *b* представлены модельные поля Z-компоненты, рассчитанные над поверхностью ядра, а за его пределами – на высоте 1 км вблизи экваториальной плоскости. Максимальные значения достигают 660 мТл (6,6 эрстед), что примерно в 10 раз превышает значения поля Земли на ее поверхности (0,64 эрстед). Отрицательные значения поля, достигающие −345 мТл, охватывают периферийные части ядра и за его пределами вблизи экваториальной поверхности. Из-за близости расчетных поверхностей отрицательные значения ΔZ Северного и Южного полушария совпадают. В восточной части полусфер положительные аномалии более обширны, чем в западной. В Южном полушарии отрицательная субширотная аномалия поля захватывает область, примыкающую к Южному полюсу. На поверхности Земли ей соответствует Южно-Атлантическая аномалия пониженных значений МП.

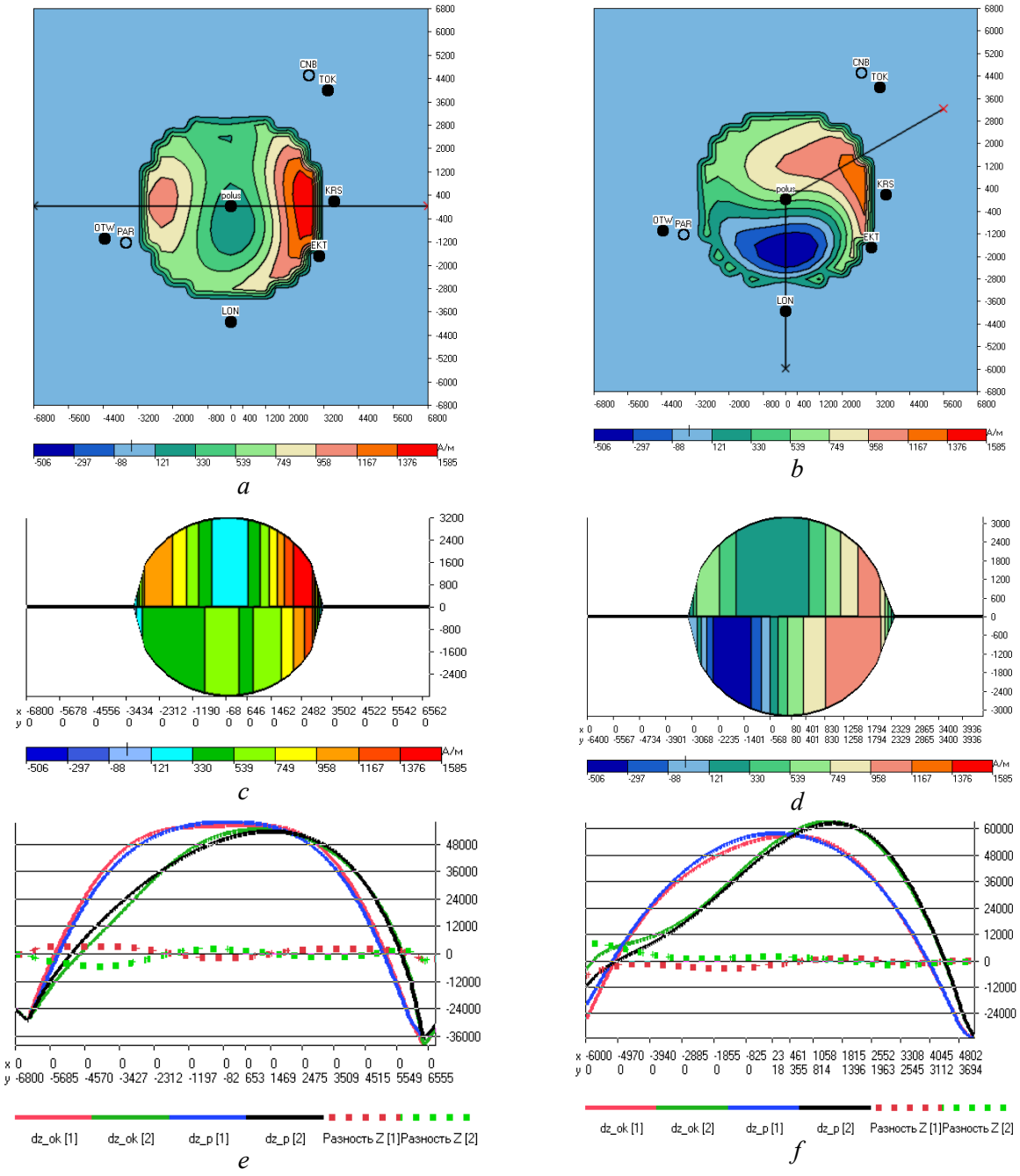


Рис. 1. Результаты решения обратной задачи: *a*, *b* – эффективные намагниченности Северного и Южного полушария; *c*, *d* – разрезы по сечениям *a* и *b*; *e*, *f* – графики Z-компоненты исходные (сплошные) и модельные (пунктирные) над Северным и Южным полушарием. Пояснения к символам кадров А и В на рис. 2

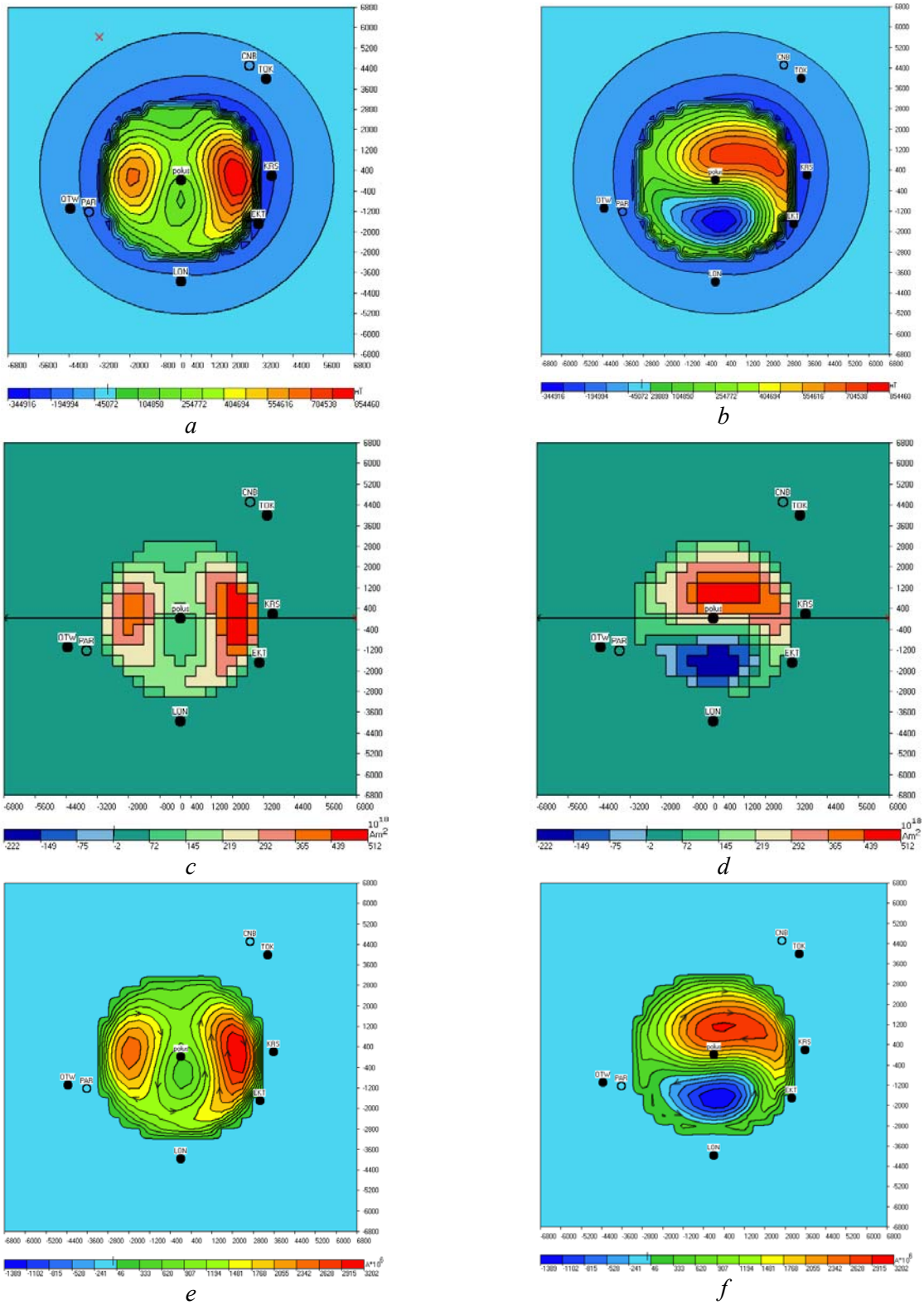


Рис. 2. *a*, *b* – Z-компоненты вектора МПЗ над Северным и Южным полушариями ядра, полученные в результате решения прямой задачи; *c*, *d* – магнитные моменты Северного и Южного полушария; *e*, *f* – объемные токи над Северным и Южным полушарием

На рисунках для ориентации показано положение географического полюса (POL) и городов мира: Токио (TOK), Красноярска (KRS), Екатеринбурга (EKT), Лондона (LON), Оттавы (OTW) в Северном полушарии и Пунта-Аренаса (PAR) и Канберры (CNB) – в Южном полушарии.

Оценка магнитных моментов и токов

Зная эффективную намагниченность i каждой призмы модели и зная их объем V, мы можем определить их магнитный момент, используя известную формулу [2, 5]

$$M = iV\,. \qquad (1)$$

На рис. 2, *c*, *d* показано распределение моментов призм на Северном и Южном полушариях. Изображение моментов приведено без аппроксимации, что позволяет увидеть горизонтальные размеры призм в масштабе модели ядра. Магнитные моменты меняются в пределах от $-222\cdot10^{18}$ до $512\cdot10^{18}$ А·м^2. Сумма положительных моментов в Северном полушарии равна $4{,}87\cdot10^{22}$ А·м^2, а в Южном $3{,}54\cdot10^{22}$ А·м^2. Суммарный $M_E = 8{,}41\cdot10^{22}$ А·м^2 увеличится в 1,029, то есть в итоге получим оценку $8{,}65\cdot10^{22}$ А·м^2, которая практически совпадает с моментом априорно однородно намагниченной модели, равным $8{,}45\cdot10^{22}$ А·м^2 и близким к приближенной оценке Кауфмана, равной 10^{23} А·м^2.

Зная магнитный момент каждого элемента модели, мы можем перейти к оценке тока, который должен течь вокруг каждого элемента (призмы), чтобы создать магнитный момент, равный известному моменту. Для этого используется известная формула $M = IS$, где S – площадь основания призмы. В итоге получим эквивалентные формулы

$$I = M / \mathrm{S} \text{ или } I = ih\,, \qquad (2)$$

где I – ток, i – эффективная намагниченность, а h – высота призмы.

На рис. 4, *e*, *f* видим картину токов Северного и Южного полушария. Обобщенная картина токов складывается из тока каждой призмы. Представим себе две соседние призмы, имеющие одинаковые токи. На их границе токи окажутся противоположны и течь не будут, и изолиния токов начнет оконтуривать оба объекта, как один. Для совокупности призм с большим магнитным моментом (рис. 4, *c*, *d*) мы видим изолинии токов, окаймляющие эти совокупности. Изолиния с максимальным током достигает величины $3{,}2\cdot10^9$ А.

Заключение

Данная работа имеет следующие особенности.

1. По глобальному МП Земли решена обратная задача для оценки интенсивности источников МП в ядре Земли.

2. Для решения обратной задачи рассчитана и использована Z-компонента глобального магнитного поля IGRF-2005 в геоцентрической системе координат.

3. Использована модель ядра Земли, включающая два слоя, соответствующие Северному и Южному полушарию ядра. Слои аппроксимируются совокупностью вертикальных призм, имеющих разную эффективную намагниченность (ЭН).

4. Для решения глобальной задачи создан и использован пакет ADM-3D-earth.

5. В процессе решения обратной задачи уточнялись ЭН всех призм ядра.

6. На основе экспериментов показано, что в данной задаче и при данной постановке, когда число уравнений значительно превышает число неизвестных (примерно в 7 раз), задача, решаемая адаптивным методом, дает результаты, практически не зависящие от начальных приближений – параметров априорной модели.

В работе получены следующие научные результаты.

1. Обоснование и постановка глобальной обратной задачи.

2. Модель эффективной намагниченности ядра.

3. Модель магнитного поля на поверхности ядра.

4. Детальная модель магнитных моментов ядра в Северном и Южном полушарии. Суммарный момент близок к оценкам, полученным ранее.

5. Рассчитана и построена модель объемных токов ядра, которые генерируют МПЗ и его основные глобальные аномалии: Канадскую, Азиатско-Сибирскую, Австралийскую и Южно-Атлантическую.

Из анализа результатов сделаны следующие предположения.

1. Током является движение положительно слабо заряженной жидкости ядра. Приведен расчет, показывающий реалистичность данного предположения.

2. Движение жидкости в экваториальной области ядра по часовой стрелке обусловлено вращением планеты (против часовой стрелки) и влиянием тормозящих гравитационных сил Луны и Солнца.

В работах [3, 4] приведены формулы расчета приливных сил и в результате установлена линейная связь приливных сил и магнитного поля на экваторе планет Солнечной системы. Коэффициент корреляции между МП планет на экваторах и максимумов приливных сил на экваторах равен 0,997, что и свидетельствует о тесной линейной взаимосвязи этих параметров и косвенно подтверждает справедливость предположений, указанных в пунктах 1 и 2.

Благодарности

Автор выражает признательность А.С. Долгалю, В.В. Денисенко, Ю.И. Блоху, рецензентам, прочитавшим рукопись статьи и сделавшим существенные замечания, которые были учтены, а также И.В. Гозу, набравшему текст статьи и внесшему большое число правок. Особая признательность Л. Табаровскому, порекомендовавшему перейти к расчету модели объемных токов, используя принцип эквивалентности, ранее упомянутый в статье. В данном варианте статьи эта рекомендация была учтена.

Список литературы

1. Алексидзе М.А. Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии. М.: Наука, 1987. 336 с.

2. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике: учебник для вузов. М.: Недра, 1985. 407 с.

3. Кочнев В.А. Адаптивные методы интерпретации сейсмических данных (монография). Н.: Наука. Сиб. отд., 1988. 152 с.

4. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная модель генерации магнитного поля Земли и планет // Междунар. конф. MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». М., 2014.

5. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

6. Tyler R.H., Maus S., Lühr H. Satellite Observations of Magnetic Fields Due to Ocean Tidal Flow // Science. 2003. № 10. С. 239–241.

7. Wicht J., Tilgner A. Theory and Modeling of Planetary Dynamos // Space Sci Rev. 2010. № 152. С. 501–542.

УДК 528.8.04, 528.88

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ВСПАШКИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Е. А. Мальцев
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: mtorrero@mail.ru

В работе представлена технология обнаружения объектов противопожарной вспашки по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли среднего и высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, противопожарная вспашка, классификация.

1. Введение

В работе [2] описана информационная модель объекта «противопожарная вспашка» с указанием его метрических, топологических и спектральных признаков, в текущей работе представлено применение данной модели в технологии обнаружения объектов противопожарной вспашки.

Технология представляет собой совокупность методов и алгоритмов, позволяющих выделять объекты противопожарной вспашки по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) среднего и высокого пространственного разрешения, а также позволяет выделить участки территорий, которые требуют контроля на наличие или отсутствие вспашки согласно [6].

2. Технология обнаружения объектов противопожарной вспашки

Технология обнаружения объектов противопожарной вспашки с линейной геометрической структурой по данным ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения основывается на обобщенных этапах обработки цифровых снимков ДЗЗ, описанных в [1, 7].

После проведенного анализа изображений, опираясь на [2], можно сказать, что спектральные характеристики целевых объектов имеют значения спектральных характеристик открытой почвы, и применение стандартного цикла дешифрирования снимков ДЗЗ приводит к существенному количеству ошибок классификации 1-го рода (ложное срабатывание). В связи с этим в предлагаемой технологии вводится этап локализации территорий, основанный на модели реляционных структур изображения.

В технологии можно выделить следующие основные этапы:

– Подбор исходных данных ДЗЗ с учетом влияния облачности, производится с использованием разработанного каталога регионального центра ДЗЗ [8].

– Предварительная обработка исходных данных ДЗЗ.

– Локализация территорий для последующей обработки.

– Классификация объектов на полученных изображениях участков территорий.

– Оценка точности классификации.

– Получение исходных данных для решения поставленной задачи, происходит в региональном центре ДЗЗ СФУ с использованием приёмного комплекса.

Далее выполняется предварительная обработка исходных данных до уровня 2А, а также:

– Геопривязка с использованием опорных точек.

– Атмосферная коррекция.

– Оценка облачности. Для оценки облачности используется разработанный алгоритм, описанный в [3].

3. Локализация территорий для последующей обработки

Локализация территорий для последующей сегментации и классификации производится с использованием заранее заданных классифицированных объектов и на основе заданных правил поиска.

Так, для сегментации противопожарной вспашки правила поиска территорий будет основываться на [6].

Локализованные территории будут представлять собой выявленные границы сельскохозяйственных полей (согласно севообороту, исключая чистые пары) и прилегающие к ним заранее классифицированные объекты: лесные массивы; автомобильные дороги; железные дороги; ЛЭП; сельскохозяйственные поля.

Реализация топологических отношений для локализации территорий, используемых в информационной модели, описанной в [2], O_1 – «не пересекаться» и O_2 – «соприкасаться», возможна с использованием алгоритмов вычислительной геометрии пересечения многоугольников, описанных в [5].

Реализация метрического отношения O_3 – «иметь расстояние между границами объектов не более L», возможна с использованием алгоритма основанного на построении эквидистанты для простого многоугольника и поиска её пересечений с другими многоугольниками с использованием суммы Минковского для многоугольника и диска заданного радиуса [9, 11, 12].

Ввиду того, что данные по лесным массивам, автомобильным дорогам, железным дорогам и ЛЭП имеют слабую динамику изменения, возможно использование заранее классифицированных данных. Классификация данных объектов производится один раз для исследуемой территории визуально-экспертным методом.

Актуализация сельскохозяйственных угодий в данной работе предлагается производить для существующей карты сельскохозяйственных полей с использованием данных ДЗЗ КА SPOT и КА Landsat и методов контролируемой классификации с обучающей выборкой с расчётом нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI – normalized differential vegetation index) и перпендикулярного вегетационного индекса (Perpendicular vegetation index), с привлечением эксперта.

Следует отметить, что полученные локализованные участки территорий возможно использовать отдельно вне технологии в виде информационной поддержки наземных исследований и контроля выполнения мероприятий пожарной безопасности.

4. Дешифрирование объектов противопожарной вспашки

Для дешифрирования объектов противопожарной вспашки вначале идет расчёт нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI) для всего снимка, используется выражение (1).

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}}, \quad (1)$$

где NDVI – нормализованный дифференциальный вегетационный индекс; NIR – значение в спектральном канале соответствующему ближнему инфракрасному диапазону с длиной волны 0,76–1 мкм; RED – значение в спектральном канале соответствующему видимой части спектра с длиной волны от 0,6–0,76 мкм (красной части спектра).

Для открытой почвы значение NDVI должно лежать в интервале: 0,025–0,1 [10, 4, 7], соответственно, выражение для этого признака будет следующее:

$$0{,}025 \le \mathrm{NDVI} \le 0{,}1. \quad (2)$$

Далее производится сегментация изображения (локализованных участков территорий) пороговым методом со значениями порогов, указанных в модели, с использованием выражения 2.

Сегменты противопожарной вспашки будут с разрывами, при этом алгоритм выделения облачности на снимке, описанный в [3], может позволить выяснить, где

разрывы получены из-за облачности, а где вспашка не детектировалась по другим факторам. Метрикой классификатора в предлагаемой технологии будет являться евклидово расстояние, исходя из [6], критерием наличия или отсутствия вспашки является ширина полученных сегментов, используется выражение, задающее ограничение толщины объекта:

$$T = 4\pi(NS/NP^2) > 4 \text{ м}, \quad (3)$$

где NS – площадь объекта; NP – периметр объекта.

5. Выводы

Разработана технология детектирования объектов противопожарной вспашки по информационной технологии, описанной в [2].

В рамках технологии разработаны вспомогательные алгоритмы и методы для детектирования целевых объектов. Проведены экспериментальные исследования технологии детектирования противопожарной вспашки на сельскохозяйственные районы Красноярского края, полученная ошибка общей классификации составила $\varepsilon_o = 15\%$.

Стоит отметить, что в локализованных участках территорий, в местах прилегания сельскохозяйственных полей к лесным массивам, вспашка практически не детектируется. Это связано как с условиями космической съемки, так и с условиями проведения работ по опахиванию сельскохозяйственных полей. Также после проведения ряда экспериментов можно сказать, что противопожарная вспашка детектируется с точностью до 85 % и выше на космических снимках с высоким пространственным разрешением (6 м и более высоким). На снимках с низким пространственным разрешением данной точности детектирования не достигается.

Список литературы

1. Денисов Д.А. Компьютерные методы анализа видеоинформации: монография. Красноярск, 1993. 192 с.

2. Мальцев Е.А., Маглинец Ю.А. Разработка информационной модели объекта «противопожарная вспашка» для автоматизированной обработки спутниковых данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 326–329.

3. Extracting a Cluster of Clouds in the SPOT 4 Satellite Images [Текст] / Е.А. Мальцев, Э.Е. Сиротин, Д.А. Перфильев, Г.М. Цибульский // Междунар. журнал "Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications". Т. 21. 2011. No. 2. С. 501–504.

4. Михайлов С. Советы из космоса // Агропрофи. № 1, февраль 2009. С. 21–23.

5. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: введение / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 478 с.

6. Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 18 июня 2003 г. № 313 ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ПРАВИЛ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (ППБ 01-03).

7. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

8. Многоцелевая региональная система дистанционного зондирования Земли Сибирского федерального университета / Г.М. Цибульский, Ю.А. Маглинец, А.А. Латынцев [и др.] // Проблемы информатизации региона. Материалы XI Всеросс. науч.-практ. конф. Красноярск, 2009. С. 22–25.

9. Алгоритмы вычислительной геометрии [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cgal.org/

10. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://gis-lab.info/qa/ndvi.html

11. Ron Wein “A CGAL Package for the Exact and Efficient Construction of Planar Minkowski Sums and Offsets using the Convolution Method” // ACS Technical Report No.: ACS-TR-243400-02.

12. Ron Wein “Exact and approximate construction of offset polygons” // Computer-Aided Design. Т. 39, изд. 6. 2007. С. 518–527.

УДК 004.932

ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА RETINEX

А. И. Пахирка, А. Г. Зотин, М. В. Дамов, А. А. Ткачева
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М. Ф. Решетнёва»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: pahirka@sibsau.ru, zotin@sibsau.ru, me@damov.pro, tkacheva.ivt@gmail.com

Рассматривается метод усиления контраста элементов изображения с расширением динамического диапазона изображения *Multi-Scale Retinex* (*MSR*). Представлен метод, предназначенный для сжатия динамического диапазона входного изображения с локальным увеличением контрастности деталей в областях с плохой освещенностью.

Ключевые слова: обработка изображений, улучшение изображений, image enhancement, Retinex, MSR.

При захвате изображений реального мира с использованием цифровых устройств они нередко отличаются от реальной картины, которую видит наблюдатель. На практике цифровое устройство захвата получает физические значения световых данных, в то время как нервная система наблюдателя обрабатывает эти данные. Например, человек четко видит детали как в хорошо освещенных областях, так и в глубоких тенях, при этом цифровое устройство захвата получит либо слишком темную сцену, либо с повышенной яркостью. Если зрительная система человека легко воспринимает широкий диапазон световых интенсивностей, то для устройства захвата или отображения отношение между минимальной и максимальной яркостью сцены превышает их возможности [1].

Человек, наблюдая сцену с широким динамическим диапазоном, адаптирует каждую ее часть локально, что позволяет ему рассматривать детали в ярко освещенных областях так же хорошо, как и в плохо освещенных. Для цифровых устройств динамический диапазон сцены требует сжатия, при котором зачастую теряются детали изображений в плохо или ярко освещенных областях. На практике для устройств захвата это решается путем комбинирования изображений, снятых с разной экспозицией (технология *HDR – high dynamic range* в фотографии), в результате которого получается единое изображение, содержащее все детали из всех исходных изображений как в тенях, так и в освещенных областях. Однако остается проблема отображения данных изображений на цифровых устройствах, обладающих существенно меньшим диапазоном яркостей [2].

В данной работе рассматривается метод улучшения изображений с расширением динамического диапазона изображения *Multi-Scale Retinex* (*MSR*) [3]. Данный метод предназначен для сжатия динамического диапазона входного изображения с локальным увеличением контрастности деталей в областях с плохой освещенностью. Многомерный *MSR* [2] представляет собой взвешенную сумму одномерных *SSR* (*Single-Scale Retinex*) для различных масштабов. Для каждого цветового канала изображения рассчитывается свое значение $R_i(x,y,\sigma)$:

$$R_i(x,y,\sigma) = \log\left(I_i(x,y)\right) - \log\left(F(x,y,\sigma) * I_i(x,y)\right), \quad (1)$$

где $I_i(x,y)$ – i-й цветовой канал пиксела по координатам x и y; σ – масштабный коэффициент; знак «$*$» обозначает свертку функций; $F(x,y,\sigma)$ – Гауссиан, определяемый как

$$F(x,y,\sigma) = Ke^{\frac{-\left(x^2+y^2\right)}{\sigma^2}}, \tag{2}$$

При этом коэффициент K выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\iint_{\Omega_{x,y}} F(x,y,\sigma)\,dx\,dy = 1, \tag{3}$$

где $\Omega_{x,y}$ – множество пикселей, принадлежащих всему изображению.

Тогда многомерная выходная функция i-го цветового канала $R_{M_i}(x,y,w,\sigma)$ определяется по формуле:

$$R_{M_i}(x,y,w,\sigma) = \sum_{n=1}^{N} w_n R_i(x,y,\sigma_n), \tag{4}$$

где $\boldsymbol{w} = (w_1,w_2,\ldots,w_m)$, $m = 1, 2, \ldots, M$ – весовой вектор одномерных выходных функций i-го цветового канала $R_i(x,y,\sigma)$; $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1,\sigma_2,\ldots,\sigma_n)$, $n = 1, 2, \ldots, N$ – вектор масштабов одномерных выходных функций. При этом $\sum_{n=1}^{N} w_n = 1$.

Размерность вектора масштабов обычно выбирается не меньше 3. При проведении экспериментов были выбраны следующие значения: 13, 87, 180.

Представленный метод *MSR* приводит к искажению цвета изображения, так как значение каждой цветовой составляющей пиксела (например, в *RGB*-пространстве) заменяется отношением ее исходного значения к среднему значению данной цветовой составляющей окружающих пикселей (выражения (5, 6)).

$$R'_{M_i}(x,y,w,\sigma,b) = R_{M_i}(x,y,w,\sigma) * I'_i(x,y,c), \tag{5}$$

где $I'_i(x,y,c)$ – нормализованная яркость. Она определяется по формуле:

$$I'_i(x,y,c) = \log\left(1 + c\frac{I_i(x,y)}{\sum_{i=1}^{3} I_i(x,y)}\right), \tag{6}$$

где c – коэффициент, выбираемый из середины диапазона значений [0…255], $c = 100 \div 125$.

Из-за характеристик логарифмической функции *MSR* делает детали изображения более различимыми в теневых областях, чем в засвеченных областях [3]. Чтобы сделать детали различимыми в засвеченных областях, можно применить логарифмическую функцию к инвертированному изображению. Предлагается использовать модифицированную логарифмическую функцию $L(I(x,y))$, зависящую от порогового значения Th, выбираемого пользователем.

$$L(I(x,y)) = \begin{cases} k_1 \cdot \log(I(x,y)), & I(x,y) < Th \\ -k_2 \cdot \log(DR - I(x,y)) + \log(DR), & I(x,y) \geq Th \end{cases}, \tag{7}$$

где

$$k_1 = \frac{\frac{Th}{DR} \cdot \log(DR)}{\log(Th)}, \quad k_2 = \frac{\left(1 - \frac{Th}{DR}\right) \cdot \log(DR)}{\log(DR - Th)},$$

где k_1 и k_2 – весовые коэффициенты; Th – пороговое значение; DR – динамический диапазон изображения, в нашем случае для изображений с восьмью битами на каждый цветовой канал DR равен 255.

Объединение ветвей логарифмической функции дает возможность повышать контрастность деталей изображения в областях высокой яркости. Применение такого вида логарифмической функции в определенной мере повышает контрастность деталей информативной области типичных распределений яркости (60–200), но в значительно меньшей мере, чем в затененных участках и участках с высокой яркостью. Пороговое значение Th было выбрано равным 200.

Выходные данные представленного метода с модифицированной логарифмической функцией находятся вне динамического диапазона изображения [3]. Чтобы привести значения к динамическому диапазону изображения [0, 255], необходимо осуществить корректировку выходного изображения на основе корректирующего коэффициента и среднего значения яркостей пикселей обработанного изображения:

$$I_{enh}(x,y) = \frac{I_m(x,y) - I_{avg}(x,y)}{w_{cor}} + C, \tag{8}$$

где $I_m(x,y)$ – яркость пиксела после обработки MSR с модифицированной логарифмической функцией, $I_{avg}(x,y)$ – среднее значение яркости пикселей обработанного изображения, w_{cor} – корректирующий коэффициент, выбирается экспериментальным путем (w_{cor} = 0,007), за константу C берется половина динамического диапазона спектра изображения (C = 127,5).

После приведения яркостей пикселей к динамическому диапазону изображения восстанавливаются цветовые компоненты каждого пиксела и производится гамма-коррекция каждого цветового канала пиксела.

Алгоритм нелинейного улучшения изображений с модифицированной логарифмической функцией можно представить в виде следующих шагов:

Шаг 1. Выбор количества уровней размытия и значений для каждого уровня (три уровня размытия с [15, 90, 180]).

Шаг 2. Вычисление значений яркости производится согласно одной из формул, применяемой для перевода цветовой модели RGB к модели YUV:

$I(x,y)$ = 0,299 × R + 0,587 × G + 0,11 × B для каждого пиксела изображения, где R, G и B – компоненты цветового пространства RGB.

Шаг 3. Применение к изображению гауссова размытия в соответствии с выбранными уровнями размытия и сохранением каждого размытого изображения.

Шаг 4. Вычисление новых значений яркости $I_{enh}(x,y)$ пикселей изображения с заменой стандартной логарифмической функции (выражение (1)) на модифицированную логарифмическую функцию (выражение (7)).

Шаг 5. Переход от логарифмического масштаба полученных значений пикселей к динамическому диапазону изображения (выражение (8)).

На рисунке показан пример работы алгоритма нелинейного улучшения изображений с увеличением контрастности элементов сцены.

Предлагаемый метод *Retinex* повышает контрастность элементов изображения наряду с выравниванием освещенности. *Retinex* расширяет динамический диапазон с использованием нескольких уровней размытия изображения и нелинейного преобразования яркости. Наиболее ресурсоемкой частью метода является организация нескольких уровней размытия исходного изображения и последующее хранение промежуточных результатов. При этом повышается визуальное качество изображения,

но требуется большое количество вычислительных ресурсов, которое напрямую зависит от разрешения изображения.



а) **б)** **в)**

Рис. Пример работы метода повышения контраста: а) входное изображение; б) выравнивание гистограммы изображения; в) изображение с применением MSR

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00121 А).

Список литературы

1. Зотин А.Г., Пахирка А.И., Буряченко В.В. Система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 191–197.

2. Petro A., Sbert C., Morel J-M. Multiscale Retinex // Image Processing On Line. 2014. P. 71–88.

3. Зотин А.Г., Пахирка А.И. Адаптивный алгоритм шумоподавления в системах видеонаблюдения при низком уровне освещения сцены // Доклады 18-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2016». 2016. Т. 2. С. 838–843.

УДК 519.24

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

О. А. Попова
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

В статье рассматривается подход к повышению точности представления и обработки данных дистанционного зондирования земли. С целью повышения надежности вычислений предлагается алгоритм построения апостериорных оценок погрешности численных процедур обработки цифровых данных в задаче интерпретации космических снимков.

Ключевые слова: численный вероятностный анализ, надежные вычисления, апостериорные оценки, правило Рунге, экстраполяция Ричардсона.

В статье рассматривается задача интерпретации космических снимков по данным дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на основе численных методов представления, моделирования и анализа информации при наблюдении за объектом исследования с учетом неопределенности. Для ее решения предлагается использовать информационный подход, основанный на том, что космический снимок есть информационная модель состояния объекта, функционирующего под воздействием разнообразных физических процессов во времени и пространстве в условиях различных неопределенных факторов. Для повышения качества анализа космических снимков, полученных в результате дистанционного наблюдения за объектом исследования, важное значение имеют численные методы представления, обработки и моделирования данных, полученных после соответствующей обработки снимков в виде цифровых дискретных наборов [1, 2].

Одной из задач, которая оказывает существенное влияние на качество анализа космических снимков, является задача оценки соответствия построенных численных моделей реальным состояниям и процессам изучаемого объекта. При этом важно помнить, что физические процессы непрерывны в пространственной, временной и спектральной области и, в соответствии с этим фактом, их следует описывать с помощью непрерывных функций. В то время как математическое описание дискретных наборов данных и, в частности, все формулы обработки изображений, как правило, имеют дискретную форму. Космический снимок можно представить, например, в виде матрицы, элементами которой являются дискретные значения пикселов. Одним из способов преобразования данных ДЗЗ является гистограмма, которая представляет собой кусочно-постоянную функцию P, определенную сеткой $\{z_i, i = 0,1,\ldots n\}$, и на отрезке $[z_{i-1}, z_i]$ принимающую постоянное значение p_i. Для построения гистограммы достаточно вычислить количество пикселов в каждом интервале значений, а затем поделить его на общее число пикселов. Поскольку гистограмма характеризует частотное распределение количества пикселов изображения в зависимости от их значений, то ее часто интерпретируют как известную в статистике функцию плотности вероятности. Заметим, что такая аналогия математически не корректна, поскольку функцию плотности вероятности можно определить только для непрерывно распределенных случайных величин. Но тем не менее для ряда задач, в том числе в задачах восстановления зависимостей по эмпирическим данным, которые возникают

при решении проблемы интерпретации космических снимков, гистограмму целесообразно рассматривать как некоторую аппроксимацию к функции плотности вероятности, по аналогии с наборами дискретных данных ДЗЗ, которые представляют данные о физических процессах, непрерывно протекающих во времени и пространстве.

Информация, которая составляет основу подобных исследований, характеризуется большим объемом данных, неоднородностью, динамичностью, уровнем и различными видами неопределенности. При работе с подобными данными процесс решения поставленной задачи представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, включающую методы предобработки, обработки и постобработки данных. Многообразие применяемых методов, использование непрерывной формы записи для дискретных функций, представление непрерывных функциональных зависимостей дискретными наборами данных и другие аспекты представления и обработки данных актуализируют проблему надежности применяемых вычислительных процедур и методов.

Надежные вычисления (reliable computing) достигаются с учетом многих факторов, прежде всего – оценками погрешности вычислительных алгоритмов и учетом неопределенностей входных данных. В связи с этим значение приобретают апостериорные оценки погрешностей результатов численного моделирования [3].

В статье рассматривается подход к повышению точности обработки данных ДЗЗ. На основе гистограммного метода рассматривается задача восстановления функциональных зависимостей по эмпирическим данным. Для оценки достоверности построенной эмпирической функции плотности вероятности в случае, когда истинная функция неизвестна, применяется процедура построения апостериорных оценок. В статье рассматриваются подходы к построению апостериорных оценок погрешности вычислений, обеспечивающие надежность численных процедур обработки цифровых данных в задаче интерпретации космических снимков. Решается задача выбора оптимального параметра гистограммной сетки. Показывается, что данный подход в сочетании с бутстрэп-методом можно использовать при оценке погрешностей, связанных с гистограммным способом представления при обработке данных и анализе изображений и снимков [1, 3].

Проблема необходимости вычисления апостериорных оценок возникла достаточно давно и связана с различными вычислительными задачами [4]. Одной из первых вычислительных задач, где использовались апостериорные оценки погрешности, были задачи вычисления интегралов с помощью квадратурных формул. Позднее при решении различных типов дифференциальных уравнений стали использоваться подходы, позволяющие оценивать точность полученных численных решений.

В работе рассматриваются апостериорные оценки погрешности гистограмм, построенных по некоторой повторной выборке размерности N. Погрешность построенной гистограммы будем оценивать в норме l_2 по отношению к гистограмме, построенной по точной функции плотности вероятности [1]. Численный вероятностный анализ (ЧВА) с успехом работает в задачах численного моделирования в условиях элиторной и эпистимической неопределенности. В тех случаях, когда известны плотности вероятности случайных величин ЧВА использует такие понятия, как вероятностные расширения. В случае эпистемической неопределенности для численного моделирования в рамках ЧВА используются гистограммы второго порядка и гистограммные функции распределения [4]. Численный вероятностный анализ нашел применение в задачах представления и обработки данных космического и наземного мониторинга, представления и прогнозирования временных рядов, агрегации больших

данных, регрессионного моделирования, а также различных задачах случайного программирования [2]. Важное значение для практики имеет применение ЧВА-методов для задач оценки надежности технических систем в условиях неполной и недостаточной информации.

Пусть известны $\Xi^l = \{\xi_1^l, \xi_2^l, ..., \xi_N^l\}$ $l = 1, 2...$ – повторные выборки случайной величины X с функцией плотности вероятности $p(x)$, $[a,b]$ – носитель. Построим на $[a,b]$ сетку $\omega = \{a = x_0 < x_1 < ... < x_n = b\}$ и определим число элементов m_k^l выборки Ξ^l, попавших в интервал $(x_{k-1}, x_k], k = 1, 2, ..., n$.

Заметим, что

$$z_k^l = \frac{m_k^l}{N} \to p_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} p(x)dx. \quad (7)$$

Таким образом, получим значения

$$\frac{z_k^l}{x_k - x_{k-1}}, k = 1, 2, ..., n,$$

которые определяют на сетке ω гистограммы H^l, аппроксимирующие плотность вероятности $p(x)$. Тогда $z_k^l, l = 1, 2$ можно интерпретировать как повторную выборку случайной величины z_k с математическим ожиданием, в силу (3) равным p_k и дисперсией σ_k.

Правило *апостериорной оценки погрешности* для гистограмм можно сформулировать следующим образом.

Пусть известна повторная выборка $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, ..., \xi_{2N}\}$. На сетке $\omega = \{a = x_0 < x_1 < ... < x_n = b\}$ построим гистограмму H. Оценкой погрешности построенной гистограммы можно считать норму l_2

$$s = \| p - z \|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (p_k - z_k)^2}.$$

Разобьем выборку Ξ на две равные по мощности выборки Ξ^1, Ξ^2 и построим гистограммы H^1, H^2. Вычислим оценку

$$s_1 = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (z_k^1 - z_k^2)^2},$$

при этом $s \approx s_1/2$.

Рассмотрим оценку математического ожидания в случае равномерных сеток с шагом h

$$\mathrm{M} \| \hat{f}^h - f \|_2^2 \approx \frac{1}{2Nh} - \frac{\| f \|_2^2}{N} + \frac{\| f'' \|_2^2 h^4}{576}.$$

Таким образом, знание нормы l_2 второй производной функции плотности вероятности $\| f'' \|_2^2$ позволяет находить оптимальные значения h для восстановления ФПВ как методом гистограмм, так и методом ядерных оценок [3].

Для поднятия точности оценки ФПВ $f(\eta)$ применим экстраполяцию Ричардсона к f_η^h и f_η^{2h}. Для этого умножим f_η^{2h} на 1/4 и вычтем из f_η^h. Получаем

$$f(\eta) = \frac{4}{3} f_\eta^h - \frac{1}{3} f_\eta^{2h} + O(h^4).$$

Применим к f_η^h и f_η^{2h} правило Рунге [4] и оценим $f''(\eta)$.

$$f''(\eta) \approx \frac{8(f_\eta^{2h} - f_\eta^h)}{h^2}.$$

Вычислив $\| f'' \|_2^2$, можно оценить оптимальное значение h

$$\frac{1}{2Nh} - \frac{\| f \|_2^2}{N} + \frac{\| f'' \|_2^2 h^4}{576} \to \min$$

или получить оценку математического ожидания ошибки приближения $\mathrm{M} \| \hat{f}^h - f \|_2^2$.

С другой стороны, экстраполяция Ричардсона позволяет вычислить аппроксимацию ФПВ повышенной точности на достаточно плотном множестве точек. Далее полученные значения можно преобразовать, используя подходящий алгоритм сглаживания.

Список литературы

1. Добронец Б.С., Попова О.А. Гистограммный подход к представлению и обработке данных космического и наземного мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 6 (155). С. 14–22.

2. Попова О.А. Численный вероятностный анализ для агрегации, регрессионного моделирования и анализа данных // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 15–21.

3. Попова О.А. Информационный подход к апостериорным оценкам погрешности численного моделирования // Информатизация и связь. 2016. № 2. С. 29–32.

4. Добронец Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 167 с.

УДК 004.932.2

СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЛАСТЕЙ ЗАДЫМЛЕНИЯ ПРИ РАННЕМ ОБНАРУЖЕНИИ ДЫМА НА ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

А. В. Пятаева
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М. Ф. Решетнёва»
Институт информации и телекоммуникаций
e-mail: anna4u@list.ru

Основными признаками визуального обнаружения дыма являются наличие движения, специфические цвет и форма объектов на видеоизображении. В работе предложен комбинированный метод детектирования дыма на открытых пространствах по видеопоследовательностям, позволяющий сочетать в себе различные признаки.

Ключевые слова: сопоставление блоков, сегментация, детектирование дыма, видеопоследовательность.

Введение

С развитием технологий компьютерного зрения и анализа изображений важным методом раннего детектирования пожара стало обнаружение дыма на видеоизображениях. По сравнению с традиционными способами детектирования дыма, основанными на тепловых детекторах или химическом анализе продуктов сгорания, мониторинг пожара в бесконтактном режиме позволяет детектировать дым на значительном расстоянии, независимо от источника дыма (лесной, техногенный пожар), в различных средах, в том числе на открытых пространствах.

К основным признакам визуального обнаружения дыма можно отнести: цвет, форму, движение, текстуру, прозрачность [1]. Как правило, для детектирования дыма не используют только один признак, а применяют сочетание нескольких классификаторов.

Существующие алгоритмы обнаружения дыма, который обычно предшествует видимому пламени, классифицируются следующим образом:

– обнаружение дыма на основе гистограмм, когда используются статистические характеристики для оценки вероятности наличия дыма [2];

– временной анализ областей задымления, в которых задается последовательность кадров, далее применяются алгоритмы слежения, модели глобального движения [3], вейвлет-преобразования [4] и другие для нахождения временных характеристик;

– детектирование дыма с применением эвристических правил, например, по хроматической компоненте и диффузному распространению дыма [5];

– гибридный подход, основанный на пространственно-временном анализе, объединяющем преимущества различных алгоритмов. Так, например, в работе [6] предложен гибридный метод, сочетающий цветовой и контурный анализ, эффекты мерцания и анализ движения.

Комбинированный метод выделения дыма на видеоизображении

Задача детектирования дыма требует минимизации ошибки первого рода, т. е. пропуска цели. Предлагаемая методика включает два этапа:

1. Обнаружение локальных регионов-кандидатов, похожих на дым, на основе нахождения движения в сцене и анализе хроматических/яркостных компонент с последующей кластеризацией в глобальные регионы-кандидаты.

2. Верификация глобальных регионов-кандидатов с помощью методов текстурного анализа, с последующей окончательной классификацией регионов-кандидатов на два класса: «дым» и «не дым».

Выделение фрагментов, похожих на дым, происходит, в свою очередь, в два этапа: предварительная сегментация и верификация динамических свойств дыма. Предварительная сегментация осуществляется методом сопоставления блоков. Для определения межкадровой разницы методом сопоставления блоков текущий кадр делится на непересекающиеся квадратные блоки. Для каждого блока текущего кадра выполняется поиск похожего блока в следующем кадре. В качестве критерия, оценивающего степень соответствия между блоком текущего кадра и блоком предыдущего кадра, используется сумма абсолютных разностей яркостей пикселов (Sum of Absolute Differences, SAD), суммирование производится по всем точкам прямоугольного блока (заданного размера):

$$SAD = \sum_{t \in Pix} \left| I_i(t) - I_{i-1}(t) \right|,$$

где Pix – количество пикселов блока, $I_i(t)$ и $I_{i-1}(t)$ – яркости пиксела в текущем и предыдущем кадрах в точке $t(x,y)$.

Среди сумм абсолютных разностей, SAD, вычисленных в заданном радиусе окрестности поиска движения, выбирается тот блок, разница SAD для которого минимальна. Размер блока зависит от исходного размера изображения и удаленности от объекта съемки. Кроме того, при медленном дыме и значительном удалении допустим расчет суммы абсолютных разностей с пропуском одного или двух кадров относительно текущего. Далее для областей изображения, в которых выделено движение, применяются маски: цветовая и турбулентности.

Цветовая модель дыма

Области цвета дыма могут быть определены путем установки пороговых значений в цветовом пространстве RGB [7] или в цветовом пространстве YUV [8]. Для всех движущихся блоков вычисляется соотношение:

$$\begin{cases} |R - G| < T \\ |G - B| < T \\ |R - B| < T \end{cases},$$

где T – порог, настраиваемый эмпирически. Например, для дыма лесного пожара характерно значение порога T = 10, техногенный дым, как правило, имеет значение порога T = 25.

Турбулентность

Характерной чертой областей дыма является наличие завихрений, для мгновенной оценки завихрений может служить функция турбулентности [9]. Мерой мгновенной оценки завихрений может служить функция турбулентности:

$$\Omega(t) = \frac{P(t)}{2\sqrt{\pi A(t)}},$$

где $P(t)$ – периметр области дыма, $A(t)$ – ее площадь. Таким образом, чем больше значение отношения периметра к площади, тем выше турбулентность исследуемой области, тем более такая область похожа на дым.

Экспериментальные исследования

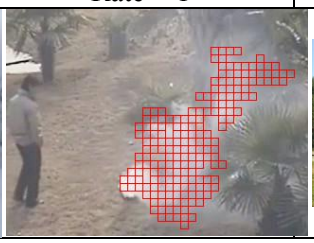
По результатам тестирования нескольких видеопоследовательностей эмпирически были установлены значения параметров работы комбинированного алгоритма выделения регионов-кандидатов, похожих на дым: размер блока, цветовые особенности дыма на видеоизображении и частота вычисления разницы кадров. Экспериментальные исследования проводились с различными параметрами: размер блока в алгоритме

сопоставления блоков (Blk) – исследован размер в 8, 15 и 30 пикселей; значения порога *T* в цветовой модели дыма 10, 15, 20 и 25 и вычисление разницы в соседних кадрах (Rate), через 1 и через 2 кадра.

Использовано 40 видеопоследовательностей, 20 из которых содержали разного рода дым, а 20 не содержали дыма. На тестовых видеопоследовательностях присутствуют прозрачный и/или густой дым, движущиеся люди, движущийся транспорт, сложный динамический фон. Тестовые видеопоследовательности взяты из базы данных Билькентского университета [10], базы данных DynTex [11], из базы данных F.Juan [12], данные из базы данных компании "Wildfilmsindia"[13], из базы данных V-MOTE [14], видеопоследовательности, загруженные с YouTube. В таблице приведены результаты работы алгоритма и исходные кадры некоторых использованных видеопоследовательностей.

Таблица

Кадры некоторых исследуемых видеопоследовательностей (Blk (пиксели) – размер блока, T – порог цветовой модели дыма, Rate (кадр) – частота учета кадров для вычисления)

Видеопоследовательность			
YouTube.com/Самолет, кадр 24, разрешение 380×286	F.Juan/cotton-rope, кадр 294, разрешение 320×240	V-MOTE/DV_004, кадр 4650, разрешение 1049×576	youtube.com/Truck Fire, кадр 281, разрешение 480×360
			
Результаты детектирования, парамерты алгоритма			
Blk = 15, T = 15, Rate = 2	Blk = 8, T = 10, Rate = 1	Blk = 30, T = 15, Rate = 2	Blk = 30, T = 20, Rate = 1
			

Результаты тестирования на 14 видеопоследовательностях, содержащих разного рода дым, дали 100 % правильный результат. При этом в трех из этих видеопоследовательностях ложных тревог не было совсем, в одной видеопоследовательности, содержащей прозрачный сигаретный дым, ложное срабатывание произошло в 17 кадрах из 170. В среднем по этим видеопоследовательностям ошибка второго рода не превысила значение 8,37 %. Остальные шесть видеопоследовательностей с дымом дали результат точности сегментации от 0,72778 до 0,999 в зависимости от удаленности объекта съемки и особенностей дыма. Эксперименты, проведенные с видеопоследовательностью Bilkent/ISYAM, в которой представлен прозрачный дым, занимающий не более 5 % кадра, наблюдаемый, кроме того, не на всем протяжении ролика, показали самую низкую среднюю точность сегментации – 72,7 %. При этом при использовании параметров алгоритма Blk = 8, T = 25, Rate = 3 для этой видеопоследовательности,

точность сегментации возрастает до 0,96875. Среднее значение точности работы комбинированного метода сегментации дыма по видеоизображениям на дымных видеопоследовательностях составляет 0,971.

Среднее значение ошибки второго рода по дымным и недымным видеопоследовательностям составило 0,0687572. Такие значения ложной тревоги говорят о том, что потенциальные источники ложных срабатываний, такие как движение листьев деревьев из-за ветра, перемещение людей, пересекающих сцену, движение автомобилей и движение облаков, в основном фильтруются.

Заключение

Представленный в работе комбинированный метод детектирования дыма по видеоизображениям показывает высокую эффективность как на видеопоследовательностях с дымом, так и без него. Эксперимент показывает, что требуется подстройка параметров алгоритма, таких как цветовой порог дымных объектов, размер блока и количество обрабатываемых кадров под конкретные условия съемки.

Список литературы

1. Wei Ye, Jianhui Zhao, Song Wang, Dengui Zhang, Zhiyong Yuan. Dynamic texture based smoke detection using Surfacelet transform and HMT model // Fire Safety Journal. 2015. V. 73. P. 91–101.
2. Tan K.S., Isa N.A.M. Color image segmentation using histogram thresholding-fuzzy c-means hybrid approach // Pattern Recognition. 2011. V. 44, No. 1. P. 1–15.
3. Yuan F. A fast accumulative motion orientation model based on integral image for video smoke detection // Pattern Recognition Letters. 2008. V. 29, No. 1. P. 925–932.
4. Jayavardhana G., Slaven M., Marimunthu P. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines // Fire Safety Journal. 2009. V. 44, No. 8. P. 1110–1115.
5. Yu C., Fang J., Wang J., Wang Y. Video Fire Smoke detection using motion and color features // Fire Technology. 2010. V. 46, No. 3. P. 651–663.
6. Toreyin B.U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // Pattern Recognition Letters. 2006. V. 27, No. 1. P. 49–58.
7. Buchsbaum G. A spatial processor model for object color perception // J.Franklin Inst. 1980. V. 310. Iss. 1. P. 1–26.
8. Hakan Habiboglu Y., Gunay Osman, Cetin Enis. Real-time wildfire detection using correlation descriptors // 19th European Signal Conference (EUSIPCO 2011). 2011. P. 894–898.
9. Catrakis Haris J., Dimotakis Paul E. Shape Complexity in Turbulence // Physical review letters. 1998. V. 80. No. 5. P. 968–971.
10. Database of Bilkent University [Электронный ресурс]. URL: http://signal.ee.bilkent.edu.tr/ VisiFire/Demo/
11. Renaud P., Fazekas S., Huiskes M.J. DynTex: A comprehensive database of dynamic textures // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31, No. 12. P. 1627–1632.
12. F.Juan database [Электронный ресурс]. URL: http://staff.ustc.edu.cn/~yfn/vsd.html
13. Database of Wildfilmsindia [Электронный ресурс]. URL: www wildfilmsindia com
14. Database of V-MOTE [Электронный ресурс]. URL: http://www2.imse-cnm.csic.es/vmote/english_version/index.php

УДК 004.627

АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И УЧЕТОМ МЕЖДИАПАЗОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ С ПОТЕРЯМИ И БЕЗ ПОТЕРЬ

А. Ж. Саринова
НИ «Томский государственный университет»
e-mail: asiya.sarinova@yandex.ru

В данной статье исследованы, модифицированы и разработаны новые алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учетом междиапазонной корреляции с потерями и без потерь. Результаты исследования показывают превосходство перед универсальными и специализированными алгоритмами сжатия.

Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритмы сжатия, вейвлет-преобразование, кодирование.

Введение

Современные спутниковые центры космического мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют оперативно принимать, регистрировать, обрабатывать, архивировать и распространять большие объемы данных, составляющие порой сотни гигабайт. Передаваемые данные накапливаются на наземных станциях, занимая при этом огромное дисковое пространство, требующее, в свою очередь, затраты на их хранение. В последнее время большинство исследователей при решении задач ДЗЗ особое внимание уделяют гиперспектральным АИ.

Гиперспектральные АИ, характеризующиеся различным числом каналов, спектральным диапазоном и радиометрическим разрешением, передаются с космических аппаратов на наземные станции, требующие архивирования в подсистемах хранения данных ДЗЗ ограниченной емкости по каналам связи ограниченной пропускной способности [1–2]. В связи с этим одной из важных задач является архивирование гиперспектральных АИ. В основе таких систем архивирования лежат различного рода форматы, методы и алгоритмы сжатия.

Представим наиболее известные системы сжатия гиперспектральных АИ. В настоящее время существует программное обеспечение, предназначенное для сжатия гиперспектральных АИ. К ним относятся *ERDAS Imagine*, *ERDASER Mapper*, *ArcView GIS*, *GeoExpress*, которое все чаще наделяют специализированными модулями для сжатия АИ [3–4]. Вышеперечисленные программные системы всё чаще включают в себя алгоритмы и методы сжатия гиперспектральных АИ на основе известных стандартов и форматов.

По результатам анализа имеющихся специализированных систем для сжатия гиперспектральных АИ показано, что многие системы используют небольшой спектр форматов сжатия с потерями и без потерь *JPEG* 2000, *MrSID* и *ECV*. Помимо специализированных систем для сжатия исследованы частные реализации, которые ведутся по обработке гиперспектральных АИ.

В данных работах проводились исследования проблем и перспектив сжатия гиперспектральных данных с потерями и без потерь. Большинство подходов основано на вейвлетах с потерями и без потерь. Среди разработок сжатием без потерь занимается меньшее число исследователей [5–8].

Решение задачи сжатия гиперспектральных АИ

На основе вышеизложенных подходов к алгоритмам и методам сжатия гиперспектральных АИ можно сделать вывод, что наиболее широко использованными способами решения задачи сжатия могут являться:

– учет спектральной корреляции, что дает определенные преимущества на основе рассчитанной корелляционной матрицы;

– адаптивное вейвлет-преобразование;

– метрики для оценки критериев качества восстановленных изображений PSNR, MSE, PMSE и др.

Результаты исследования

Проведены экспериментальные исследования подготовительной обработки данных для сжатия гиперспектральных АИ на основе разработанных алгоритмов по характеристикам степени сжатия без потерь и с потерями.

I. Подготовительная обработка для сжатия гиперспектральных АИ без потерь. Рассмотрим подготовительную обработку адаптированного алгоритма данных перед сжатием гиперспектральных АИ без потерь с учетом междиапазонной корреляции. Алгоритм предлагается реализовать в три этапа:

1. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения вейвлет-коэффициентов, на примере одномерного вейвлета Хаара и учет междиапазонной корреляции между каналами изображений путем её подсчета (формирования массивов отклонений (разностей) исходных данных от значений найденной функциональной зависимости).

2. Адаптированная обработка преобразованных массивов данных гиперспектральных АИ. Предварительная подготовка перед сжатием разработанного адаптированного алгоритма для сжатия гиперспектральных АИ, позволяющая уменьшить диапазон возможных значений

3. Сжатие одним из энтропийных алгоритмов.

II. Подготовительная обработка для сжатия гиперспектральных АИ с потерями. Рассмотрим подготовительную обработку, основанную на вейвлет-преобразованиях с учетом междиапазонной корреляции перед сжатием гиперспектральных АИ без потерь.

Возможные следующие этапы подготовительных обработок гиперспектральных АИ на основе предлагаемых этапов:

1. Учет междиапазонной корреляции между каналами АИ.

2. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения вейвлет-коэффициентов, на примере одномерного и двумерного вейвлета Хаара [9].

3. Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения вейвлет-коэффициентов, на примере одномерного вейвлета Добеши [10].

4. Преобразование на основе этапов 1–3 путем заданного шага квантования вейвлет-коэффициентов.

5. Использование стандартных метрик для оценки критериев качества восстановленных изображений PSNR, MSE, PMSE и др.

6. Сжатие одним из стандратных энтропийных алгоритмов.

Один из способов получения двумерного вейвлет-преобразования изображения заключается в том, чтобы сначала применить одномерное вейвлет-преобразование к каждой из строк каналов гиперспектральных АИ, а затем применить одномерное вейвлет-преобразование к каждому из столбцов. Способ заключается в том, чтобы сначала преобразовывались строки изображения, а затем преобразовывать столбцы

изображения с преобразованными строками. В результате получается новая матрица, первые два столбца которой содержат значения коэффициентов аппроксимации каждой строки, а последующие два столбца – значения коэффициентов различия. Аналогично предыдущему одномерному вейвлету Хаара, возможно отсечь ВЧ-коэффициенты и тем самым уменьшить изображение в четыре раза.

Одномерное преобразование Добеши в применении к гиперспектральным аэрокосмическим изображениям. Методы вейвлет-кодирования изображений Добеши сочетают в себе использование вейвлетов Хаара. Отличие его от вейвлета Хаара в том, что значения ВЧ и НЧ вейвлет-коэффициентов рассчитываются на основе каждых последующих четырех значений яркости оригинальных изображений, при этом в каждую четверку значений входят предыдущие два значения. Данный способ уступает в сравнении с вейвлетом Хаара, так как вейвлет Хаара рассчитывает коэффициенты на основе двух значений.

Экспериментальные исследования

Для определения эффективности предлагаемого алгоритма с точки зрения степени сжатия, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов на гиперспектральных АИ. Выполнено сравнение предложенного алгоритма с результатами экспериментов, полученных для универсальных алгоритмов сжатия архиваторов и компрессора *Lossles JPEG 2000*, широко применяемого в коммерческих системах обработки данных ДЗЗ. Эксперименты степени сжатия в сравнении с известными архиваторами и JPEG 2000 представлены на графике по степени сжатия без потерь (рис. 1).

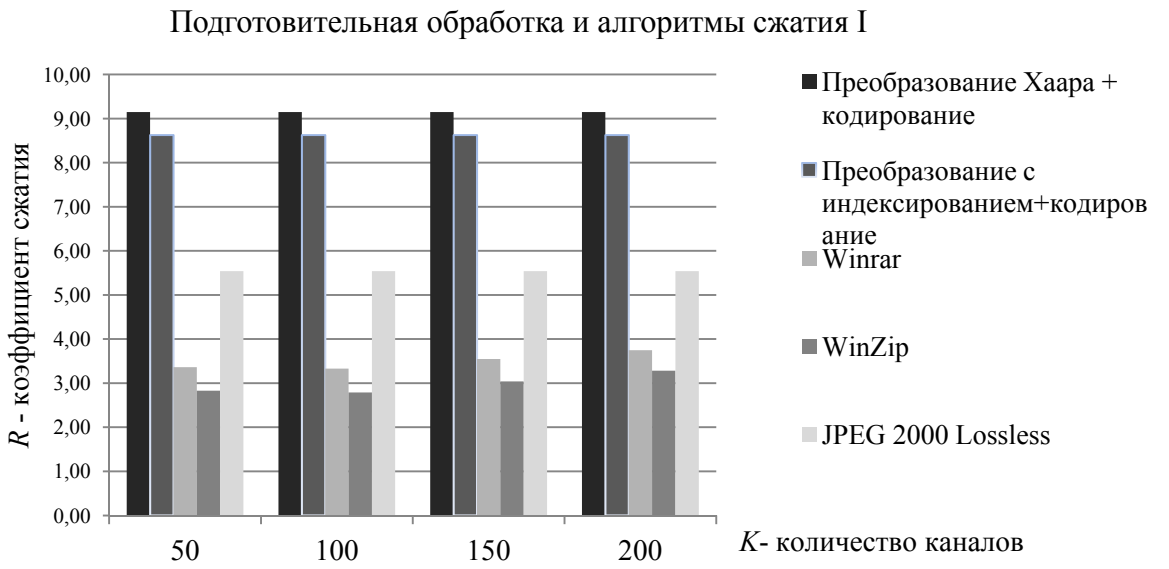


Рис. 1. Сравнение алгоритмов сжатия без потерь по степени сжатия

Как видно из рис. 1, показатели степени алгоритма сжатия I превосходят в степени сжатия архиваторы *WinRar, WinZip* и *Losless JPEG* более чем на 80 %.

Показатели степеней сжатия двумерного и одномерного вейвлета преобразования Хаара, Добеши и JPEG 2000 Lossy представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, показатели степеней сжатия преобразование одномерного и двумерного вейвлета Хаара с потерями превосходят в степени сжатия вейвлет Добеши и компрессора *Lossless JPEG 2000.*

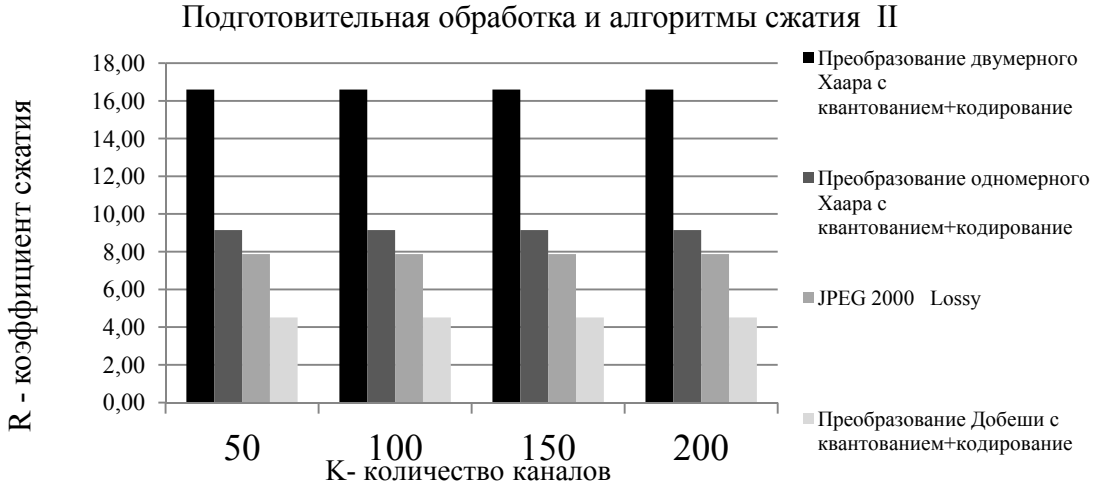


Рис. 2. Показатели степеней сжатия алгоритмов с потерями

Заключение

На основе проведенных исследований следует сделать следующие выводы:

– подготовительная обработка без потерь с учетом междиапазонной корреляции и предложенного алгоритма позволяет повысить степень сжатия до (R = 9);

– предлагаемый подход с потерями определяется в адаптивных преобразованиях, основанных на вейвлет-преобразованиях Хаара и Добеши путём применения заданного шага квантования и последующего арифметического кодирования (R = 16);

– полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ с JPEG 2000 *Lossless* с помощью полученных вейвлет-коэффициентов позволяют предположить эффективность применения подготовительных этапов.

Перспективами дальнейших исследований могут быть кодирование преобразованных гиперспектральных АИ адаптивным алгоритмом SPIHT, SPECK и адаптивным арифметическим кодированием.

Список литературы

1. URL: http: //www.www.hyspex.no/hyperspectral_imaging/
2. URL: http: //www.aviris.jpl.nasa.gov/aviris/data_facility.html
3. URL: http: //www.gisa.ru/1489.html
4. URL: http: //www.wikipedia.org/wiki/MrSID
5. Mohand O., Akrour L. and etc. Aviris Hyperspectral Images Compression Using 3d Spiht Algorithm // Journal of Engineering (IOSRJEN) e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719. 2012. Vol. 2, Issue 10. P. 31–36.
6. Cheng-chen L. and Yin-Tsung H. Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Adaptive Prediction and Backward Search Schemes // Journal of information science and engineering. 2011. No. 27. P. 419–435.
7. Sindhuja N.M., Arumugam A. SPIHT based compression of hyper spectral images // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013. Vol. 2, Issue 10. P. 4933–4938.
8. Yuan L, Jianping L and Ke G. Lossless compression of hyperspectral images using hybrid context prediction // OPTICS EXPRESS. 2012. Vol. 20, No. 7. P. 8199–8206.
9. Richard W., Hamming N. Haar Wavelets // CRC Press LLC. 1999. 28 p.
10. Daubechies, I. Lectures on Wavelets // SIAM. 1992. 343 p.

АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ С ЛЕСНЫМ ПОЛОГОМ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ

А. В. Сорокин[(1)], С. В. Фомин[(2)], М. И. Михайлов[(3)]
[(1)]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва»
e-mail: sorav@iph.krasn.ru
[(2)]Институт физики им. акад. Л. В. Киренского СО РАН
e-mail: rds@ksc.krasn.ru
[(3)]Красноярский научный центр СО РАН
e-mail: Fractaloff@mail.ru

Представлены описание адаптивной модели лесного полога и эффекты влияния анизотропии древесины на амплитудные и поляризационные характеристики сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS в процессе их распространения в слоях крон и стволов.

Ключевые слова: анизотропия древесины, лесной полог, сигналы навигационных спутников, амплитудные и поляризационные характеристики.

ADAPTIVE INTERACTION MODEL OF NAVIGATION SATELLITE SIGNALS WITH THE FOREST CANOPY TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPIC PROPERTIES OF WOOD

A. V. Sorokin[(1)], S. V. Fomin[(2)], M. I. Mikhailov[(3)]
[(1)]FGBOU «Reshetnev Siberian State Aerospace University»
e-mail: sorav@iph.krasn.ru
[(2)]L. V. Kirensky Institute of physics
e-mail: rds@ksc.krasn.ru
[(3)]Krasnoyarsk scientific center
e-mail: Fractaloff@mail.ru

Введение

Разнообразные приложения координатных измерений с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) используются эффективно и широко. Методы пассивного мониторинга земных покровов с применением сигналов ГЛОНАСС и GPS разрабатываются более 20 лет. Состоялось и развивается новое направление – ГНСС дистанционное зондирование (англоязычная вариант – GNSS Remote Sensing) [1]. Однако в приложении к лесным покровам методики получения лесотаксационных и физических характеристик лесного полога с применением сигналов ГНСС до сих пор находятся в стадии исследований и разработок [1–3]. В данной работе представлены описание адаптивной модели лесного полога и эффекты влияния анизотропии древесины на сигналы навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS в лесу.

Особенности распространения сигналов ГНСС в лесном пологе

Лес в ряду растительных сообществ является наиболее сложным геометрическим объектом. Лесной полог представляет собой неоднородную слоистую среду, включающую слои крон и стволов. Характерные средние диаметры стволов зрелого леса d в сравнении с размерами ветвей, хвои, листвы a различаются на 1–2 порядка: $a << d$. Отношение объемов древесины в стволах и кронах составляет несколько единиц. Длины волн излучения группировок ГЛОНАСС и GPS близки к среднему диаметру стволов деревьев.

Древесина является неоднородным анизотропным материалом, что существенным образом влияет на состояние поляризации распространяющихся радиоволн в лесном пологе и селективное ослабление вертикально и горизонтально поляризованных компонент.

Дистанционный метод восстановления влажности лесного полога с использованием сигналов ГНСС является перспективным для непрерывного локального мониторинга состояния лесных массивов.

В слое крон ввиду $a/\lambda << 1$ ослабление сигналов ГНСС в большей степени связано с поглощением в древесине. Мелкомасштабные элементы крон исключают рассеяние сигнала, что позволяет слой крон считать более однородным в сравнении со слоем стволов. В ствольной части древостоя, наряду с поглощением, вклад в ослабление сигналов вносит дифракция, множественное рассеяние на стволах деревьев.

Интегральными характеристиками лесного полога могут служить эффективные действительная и комплексная части диэлектрической проницаемости, отнесенные к слою крон и стволов.

Анизотропия древесины и диэлектрической проницаемости лесного полога

Древесина является многокомпонентным анизотропным материалом, состоящим из древесинного вещества, воздуха и воды. Вода в древесине присутствует в виде адсорбционно-связанной, капиллярно-конденсационной и свободной влаги [5]. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε' и коэффициента потерь ε'' различаются по трем направлениям: продольному, вдоль ствола дерева L, и поперечному, радиальному R и тангенциальному T. В прикладных расчетах с использованием значений $\boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathbf{C}}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}''_{\mathbf{C}}$ для поперечного направления (индекс C) используют средние величины радиальных и тангенциальных диэлектрических параметров. Отношения величин $\varepsilon'(R)/\varepsilon'(T)$ и $\varepsilon''(R)/\varepsilon''(T)$ для хвойных пород в диапазоне частот 1–10 ГГц близки к единице[6].

В работе [4] обоснована возможность использования рефракционной модели, позволяющей определить эффективную диэлектрическую проницаемость лесного полога как смешанного диэлектрика, состоящего из воздуха, слоя стволов и крон.

Анизотропный слой стволов, как набор вертикальных цилиндров древесинного вещества, будет иметь различающиеся величины $\boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathbf{L}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}''_{\mathbf{L}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathbf{C}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}''_{\mathbf{C}}$. Слой крон имеет хаотично ориентированные элементы ветвей хвои и листьев, статистически изотропен и характеризуется величинами $\boldsymbol{\varepsilon}'$ и $\boldsymbol{\varepsilon}''$.

Выражение для относительной диэлектрической проницаемости ε' слоев крон и стволов определяется формулой

$$(\varepsilon_n^m) = \sum V_i (\varepsilon_n^m), \qquad (1)$$

где $V_i = V_1, V_2, V_3$ – объемное содержание древесины крон, стволов и воздуха;

$\boldsymbol{\varepsilon}_n^m = \boldsymbol{\varepsilon}'_C, \boldsymbol{\varepsilon}''_C, \boldsymbol{\varepsilon}'_L, \boldsymbol{\varepsilon}''_L, \boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathrm{B}}, \boldsymbol{\varepsilon}''_{\mathrm{B}}$ – параметры комплексной диэлектрической проницаемости древесины и воздуха. В приближении хаотической ориентации элементов ветвей слой кроны оказывается изотропным со средними значениями $\boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathrm{K}} = 0{,}5(\varepsilon'_C + \varepsilon'_L)$. Влажный воздух как изотропная среда в широком диапазоне частот имеет величины $\boldsymbol{\varepsilon}'_{\mathrm{B}}$ не выше 1,001 и $\boldsymbol{\varepsilon}''$, близкую к нулю.

Расчет диэлектрической проницаемости лесного полога

Диэлектрическая проницаемость лесного полога определена для модели, адаптированной к лиственничным посадкам 45-летнего возраста, вблизи стационара «Погорельский бор» Института леса СО РАН. На опытной площадке площадью 300 м^2

были измерены диаметры 96 и высоты 27 деревьев. Геометрические параметры модели выбраны следующие: полная высота лесного полога 15 м, слоя стволов 10 м, диаметр крон 3 м, плотность древостоя 0,32 шт/м^2.

Объемные плотности древесины в слое крон и стволов определялись на основе измерений геометрических параметров древостоя. В расчетах использованы значения плотности древесины лиственницы 0,63 г/см^3 с влажностью W =4 0 %. Значения диэлектрических характеристик древесины для частотного диапазона L_1 получены методом экстраполяции на основе данных для температуры 20 ^{0}C, представленных в монографии [5]. Доли воздуха и древесины для стволов и крон составляют 0,998 и 0,002, 0,9985 и 0,0015 соответственно. В таблице приведены результаты расчета диэлектрических характеристик модели лесного полога с различной влажностью W.

Таблица

Лес		Древесина				Слой стволов				Слой крон	
ε_n^m		ε'_C	ε''_C	ε'_L	ε''_L	ε'_C	ε''_C	ε'_L	ε''_L	ε'	ε''
W, %	0	2,1	0,06	2,4	0,1	1,0031	0,0001	1,0037	0,0002	1,0025	0,00015
	40	10.6	2,23	20,6	5,15	1,019	0,004	1,038	0,001	1,022	0,006
	80	21	4,2	35,8	8,95	1,039	0,008	1,067	0,017	1,042	0,01

Заключение

Разработана диэлектрическая модель лесного полога, адаптируемая к виду древостоя и учитывающая анизотропию древесины. Выявлены отличия эффективных диэлектрических констант слоев крон и стволов. Установлена существенная зависимость анизотропии эффективной диэлектрической проницаемости слоя стволов от влажности древесины. Выявлены эффекты влияния анизотропии лесного полога на состояние поляризации и селективного по поляризации ослабления сигналов ГНСС при распространении в лесном пологе.

Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing - Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London. 2014. 286 p.

2. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В.Б. Кашкин, В.И. Кокорин, В.Л. Миронов, С.В. Сизасов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 7. С. 825–830.

3. 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.] // Вестник СибГАУ. 2013. Т. 51. № 5. С. 123–126.

4. Новик С.Н. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с лесным пологом: дисс. … канд. физ.-мат. наук. ТГУ, 2007.

5. Torgovnikov G.I. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials. Springer-Verlag. 1993. 194 p.

УДК 528.8.04, 528.88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНДИКАТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Г. Тепаносян, А. Сагателян, Ш. Асмарян, В. Мурадян
Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА
e-mail: garik.tepanosyan@cens.am

DERIVATION OF AGRICULTURAL LAND DEGRADATION INDICATORS USING LINEAR SPECTRAL UNMIXING METHOD

G. Tepanosyan, A. Sagatelyan, Sh. Asmaryan, V. Muradyan

Целью данной работы является оценка точности ЛСР применительно к космическому снимку QuickBird для получения индикаторов деградации пастбищных земель (ППР, ППОП, ППК) на примере сельской общины Неркин Сасунашен, Армения. В результате сопоставления полученных данных с полевыми определены следующие результаты: R^2 = 0,625 для ППР, R^2 = 0,708 для ППОП и R^2 = 0,015 для ППК. Следовательно, используя метод ЛСР, можно с достаточной точностью определить ППР И ППОП.

Ключевые слова: деградация пастбищных земель, дистанционное зондирование, линейное спектральное разделение, QuickBird.

Введение

В Армении деградация почв, обусловленная бессистемным и черезмерным выпасом скота, очень распространена [1], особенно на пастбищах, расположенных вблизи деревень, тогда как удаленные пастбища используются ограниченно [11].

Оценка деградации почв важна для определения возможных последствий и потенциальных мер управления. Существуют многочисленные индикаторы оценки деградации сельскохозяхственных земель [2]. Важными индикаторами, которые можно получить методами дистанционного зондирования (ДЗ), являются проективные покрытия рестительности, оголенных почв и камней (ППР, ППОП, ППК) [6, 7, 9]. Для получения этих индикаторов широко используется метод линейного спектрального разделения (ЛСР) [6, 10, 12, 13]. В методе ЛСР предполагается, что спектральная характеристика каждого пикселя является линейной комбинацей эндмемберов (endmember) [5, 14] – чистых компонентов земной поверхности, которые предположительно имеют уникальные спектральные характеристики [5].

Целью данного исследования является оценка точности метода ЛСР для получения компонентов земной поверхности, связанных с деградацией (ППР, ППОП, ППК) с использованием космического снимка QuickBird.

Район исследования

Объектами исследования являются пастбища, расположенные вблизи сельской общины Неркин Сасунашен ($40^0$59′E, $40^0$21′N) (Армения): Сари чаир, Мелко ахбюр (А), Булумбуз (Б), Чораноци арот 1 и Чораноци арот 2 (Г) (в целом ≈416 га) (рис. 1). Район характеризуется сильной каменистостью почв [4]. Норма осадков в период июль–август составляет 50–150 мм, средняя температура воздуха в июле варьирует в пределах от +10 до +20 ^{0}C. Район исследования 5–6 месяцев в году покрыт устойчивым снежным покровом [3].

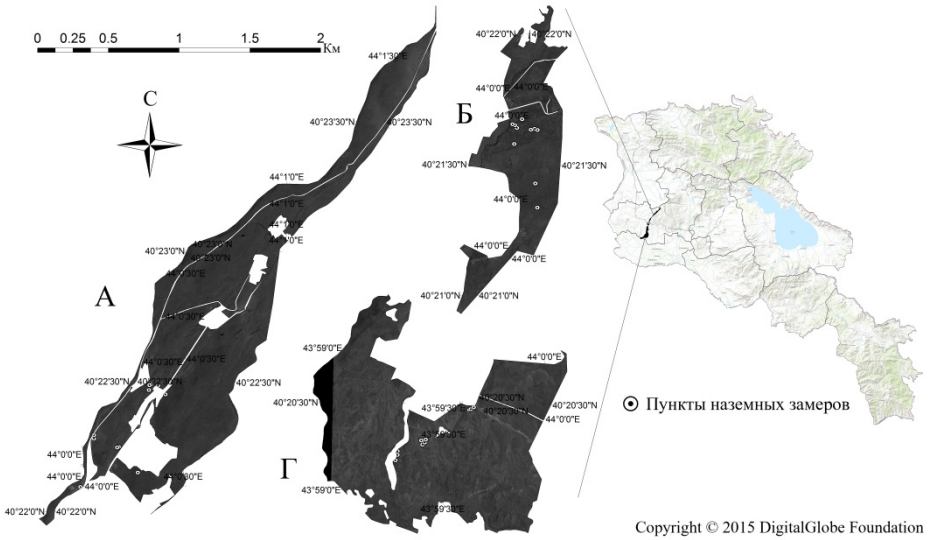


Рис. 1. Район исследования

Методы

Математически модель ЛСР выражается следующим образом [6, 13]:

$$R_k = \sum_{i=1}^{M} f_i r_{i,k} + e_k, \quad \sum_{i=1}^{M} f_i = 1, \quad 0 \le f_i \le 1, \tag{1}$$

где R_k – коэффициент отражения для каждого спектрального диапазона (k); M – количество эндмемберов; f_i – доля эндмембера i в спектральном диапазоне k; e_k – остаточный член (residual term) в спектральном диапазоне k.

В методе ЛСР существуют два ограничения. Первое – сумма эндмемберов должна равняться 1, и второе – значения эндмемберов должны находиться в области 0–1 [13]. Выбор эндмемберов был сделан непосредственно из космического снимка методом Боардмана [6] в программной среде ENVI. Спектральные значения выбранных эндмемберов – растительность, обнаженная почва и камень – иллюстрированы на рис. 3.

Результаты и обсуждение

Карты ППР, ППОП, ППК и СКО (среднеквадратичное отклонение), полученные из космического снимка QuickBird методами ЛСР, изображены на рис. 2. Пиксели со светлой окраской соответствуют высоким значениям эндмемберов, а пиксели с темной окраской – низким значениям.

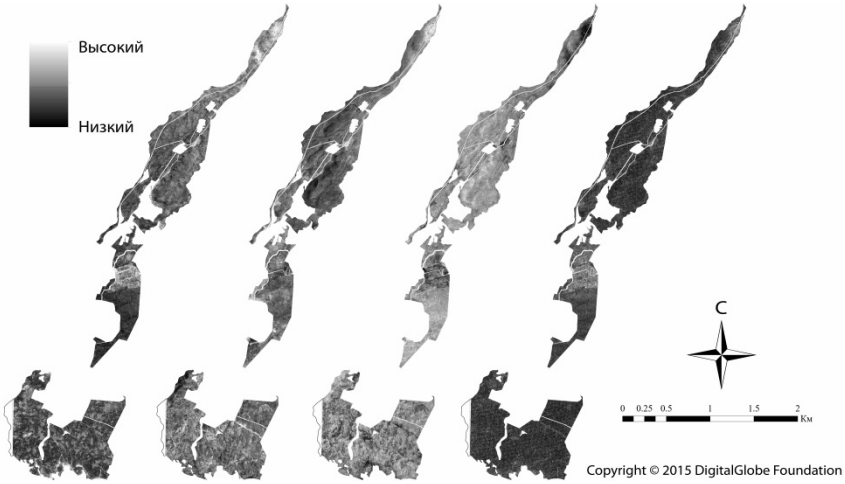


Рис. 2. Справа налево ППР, ППОП, ППК и СКО, полученные методом ЛСР

Из полученных низких значений СКО для участков А, Б и Г (соответственно 0,00015, 0,0008 и 0,0005) следует, что отобраны правильные эндмемберы. Однако низкие значения СКО еще не являются гарантией точности полученных данных. Для определения точности полученные данные необходимо сопоставить с результатами наземных замеров [6]. На рис. 3 изображены графики линейной регрессии между ППР, ППОП, ППК, полученными методом ДЗ, и наземными данными, полученными в ходе полевых работ.

Результаты показывают существенную корреляцию с коэффициентами детерминации (R^2) 0,625 для ППР и 0,708 для ППОП (уровень значимости: $p \leq 0,01$). По сравнению с другими исследованиями [8, 12, 13, 14], полученная более слабая корреляция между ППР и наземными данными может быть обусловлена временной разницей между спутниковой съемкой и полевыми работами. Для ППОП, в сравнении с другими работами [6, 12], были получены достаточно хорошие результаты.

Низкое значение R^2 для ППК (0,015) означает, что полученные данные не отражают реальные значения ППК в природе. Это может быть обусловлено низким спектральным разрешением снимка QuickBird, в частности, отсутствием коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона, который очень важен для идентификации камней [12].

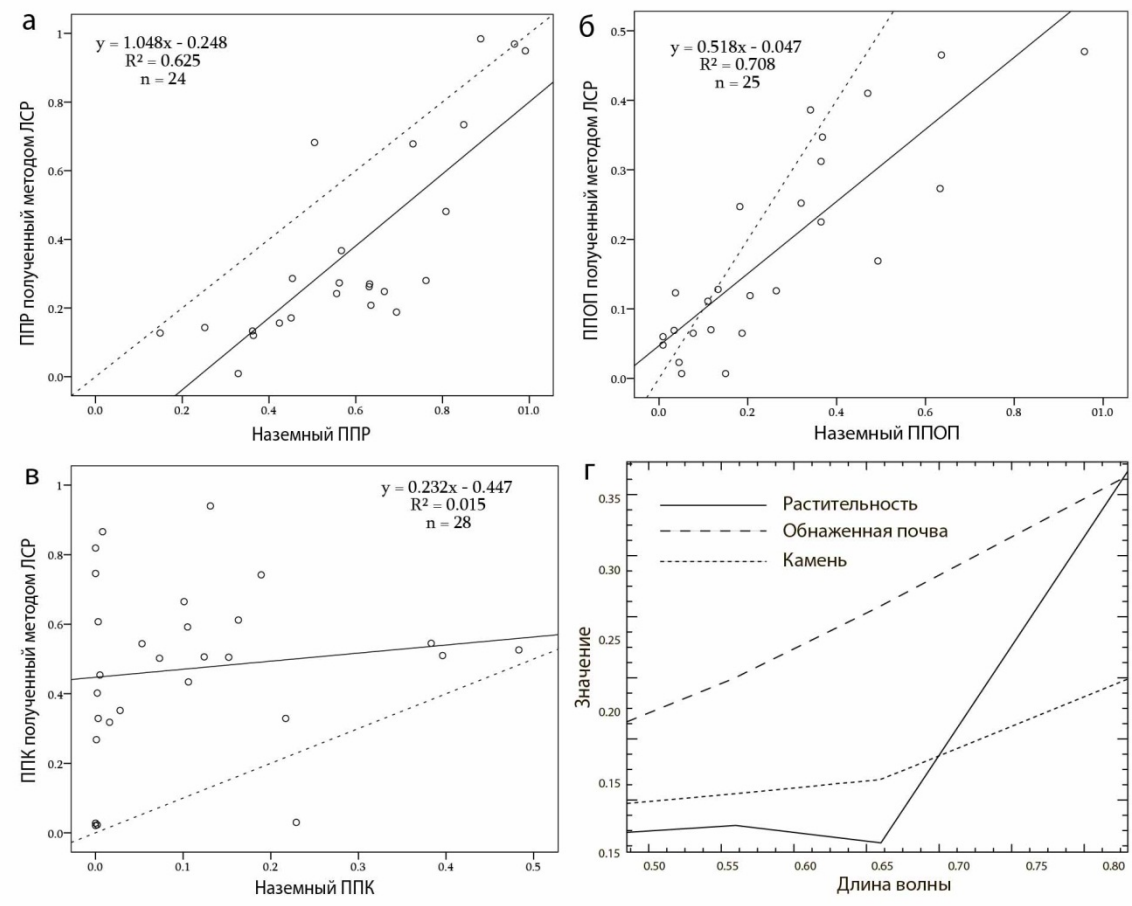


Рис. 3. Графики линейной регрессии между (а) ППР, (б) ППОП, (в) ППК, полученные методом ЛСР и наземными данными, (г) средние значения эндмемберов

Заключение

Метод ЛСР, применительно к космическим снимкам QuickBird, предоставляет возможность для более точной оценки условий земной поверхности, связанных с

деградацией почв. Это исследование показало, что при помощи ЛСР можно получить значения ППР и ППОП с достаточной точностью, чтобы использовать их для оценки и картографирования деградации земель. Тем не менее QuickBird из-за низкого спектрального разрешения не является оптимальным сенсором для получения ППК.

Список литературы

1. Алексанян К., Мурадян В. Геоэкологические последствия деградации почв РА // Материалы науч. конф. «Географическая наука в Армении: настоящее». Ереван, 2006. С. 385–392.
2. Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель. Препринт. Упр. Охраны почв и земельных ресурсов Минприроды России и Упр. мониторинга земель и охраны почв Роскомзема. М., 1994. 13 с.
3. Национальный атлас Армении. Том А. Центр геодезии и картографирования ГНКО, Ереван, 2007. 229 с.
4. Погосян Д.А. Сельскохозяйственная оценка природных ресурсов территории Армянской ССР. Ереван, 1986. 221 с.
5. De Asis A.M., Omasa K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 62, 2007. P. 309–324.
6. De Asis A.M., Omasa K., Oki K., Shimizu Y. Accuracy and applicability of linear spectral unmixing in delineating potential erosion areas in tropical watersheds // International Journal of Remote Sensing, 29 (14), 2008. P. 4151–4171.
7. Descroix L., Viramontes D., Vauclin M., Barrios J.L.G., Esteves M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). Catena, 43, 2001. P. 115–135.
8. Elmore A.J., Mustard J.F., Manning S. J., Lobell D.B. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. Remote Sensing of Environment, 73 (1), 2000. P. 87–102.
9. Kairis O., Kosmas C., Karavitis Ch., Ritsema C. et al. Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management. Environmental Management, 54 (5), 2013. P. 971–982.
10. Lehnert L.W., Meyer H., Meyer N., Reudenbach Ch., Bendix J. A hyperspectral indicator system for rangeland degradation on the Tibetan Plateau: A case study towards spaceborne monitoring. Ecological Indicators, 39, 2014. P. 54–64.
11. Mapping and Assessing the Community Grasslands and Developing a Grazing Scheme, 2011. Report on a project CARMAC CS – 11/103. Yerevan, Armenia. Available from:
12. Meusburger K., Banninger D., Alewell C. Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12, 2010. P. 201–207.
13. Xiao J., 13-Haro F.J. Accuracy assessment of fraction of vegetation cover and leaf area index estimates from pragmatic methods in a cropland area // International Journal of Remote Sensing, 30 (10), 2009. P. 2685-2704.
14. Zhang X., Liao Ch., Li J., Sun Q. Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21, 2013. P. 506–512.

СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Ю. О. Усатая, Е. И. Пономарев, Е. Г. Швецов
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
Лаборатория мониторинга леса
e-mail: Julia_Usat@mail.ru
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники

SATELLITE DATA APPLIED TO THE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF VEGETATION FIRES

Ключевые слова: данные спутников TERRA/MODIS, критерий детектирования, пожарный пиксель, полигон пожара, дистанционные методы, радиометр, термически активная зона, детектирование, радиационная температура, классификация изображений, лесной пожар, спектральные характеристики, интегральная мощность теплоизлучения от пожара FRP.

На территории Сибири ежегодно фиксируются лесные пожары (ЛП) на площадях до 17 млн га [1]. Прогнозируется дальнейшее возрастание частоты возникновения и интенсивности пожаров, в том числе в зоне бореальных лесов Сибири [2, 3]. В связи с этим актуальна разработка новых методов детектирования пожаров и прогнозирования уровня воздействия на леса. В частности, детектирование верховых пожаров и пожаров экстремальной интенсивности позволит прогнозировать уровень послепожарных изменений.

В связи с большим охватом территории, оперативный мониторинг ЛП в современных условиях может быть проведен только с использованием спутниковых систем. Сегодня официально до 51 % лесов отнесено под спутниковые методы мониторинга. Данная работа выполнена с использованием банка данных лесных пожаров Сибири за период 1996–2015 гг. Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.

Основная цель работы – разработка технологии детектирования экстремальных и верховых пожаров дистанционными методами и адаптация имеющихся подходов для условий Сибири.

Исходная информация включала динамику 20 пожаров, для которых была восстановлена динамика мощности теплоизлучения активных зон на основе более ста наблюдений для каждого случая пожара. Выборка пожаров охватывала период 2012–2015 гг., были представлены данные для различных лесорастительных районов Сибири.

На основе спутниковой съемки TERRA/Modis в среднем инфракрасном ($\lambda \sim 4$ мкм) диапазоне для активной зоны пожара вычислялся показатель мощности теплоизлучения. В зарубежных публикациях такая характеристика известна как Fire Radiative Power (FRP) [4]. Мощность тепловыделения, связанная с количеством сгорающей растительной биомассы, может рассматриваться как критерий при оценках уровня воздействия огня на древостои. Особенно эффективно такой показатель применим в случаях пожаров с экстремальной мощностью теплоизлучения, включая верховые.

Классификация отдельных участков пожаров по мощности позволяет в перспективе перейти к решению обратной задачи оценки количества сгорающих горючих материалов и уровня воздействия огня на древостои. Такая информация позволит повысить точность оценок пожарных эмиссий, воздействия огня на древостои на локальном и на глобальном уровне.

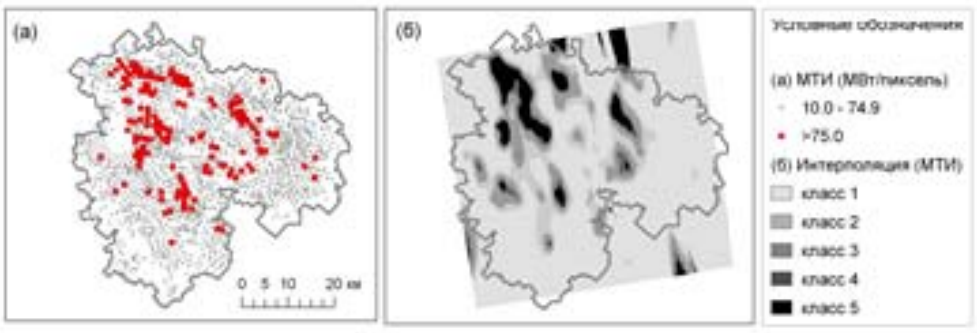


Рис. 1. Пример обработки данных о динамике мощности тепловыделения на различных стадиях развития пожара: (а) исходный набор попиксельных измерений, красным выделены точки с экстремальными значениями МТИ; (б) результат интерполяции по уровню МТИ

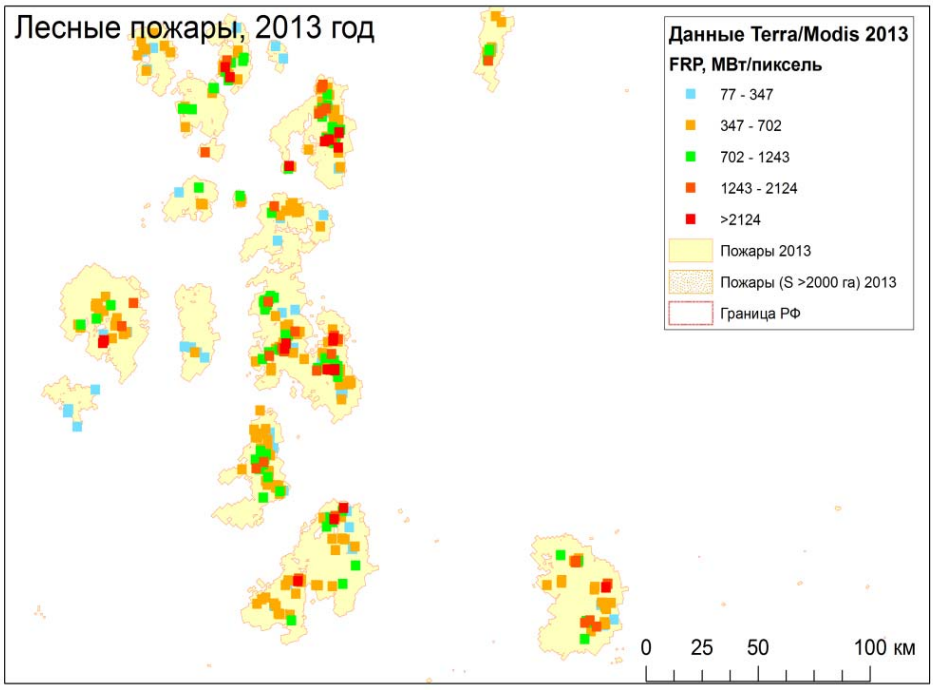


Рис. 2. Классификация пожаров в диапазонах FRP, 2011–2015 гг.

Результаты

Впервые для пожаров на территории Сибири адаптирована технология оценки мощности теплоизлучения от активной зоны пожара на основе спутниковых съемок TERRA/MODIS. Для получения количественных оценок были использованы: метод Кауфмана, где оценивалась мощность теплоизлучения (FRP). Метод дистанционной оценки мощности теплоизлучения (МТИ) от активной зоны пожаров в условиях горения в лесах Сибири, где в каждой группе рассчитывались среднее значение радиационной мощности и стандартное отклонение. Соотношения В.Г. Нестерова, усовершенствованного в ЛенНИИЛХ, где рассчитывался показатель влагосодержания (ПВ-1). Работа выполнялась с применением следующих программ: ArcGis – ArcMap (версия 9.3), Microsoft Excel.

Установлено, что доля пожаров с экстремальными характеристиками тепловыделения составляет 8,0±2,18 % от общего числа. Не менее 5 % от среднегодовой площади лесных пожаров составляют участки, пройденные высокоэнергетическими и/или верховыми пожарами.

На основе метеорологических данных установили динамику показателя пожароопасности ПВ-1 в районе действия лесного пожара.

Установлен уровень зависимости мощности теплоизлучения от пожара от внешних факторов (уровень пожарной опасности по условиям погоды, преобладающий древостой). В первом приближении эта связь описывается экспоненциальной функцией с достоверностью аппроксимации на уровне 0,94.

Дано количественное описание различий мощности теплоизлучения от активной зоны пожара в лесах Сибири с преобладанием сосновых и лиственничных насаждений.

Список литературы

1. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. 5. С. 50–61.

2. de Groot W.J., Cantin A.S., Flannigan M.D., Soja A.J., Gowman L.M., Newbery A. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes // For. Ecol. and Manag., 2013. 294. P. 23–34. DOI:10.1016/j.foreco.2012.07.033.

3. Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmullius C. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia // Environ. Res. Lett. 2012. 7, 044021: 9. DOI:10.1088/1748-9326/7/4/044021.

4. Kaufman Y., Remer L., Ottmar R., Ward D., Rong-R L., Kleidman R., Fraser R., Flynn L., McDougal D., Shelton G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment // In J. Levine (Ed.), Global biomass burning. MA: MIT Press. 1996. P. 685–696.

5. Швецов Е.Г., Пономарев Е.И. Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сибирский экологический журнал. 2015. № 3. С. 413–421. DOI: 10.15372/SEJ20150308

6. Пономарев Е.И., Иванов В.А., Швецов Е.Г. Детектирование верховых лесных пожаров по данным съемки Terra/Modis // Лесное хозяйство. 2014. № 2. С. 32–33.

7. Пономарев Е.И. Классификация пожаров в Сибири по мощности излучения на основе показателя FRP по данным TERRA/Modis // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 3. С.56–64. DOI: 10.7868/S0205961414020080.

УДК 528.88, 004.93'14

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ В МАССИВЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ТОЧЕК

В. Ю. Шабанов[(1)], Е. А. Мамаш[(2)], В. А. Кихтенко[(2)], Д. Л. Чубаров[(2)]
[(1)]Новосибирский государственный университет
e-mail: vladimir.shabanov1995@gmail.com
[(2)]Институт вычислительных технологий СО РАН
e-mail:elenamamash@gmail.com
e-mail: kikht@ict.nsc.ru
e-mail: dchubarov@ict.nsc.ru

Основным источником данных при исследовании глобальной динамики природных пожаров являются массивы точек аномалий радиационной температуры, детектируемых по данным дистанционного зондирования, – термических точек. В настоящей работе предложен подход для распознавания термических точек, относящихся к промышленным объектам на основе кластерного анализа.

Ключевые слова: кластерный анализ, термические точки, MODIS, MOD14.

Исходные данные и методы исследования

В качестве исходных данных для исследования используются данные, полученные со спутников Terra и Aqua, пролетающих 4 раза в день вокруг земного шара и ведущих съемку в 36 спектральных каналах, включающих как видимые, так и инфракрасные области спектра. Рассматриваемые данные собраны за последние 15 лет функционирования спутников и содержат в себе записи о зафиксированных термических точках [2–4].

Распределение термических точек имеет ряд характерных особенностей [5]. Так, точки, относящиеся к одному промышленному объекту, как правило, лежат очень плотно и фиксируются с определенной периодичностью.

Учитывая эти особенности, задача выделения термических точек, имеющих промышленную природу, рассматривается как задача кластеризации и искомый кластеризатор должен отвечать следующим требованиям:

1) строить произвольное количество кластеров, так как заранее неизвестно, сколько кластеров требуется выделить;

2) быть устойчивым к шуму, потому как большинство термоточек относятся к природным пожарам и только малая часть из всех точек попадет в кластеры, которые будут представлять промышленные объекты;

3) обладать как можно более низкой алгоритмической сложностью, поскольку объемы входных данных для алгоритма велики.

При подборе кластеризатора были рассмотрены несколько алгоритмов: K-Means, EM-алгоритм, Forel и его вариации, а также DBSCAN. Только алгоритм DBSCAN [6] удовлетворяет поставленным условиям. Он имеет два входных параметра: Eps и MinPts, где Eps – это радиус окружности, в пределах которой ищутся «соседи», а MinPts – это минимальное количество соседей для точки, достаточное, чтобы включить ее в кластер. Эти параметры выбираются с учетом особенностей входных данных.

Входные данные представлены таблицей в формате CSV размером в 700 Мб и насчитывающей более 4 млн термоточек. Алгоритм DBSCAN был реализован с помощью языка C#. В качестве метрики используется евклидово расстояние в плоскости широта-долгота, а вектор признаков состоит только из пространственных

координат. Для кластеризации использовался не весь массив данных, а только его часть, поскольку объем данных велик и время обработки квадратично зависит от количества кластеризуемых точек. В частности, для повышения доли исследуемых промышленных объектов в общем объёме данных использовались только термоточки, зафиксированные осенью и весной.

Оценка ошибок первого и второго рода происходила с помощью программы QGIS 2.12 и спутниковых карт Google. Поскольку спутниковые изображения позволяют определить, соответствует ли сформированный таксон какому-либо промышленному предприятию или нет, имеется возможность фиксировать ошибки первого и второго рода.

Оптимизация алгоритма DBSCAN – двухэтапный DBSCAN

Для каждой точки алгоритм DBSCAN определяет, имеет ли она достаточное количество соседей в пределах радиуса Eps для образования кластера. В нашем случае количество точек, которые попадут в кластеры, много меньше, чем количество точек, которые не попадут ни в один из кластеров. Это обстоятельство позволяет оптимизировать алгоритм DBSCAN следующим образом.

Пусть имеется некоторая выборка, которую необходимо кластеризовать с заданными значениями параметров MinPts0 и Eps0.

Этап первый

Выборка делится на N непересекающихся множеств, мощности которых приблизительно равны. Это делается выделением из выборки случайных точек, чтобы обеспечить равномерное распределение точек в подвыборке по пространству и по времени, насколько это возможно. Для каждого из этих множеств запускается кластеризация алгоритмом DBSCAN с параметрами MinPts1 и Eps1:

$$\text{MinPts1} = \text{MinPts0} \qquad \text{Eps1} = \text{Eps0} * \sqrt{N} + C,$$

где C > 0 – некоторая константа.

Плотность точек на плоскости в N-ой части исходной выборки снижается примерно в $\sqrt{N}$ раз. Поэтому, чтобы найти в подвыборке minPts соседей, нужно увеличить значение eps в $\sqrt{N}$ раз. После кластеризации каждой подвыборки на выходе имеется множество точек, попавших в кластеры.

Этап второй

Все точки, попавшие в кластеры на первом этапе, объединяются в одно множество. При кластеризации всей выборки кластеры наращиваются только из тех точек, которые попали в это множество. Это позволит сильно сузить диапазон просматриваемых кандидатов на наращивание кластера. В остальном кластеризация проходит так же, как и в обычном случае, с исходными параметрами MinPts0 и Eps0.

Результаты

Для изучения качества распознавания был взят фрагмент поверхности Земли, соответствующий территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Для этого данные были отфильтрованы сначала по географическим координатам, после этого – по месяцам, в результате чего остались только осенне-весенние горячие точки. После этого, для достижения приемлемого времени работы, от полученного массива данных была взята 4-я часть. Полученные в результате кластеры отмечены на рис. 1. Для сравнения были использованы данные, полученные сервисом fires.kosmosnimki.ru (далее – «Космоснимки) (рис. 2).

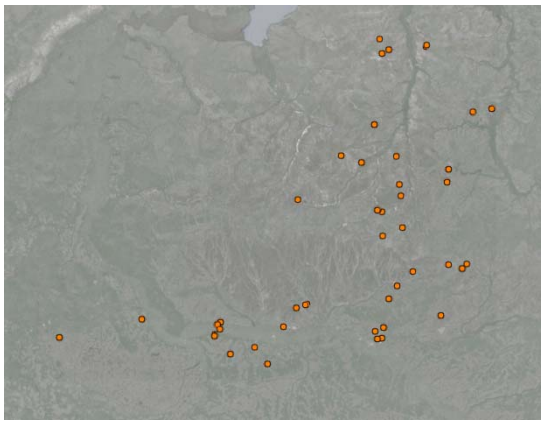


Рис. 1. Результат кластеризации на территории ЯНАО

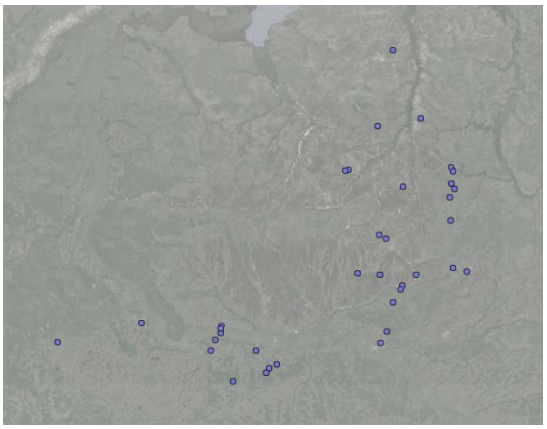


Рис. 2. Техногенные источники теплового излучения, полученные сервисом «Космоснимки» на территории ЯНАО

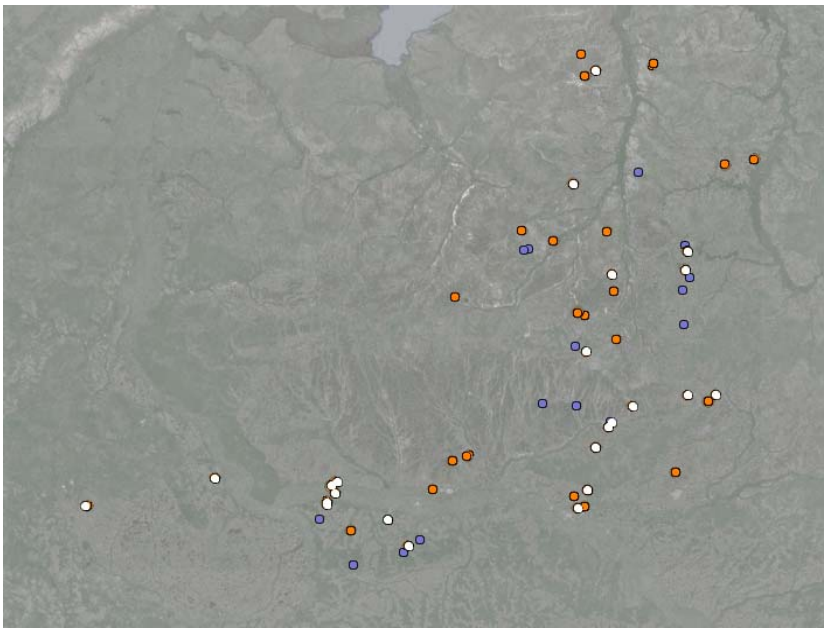


Рис. 3. Техногенные источники теплового излучения, полученные сервисом «Космоснимки» и с помощью кластеризации на территории ЯНАО

Алгоритмом DBSCAN было распознано 46 промышленных источников теплового излучения (рис. 1). На рис. 2 отмечено 36 промышленных источников теплового излучения, полученных с помощью сервиса «Космоснимки». На рис. 3 белым цветом отмечены точки, присутствующие как на рис. 1, так и на рис. 2, таких точек – 23, а всего распознанных объектов в сумме – 59. Сервисом «Космоснимки» распознано 61 % всех распознанных объектов, а предлагаемым методом кластеризации – 78 %. Доля совпавших объектов от общего числа распознанных объектов – 39 %.

Заключение

Качество распознавания достигло приемлемого уровня, однако остается задача повышения эффективности методов предобработки данных. Оптимизация алгоритма DBSACN обеспечивает ощутимый прирост в скорости. С использованием его, а также поиска соседей, с опорой на R*-tree, алгоритмическая сложность алгоритма при решении данной задачи (и схожих с нею по характеру данных) сильно снизится: поиск

соседей станет логарифмической функцией от числа точек, а число точек, из которых будет наращиваться кластер, окажется существенно меньше. Это позволит работать с данными, обладающими еще большей плотностью, за приемлемое время, что также должно повысить точность распознавания.

Список литературы

1. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы: аналит. обзор / СО РАН. ИОА. ГПНТБ; ред. В.В. Белов. Новосибирск, 2003.

2. Giglio, L. (2010). MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.4., 2010.

3. Justice, C. O., L. Giglio, et al. The MODIS fire products // Remote Sensing of Environment 83(1-2): 244-262, (2002).

4. Kaufman, Y.J. (1998) Potential global fire monitoring from EOS-MODIS / Y.J. Kaufman, C.O. Justice, L.P. Flynn, J.D. Kendall, E.M. Prins, L.Giglio, D.E. Ward, W. Paul Menzel, and A.W. Setzer // Journal of Geophysical Research. Vol. 103. No. D24. P. 32, 215–32, 238. 1998.

5. Пространственная агрегация термоточек для обнаружения промышленных источников тепла / Д.Л. Чубаров, В.А. Кихтенко, Е.А. Мамаш, В.В. Смирнов // Труды междунар. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», Новосибирск, 20–22 апреля 2015. Новосибирск: СГГА, 2015. 4(2):18–22, 2015.

6. Ester, M. et al., A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad – eds., Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). AAAI Press. P. 226–231, 1996.

УДК 004.932

СЕГМЕНТАЦИЯ, УПРАВЛЯЕМАЯ ЦЕЛЯМИ

А. Ю. Шукилович, Г. М. Цибульский
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий

Целью работы является определение способа неявного задания критерия компактности для сегментации изображений. Представлен алгоритм выделения объектов сельскохозяйственного назначения. Применен алгоритм кластеризации по текстурным признакам. По рассчитанному критерию Бхаттачария определена естественная структура данных для кластеризации и дальнейшего использования сегментации методом наращивания областей.

Ключевые слова: текстурные признаки, кластеризация, сегментация, алгоритм заливки областей с затравочной точкой, критерий Бхаттачария.

Введение

Алгоритмы кластеризации, сегментации существуют уже давно. Они появились на волне бурно развивающейся теории распознавания образов, зародившейся в 50-е годы.

Сегментация изображений – важнейший шаг для анализа изображений. Она разделяет изображение на составные части или объекты. Цель сегментации состоит в разделении изображения на существенные части, объекты внимания. Тем самым сегментация определяет семантику изображения. Результатом сегментации является множество сегментов, которые покрывают все изображение. На сегодняшний день известно большое количество алгоритмов сегментации изображений, использующих разные признаки и подходы. Но общим для всех методов сегментации является то, что задается некоторое отношение эквивалентности или компактности, в одних случаях явно, в других неявно.

Особенностью работы является то, что цели, объекты, которые преследуются в работе, заданы неявно, как и само отношение эквивалентности.

Цель работы состоит в определении способа неявного задания критерия компактности для сегментации изображений.

Для достижения поставленной цели сформирован ряд задач:

- определение первоначального набора текстурных признаков;
- выявление наиболее информативной составляющей из данного набора признаков;
- определение оптимального количества классов, или кластеров на изображении;
- проведение кластеризации и сегментации изображения.

Выделение и отслеживание контуров сельскохозяйственных полей происходит по цифровым изображениям, количество полей на район может достигать нескольких тысяч. Оценка и выделение контуров происходит визуально и ведется непосредственно оператором. Так как выделение производит непосредственно оператор, результат оцифровки является субъективным. Автоматизация данного процесса – актуальная задача. При её решении важной становится проблема выбора подходящего метода сегментации и набора признаков, обеспечивающих надежное обнаружение и выделение сельскохозяйственных полей.

Обработка изображения

Алгоритмы сегментации сложны тем, что не существует одного, который может решить различные поставленные задачи. Для каждой работы авторы ищут свой набор признаков, определяют эмпирическим путем их информативность, находят наиболее

информативные с их точки зрения и затем проводят сегментацию, также на их взгляд наиболее подходящую в решении данной задачи.

Исходными данными для всех алгоритмов сегментации были различные наборы спектральных, текстурных, фрактальных, структурных признаков и их различные комбинации. Исходя из принципов построения текстурных признаков, или статистических признаков, можно сделать вывод, что текстура в некотором смысле хранит в себе спектральные признаки.

По методам сегментации выделяют такие виды:

- пороговые методы сегментации;
- методы связывания контуров и нахождения границ;
- методы наращивания областей.

Несмотря на повсеместное присутствие текстур в изображениях и их важность, формального подхода к описанию текстуры и строгого ее определения пока не существует, и методы различения текстур, как правило, разрабатываются отдельно для каждого конкретного случая. В [1] под текстурой понимают «пространственную организацию элементов в пределах некоторого участка поверхности».

В качестве признаков можно использовать различные статистические моменты пространственных распределений. Из текстурных признаков, основанных на статистических характеристиках, выделяют признаки с пространственно-независимыми друг от друга ячейками и пространственно-зависимыми друг от друга ячейками. Первым, кто подробно начал изучение признаков с пространственно-зависимыми друг от друга ячейками, является Роберт Харалик [2].

Исходные данные

Исходными данными для проведения обработки послужил снимок сельскохозяйственных полей Сухобузимского района, полученный с прибора SPOT6 4 июля 2013 г. Исходные данные представляли файл с тремя каналами: синим, зеленым и красным диапазонами спектра.

Для увеличения скорости эксперимента взята случайная тестовая область изображения размером 3650x2000 пикселей, и дальнейшая работа проводилась именно на данной части изображения, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Снимок полей Сухобузимского района размером 3650x2000 пикселей

Определение признакового пространства

Для достижения поставленной задачи взяты два различных по вычислению набора признаков: с пространственно-независимыми друг от друга ячейками и пространственно-зависимыми друг от друга ячейками.

В первый набор вошли такие статистические характеристики, как:

- энтропия;

- энергия;
- вариация.

Во второй набор вошли признаки:

- среднее;
- энергия;
- контраст;
- однородность;
- дисперсия.

Расчет всех признаков производился окнами размеров 3x3, 5x5 и 7x7. Это позволило расширить признаковое пространство и, как следствие, проследить текстуру на различных размерах окон.

Таким образом, получено признаковое пространство, в котором каждый пиксель характеризовался вектором в количестве 207 значений.

Затем множество признаков подверглось преобразованию главных компонент, или преобразованию Карунена-Лоэва. Преобразование главных компонент часто применяют для изображений, так как изображения содержат избыточную информацию, как следствие содержательного и шумового взаимодействия соседних элементов.

После ортогонализации пространства признаков получено новое признаковое пространство. После анализа собственных значений каждого из вновь полученных признаков в дальнейшей работе взяты 17 слоев. Полученные слои изображения имели наиболее высокие собственные значения, тем самым имели наибольшую информативность. Суммарная информативность пространства признаков составила 94 %. Таким образом, большая часть информации не использовалась в дальнейшем, что позволило увеличить скорость обработки данных.

Критерий Бхаттачария. Кластеризация

Так как в работе использовалась кластеризация методом K-means, возникла необходимость расчета оптимального количества классов на изображении, полученном после преобразования главных компонент. В результате было решено использовать следующий алгоритм.

- Присвоение количества классов $N = 2$.
- Кластеризация методом K-means.
- Расчет коэффициента Бхаттачария [3].
- Сравнение значения коэффициента с предыдущим результатом.
- Если значение больше предыдущего результата, то $N = N + 1$ и переход на пункт 2.

После применения данного алгоритма коэффициент Бхаттачария показал, что оптимальным количеством классов является четыре класса для исходных данных.

Таким образом, кластеризация, выполненная с четырьмя классами, является наиболее оптимальной и описывает естественную структуру данных на исходном изображении, в отличие от кластеризации с иным количеством классов.

Сегментация

На входе задается априорная информация – карта сельскохозяйственных полей, на данной карте по каждому полю определяются центры и на площади размером 10–15 % от площади поля рассчитывается разброс значений пикселей относительно центра поля. Таким образом, неявное задание критерия компактности предполагает, что значение критерия не задается априорной информацией, а определяется непосредственно при работе алгоритма и на каждом рассматриваемом объекте, в данном случае поле, будет иметь свое значение.

Выделение сегментов на кластеризованном изображении проводилось рекурсивным алгоритмом заливки областей с затравочной точкой, или алгоритмом наращивания областей. Алгоритм состоит из трех этапов:

1. При сканировании изображения находится затравочная точка, пиксель изображения, не относящийся ни к одному из сегментов.

2. Начинает работу алгоритм наращивания областей. Проверяется восьми соседство точки, и если существует пиксель с тем же классом, что и центральный, пиксель добавляется в сегмент, и происходит проверка уже данного пикселя.

3. На следующем этапе происходит проверка на размер сегмента, если размер сегмента слишком мал, сегмент определяется как фон, и процедура возвращается к шагу 1.

Так как работа направлена на проверку способа неявного задания критерия компактности, то следует отметить сам критерий компактности. В работе использовался критерий компактности двух типов. Во-первых, компактность внутри кластера при кластеризации изображения, которая описана ранее. Во-вторых, сегментации изображения всегда присуще свойство, при котором сегмент образуется на основе четырех- или восьмисоседства пикселей изображения. Таким образом, можно считать данный факт вторым критерием компактности.

На рис. 2 представлен результат сегментации части исходного изображения. На данном изображении отчетливо видно результат работы алгоритма.

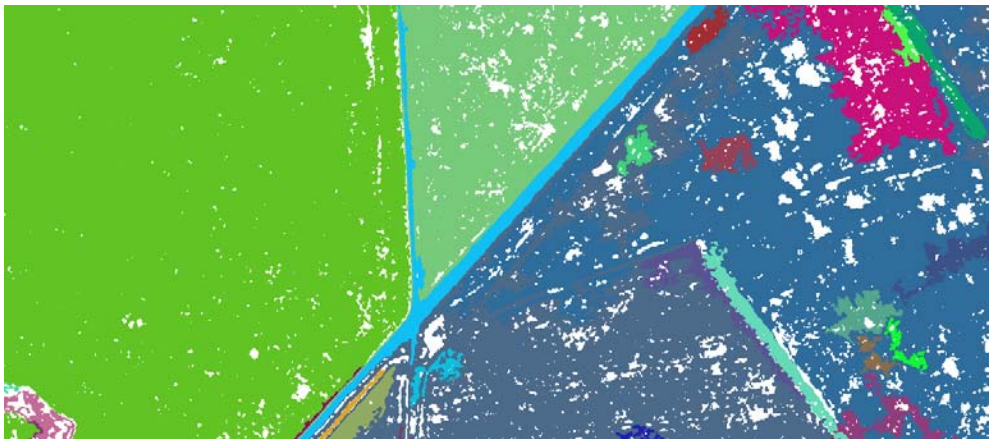


Рис. 2. Результат сегментации части исходного изображения

Заключение

В заключении хотелось бы отметить, что на данном этапе поставленные задачи выполнены. Получены первые результаты по проверке способа задания неявного критерия компактности. На данном этапе остается нерешенная задача о множестве данных, на которых данный метод будет работать. Итогом работы является изображение, которое представляет результат обработки методом, описанным в статье.

В дальнейшем алгоритм планируется дорабатывать для увеличения точности кластеризации и сегментации, а также проводить апробацию на множестве различных исходных данных.

Список литературы

1. Анализ и синтез случайных пространственных текстур / Г.А. Андреев, О.В. Базарский, А.С. Глауберман, А.И. Колесников, Ю.В. Коржик, Я.Л. Хлявич // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 2. С. 3–33.

2. Robert M. Haralick Textural features for image classification / Robert M. Haralick, K. Shanmugam, Its'hak Dinstein // IEEE TRANSACCTION ON SYSTEM, MAN AND CYBERNETICS Vol. SMC-3. 1973. № 3. С. 610–621.

3. Bhattacharyya A. On a measure of divergence between two statistical populations defined by their probability distributions // Bulletin of the Calcutta Mathematical Society 35. 1943. С. 99–109.

Секция
«МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»

УДК 551.2.02

ВОДОРОДНАЯ ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ: РЕГИСТРАЦИЯ СО СПУТНИКОВ И ОБНАРУЖЕНИЕ НА МЕСТНОСТИ

К. С. Артёмова, А. В. Бушкина, А. О. Дегтярев, В. С. Лагашкина, А. Б. Фёдоров
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт нефти и газа
e-mail: feodorov@mail.ru

HYDROGEN DEGASSING OF THE EARTH: THE REGISTRATION OF SATELLITE DETECTION AND TERRAIN

K. S. Artemova, A. V. Bushkina, A. O. Degtiarev, V. S. Lagashkina, A. B. Feodorov

Известна актуальность состояния озонового слоя атмосферы Земли. Наблюдения за его состоянием ведутся на протяжении ряда лет с использованием автоматических спутников. Состояние озонового слоя Земли зависит от мощности потоков глубинной водородной дегазации планеты. Усиление этих процессов регистрируется в последние десятилетия. Наблюдаются разнообразные проявления водородной дегазации на местности, особенно в зонах геологических разломов.

Ключевые слова: водородная дегазация, озоновый слой, водородные бактерии.

Спутниковые наблюдения изменений концентрации озона в верхних слоях атмосферы позволяют в каждодневном режиме отслеживать уровень концентрации озона над всей поверхностью планеты.

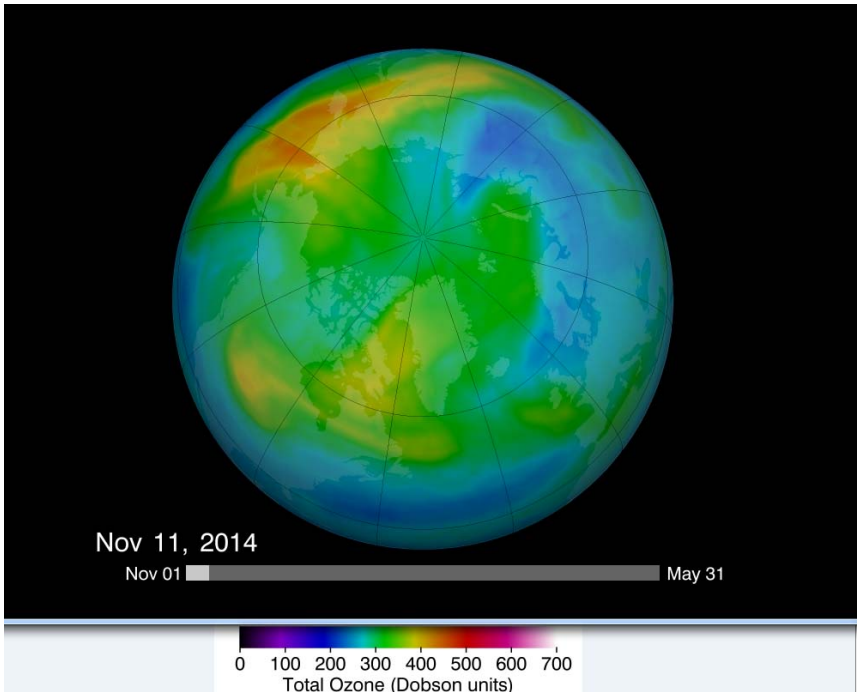


Рис. 1. Состояние озонового слоя на 11.11.2014 по данным НАСА [1]

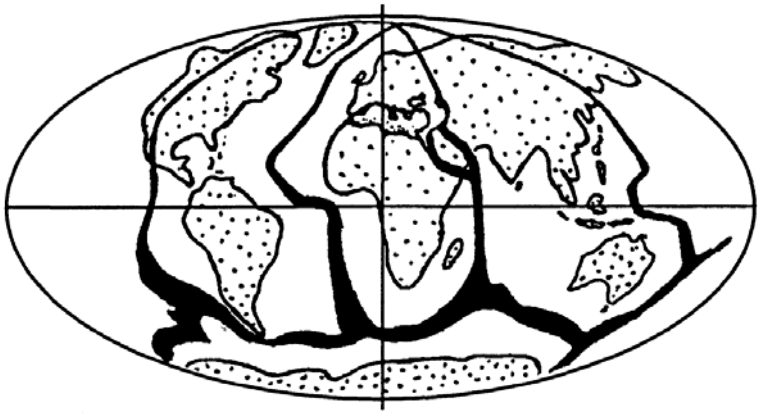


Рис. 2. Разломная система Земли – основа водородной дегазации

Водородная гипотеза продувки озонового слоя, построенная В.Л. Сывороткиным [2], базируется на твердо установленных эмпирических данных о том, что в определенных геологических структурах из земных недр выходят восстановленные газы и именно под этими центрами дегазации наиболее часто фиксируются пониженные содержания озона.

Существуют наблюдения метеорологических явлений со спутников, приуроченных к геологическим структурам.

В Южном полушарии меридиональная система разломов сходится в мощный кольцевой разлом, охватывающий Антарктиду. Эта антарктическая система рифтов является самым мощным источником газовой и прежде всего водородной глубинной дегазации. Эти обстоятельства приводят к падению концентрации озона над Южным полюсом Земли.

На рис. 1 видно падение концентрации озона над северной частью России, в частности над территорией Красноярского края.

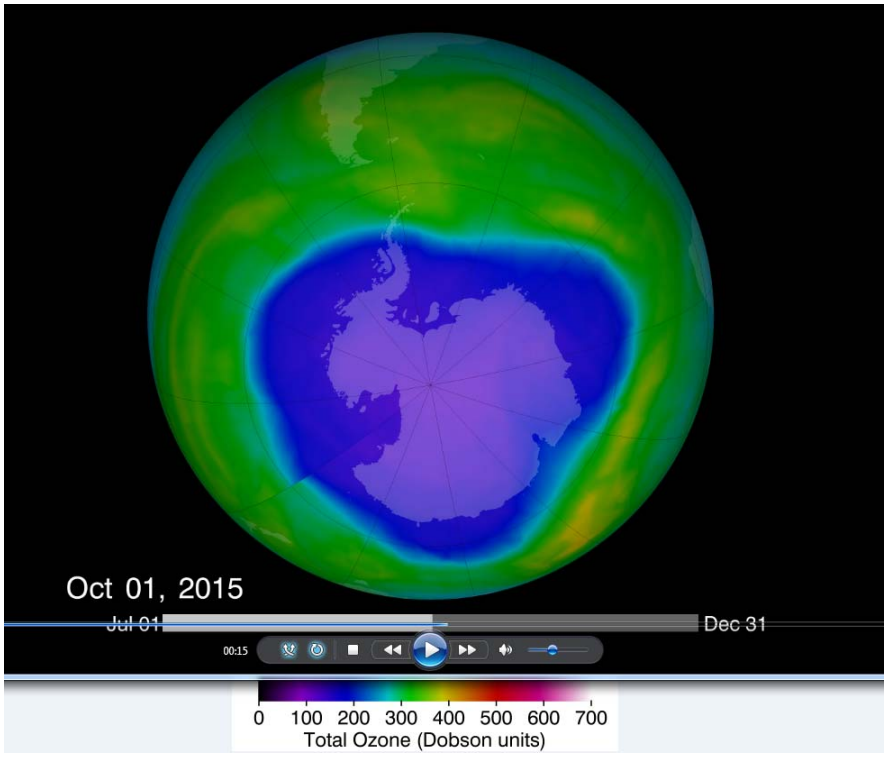


Рис. 3. Озоновая дыра над Антарктидой 01.07.2015 [1]



Рис. 4. «Земляной вулканчик» из Подмосковья [3]

Водородная дегазация в районах эффективного выхода проявляется в виде «земляных вулканчиков», рис. 4 [3]. В исследованиях геолога В.Н. Ларина сообщается о множественном проявлении таких структур на полях Подмосковья [4], в районах водородной дегазации. Уровни выделения водорода на поверхности земли по концентрации H2 достигают 1 % и более.

Своим появлением «земляные вулканчики» обязаны процессам жизнедеятельности водородокисляющих бактерий (Hydrogenomonas). В красноярских учебных и научных учреждениях водородные бактерии изучаются уже на протяжении нескольких десятков лет.

В мае 2016 г. сотрудниками и студентами кафедры геологии нефти и газа выполнены два маршрута с целью наблюдения «земляных вулканчиков» в Красноярске и районах края. Снег, дважды выпадавший накануне прохождения маршрутов, контрастировал фотоматериалы.



Рис. 5. «Земляные вулканчики» на острове «Отдыха», 02.05.2016

Следует обратить внимание, что в непосредственной близости от приведенного на рис. 5 поля находятся важные инфраструктурные объекты городского хозяйства. Красноярск находится на пересечении меридионального разлома и разлома, простирающегося от озера Байкал. Такие зоны оказываются эффективными выходами глубинной водородной дегазации. Маршрут, выполненный вдоль трассы «Байкал» от Красноярска до Уяра, показал большое количество проявлений водородной дегазации, что соответствует представлениям, развиваемым в работе [2].



Рис. 6. «Земляные вулканчики» вдоль автотрассы «Байкал», 08.05.2016

Активизация исследований водородной дегазации связана с появлением компактных приборов для определения концентрации водорода в газах. Учитывая широкий диапазон мощностей водородных выходов на поверхность земли, представляются перспективными исследования целого ряда практически значимых для регионального хозяйства вопросов. Это, прежде всего, вопросы безопасности, поскольку водород в смеси с воздухом образует гремучий газ. Смежный вопрос – о пожаробезопасности. Выделения водорода в процессе таяния грунта могут способствовать возгораниям травы и леса.

Целый спектр технических задач регионального хозяйства связан с подверженностью инфраструктурных сооружений воздействию водородной коррозии.

Список литературы

1. Arctic Ozone Watch: Images, data and information for the Northern Hemisphere. Ozone Maps [Электронный ресурс] // NASA Goddard Space Flight Center. 2016. May. Режим доступа: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/NH.html

2. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / Министерство природных ресурсов Российской Федерации. М.: Геоинформцентр, 2002. 111 с.

3. Ларин В.Н., Ларин Н.В. Причина и прогноз на будущее с точки зрения обывателя // Hydrogen Future [Электронный ресурс]. 2010. 4 окт. Режим доступа: http://hydrogen-future.com/list-c-phenomen/6-page-id-19.html

4. Ларин В.Н., Ларин Н.В. Современная дегазация водорода на Русской платформе // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2007. Т. 82, вып. 5. С. 91.

УДК 528.854.2

ОЦЕНКА ТРЕНДОВ NDVI В ЗАБАЙКАЛЬЕ ПО ДАННЫМ MODIS TERRA

А. А. Аюржанаев, Б. В. Содномов, Б. З. Цыдыпов
ФГБУН «Байкальский институт природопользования СО РАН»
e-mail: aaa@binm.bscnet.ru
e-mail: anstatt@yandex.ru
e-mail: bz61@mail.ru

ASSESSMENT OF NDVI TRENDS IN TRANSBAIKALIA USING MODIS TERRA IMAGERY

A. A. Ayurzhanaev, B. V. Sodnomov, B. Z. Tsydypov
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
e-mail: aaa@binm.bscnet.ru
e-mail: anstatt@yandex.ru
e-mail: bz61@mail.ru

Изменение климата на территории Забайкалья усугубляет процессы опустынивания и деградации земель. Целью работы является выявление и анализ долговременных изменений растительного покрова Забайкалья на основе вегетационного индекса MODIS NDVI. Получена карта пространственного распределения трендов NDVI в Забайкалье. Выявлено, что на фоне устойчивого снижения количества выпадаемых осадков отрицательные тренды NDVI характерны для степной растительности, положительные – для лесных экосистем.

Ключевые слова: изменение климата, Забайкалье, тренд, MODIS Terra, NDVI, сумма осадков.

Введение

В работах последних лет, посвященных изменению климата и его последствиям, дан анализ и прогноз многолетних тенденций температуры и осадков [1, 2]. Забайкалье является одним из регионов с наиболее интенсивными темпами роста приземной температуры воздуха. Так, среднегодовая сумма осадков в Забайкалье за последние 75 лет уменьшилась на 41,4 мм, а среднегодовая температура воздуха увеличилась на 2,29 °С (отметим, что в то же время среднегодовая температура на всем земном шаре увеличилась на 1,2 °С [2]). Рост температуры наблюдается для всей территории Забайкалья, при этом зоны с невысокими темпами роста приземной температуры перемежаются с зонами с высокими темпами роста как в широтном, так и в долготном направлениях. Динамика климата последних десятилетий отражается в учащении проявления экстремальных природных явлений, таких как засухи, лесные и степные пожары, наводнения, селевые сходы и т. д. Изменение климата на территории Забайкалья усугубляет процессы опустынивания и деградации земель. Изучение негативной реакции наземных геосистем, проявляющейся в ухудшении их состояния, определение причин засух, опустынивания и деградации земель, а также их картографическое отображение являются важным источником в планировании, реализации и оценке мер по борьбе с опустыниванием.

Цель работы – выявление и анализ долговременных изменений растительного покрова Забайкалья на основе вегетационного индекса NDVI.

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные спектрорадиометра MODIS спутника Terra, которые доступны для скачивания с портала NASA EOSDIS. Исходными данными

послужили временные ряды NDVI тематического продукта MOD13Q1, который помимо нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI содержит усовершенствованный вегетационный индекс EVI [3]. Продукт представлен растровыми 16-дневными композитами с пространственным разрешением 250 м в синусоидальной проекции. Размер изображения составляет 4800×4800 пикселей, что соответствует площади размером 1200×1200 км на земной поверхности. Снимки были загружены за период вегетации растительного покрова (с апреля по октябрь) с 2000 по 2015 г.

Проведена предварительная обработка данных, заключающаяся в восстановлении отсутствующих значений и сглаживании временного ряда NDVI. Обозначенные специальным флагом отсутствующие значения пикселя заменены его средним значением за весь период. Для сглаживания временных рядов использован фильтр Савицкого-Голея, который часто применяется для снижения уровня шумов.

Полученные после предварительной обработки данные использованы для построения линейной регрессионной модели с помощью пакета статистического анализа R. В результате попиксельной обработки получены 1,44 млн регрессионных уравнений и оценены их коэффициенты наклона (тренд).

Для получения пространственной картины распределения осадков по территории исследования использованы данные глобальной базы интерполированных климатических данных WorldClim с пространственным разрешением 30 угловых секунд (≈1 км). Данные усреднены по месяцам за период с 1950 по 2000 г. [4].

Для расчета трендов суммы осадков с 2000 по 2015 г. использована база данных метеорологических параметров CRU TS 3.23. Интерполированные данные о количестве осадков и приземной температуре воздуха содержатся в узлах регулярной прямоугольной сетки с размером ячейки 0,5×0,5 °C. Для систематизации и обработки массива данных CRU TS 3.22 создано специализированное программное обеспечение [5].

Валидация изменений растительного покрова проводилась на основании разновременных снимков высокого разрешения системы Landsat.

Результаты и обсуждение

В результате проведенной работы получена карта пространственного распределения трендов NDVI в Забайкалье (рис. 1). Зоны с отрицательным трендом NDVI, характеризующим устойчивое снижение фотосинтетически активной биомассы, приурочены к степным растительным сообществам, которые в основном расположены в межгорных котловинах. Территории с наибольшей площадью отрицательных трендов NDVI располагаются в долинах рр. Селенга, Уда, Хилок и Баргузин. Зоны с положительным трендом вегетационного индекса NDVI приурочены к лесным ландшафтам. Тем не менее территории, на которых регулярно происходят лесные пожары, также отмечены негативными трендами.

Южная часть Забайкалья относится к территории с недостаточным увлажнением, что является главным фактором, лимитирующим рост растительных сообществ. Поэтому межгодовая динамика выпадения осадков должна иметь значительное влияние на формирование растительного покрова и, как следствие, на динамику NDVI. На рис. 2 представлена карта распределения линейного тренда суммы осадков с 2000 по 2015 гг.

За последние десятилетия выделено два периода увлажнения: 1980–1999 гг. – влажный; 2000–2015 гг. – засушливый. Влажный период характеризуется положительными трендами суммы осадков практически для всего Забайкалья, при этом наибольшие темпы роста отмечены для хр. Хамар-Дабан – 14 мм/год и района Среднего Байкала – 10 мм/год. В засушливый период 2000–2015 гг. наблюдается

отрицательная динамика количества выпавших осадков для всего бассейна оз. Байкал. Экстремальное снижение увлажнения отмечается для хр. Хамар-Дабан и составляет –30 мм/год. В бассейнах рр. Верхняя Ангара и Баргузин темпы снижения достигают значений –18 мм/год.

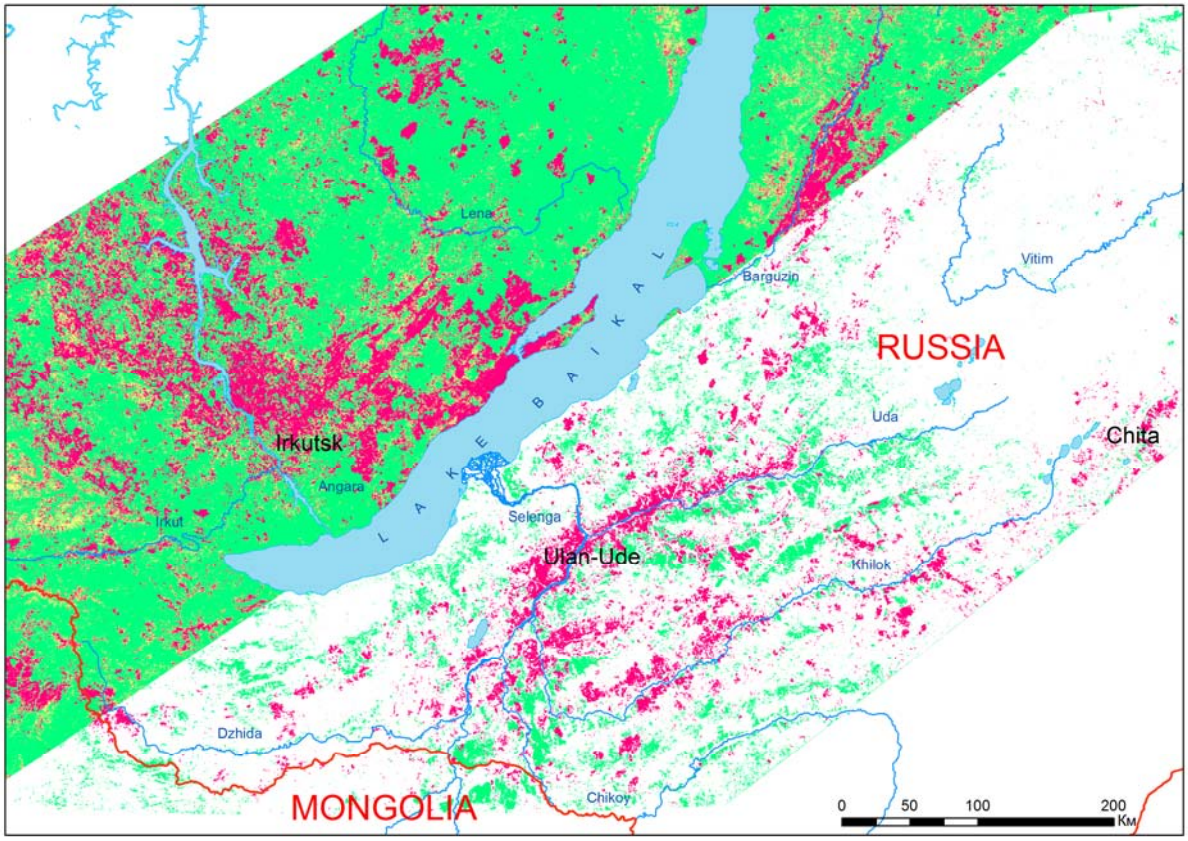


Рис. 1. Карта линейных трендов NDVI в Забайкалье с 2000 по 2015 г. Зеленым и красным цветом обозначены статистически значимые (p < 0,05) положительные и отрицательные тренды соответственно

Хотя снижение количества осадков отмечается почти для всей территории исследования, тем не менее наблюдаются положительные тренды NDVI в горной местности, где количество выпадаемых осадков существенно больше, чем в низинах. Пространственная картина сумм осадков построена по интерполированным значениям данных метеостанций, низкая плотность которых не позволяет отобразить все многообразие природных зон Забайкалья (рис. 2). Более точную картину распределения осадков по территории исследования дают данные WorldClim, так как пространственное разрешение данной модели равно 1 км.

В результате работы получены оценки трендов NDVI в Забайкалье с 2000 по 2015 г. Отрицательные тренды NDVI характерны для степной растительности, положительные – для лесных экосистем. Показано, что за период с 2000 по 2015 г. в районе исследований наблюдается снижение количества осадков – фактора, лимитирующего рост растительности. Полученные результаты могут быть использованы при планировании мероприятий, направленных на снижение негативного эффекта процессов опустынивания и деградации земель в Забайкалье.

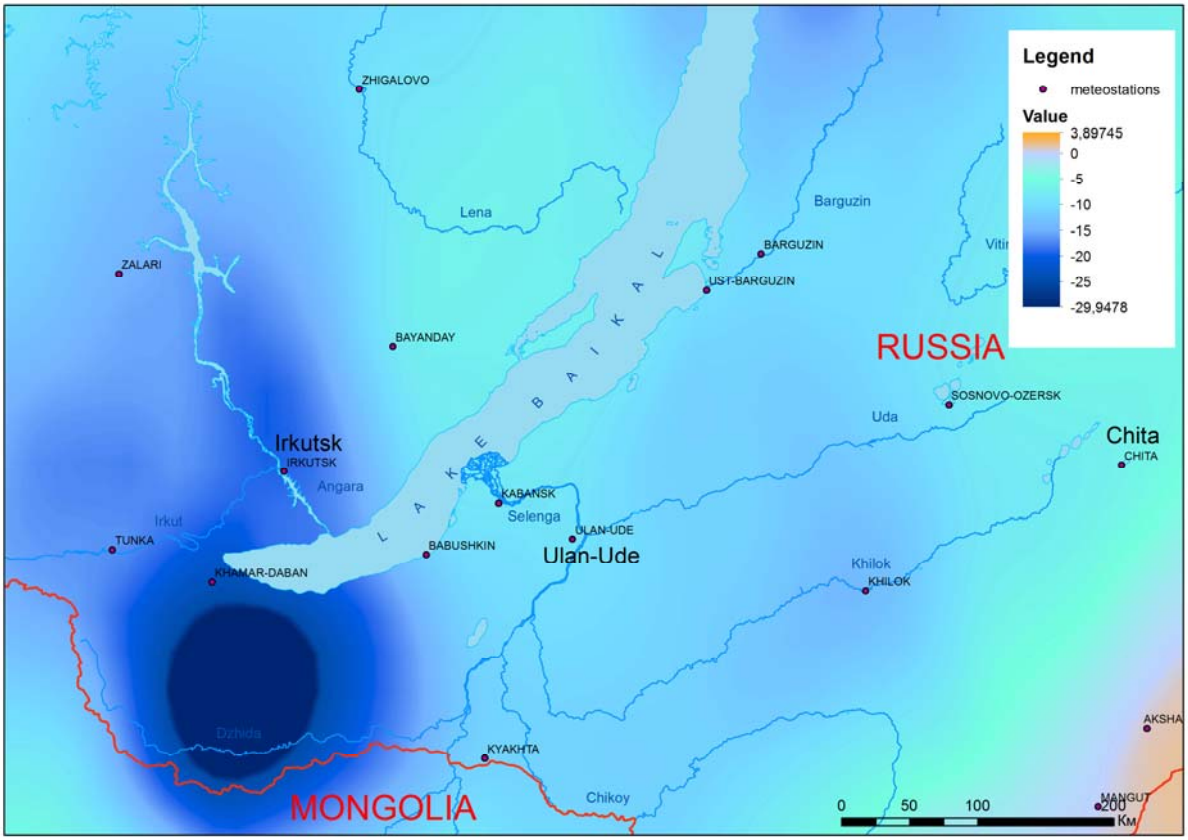


Рис. 2. Карта линейных трендов годовых сумм осадков с 2000 по 2015 г.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Русского географического общества «Трансформация природной среды Забайкалья и сопредельных территорий: ретроспективный анализ и современное состояние».

Список литературы

1. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. М.: ДАРТ; Гл. геофиз. обсерватория, 2011. 252 с.

2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: НИЦ «Планета», 2008. 289 с.

3. Huete A., Justice C., Van Leeuwen W. MODIS Vegetation Index: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Version 3.0. 1999. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.

4. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. N 25. P. 1965–1978.

5. Пакет обработки пространственно-временных рядов метеорологических данных / А.А. Аюржанаев, Е.Ж. Гармаев, Б.З. Цыдыпов, С.Г. Андреев // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617790; правообладатель: ФГБУН БИП СО РАН; заявл. 28.05.2015; опубл. 22.07.2015.

УДК 528.8:(630.182.2+633.1)

ИЗУЧЕНИЕ ФЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырногов
Институт биофизики СО РАН
e-mail: irina.pugacheva@mail.ru
e-mail: ap@ibp.ru

A STUDY OF PHENOLOGICAL VARIABILITY PLANTS ON THE TERRITORY OF THE KRASNOYARSK TERRITORY (RUSSIA), BASED ON SATELLITE DATA

I. Yu. Botvich, A. P. Shevyrnogov
Institute of Biophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Проведено изучение особенностей фазовых портретов растительности (агрофитоценозы, древесная растительность), построенных в двумерном пространстве значений радиационной температуры (T) и Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). На основе этого проведен анализ фенологической изменчивости растительности юга Красноярского края. Выявлены отличительные особенности фазовых портретов агрофитоценозов и древесной растительности в пространстве (T, NDVI).

Ключевые слова: спутниковые данные, фенология, сельскохозяйственные культуры, древесная растительность.

Введение

Появление спутниковой информации предоставило возможность дистанционного определения времени наступления и окончания периода вегетации как в региональном, так и в глобальном масштабах. Существующие в настоящее время методы – логистические [1, 2] и пороговые [3, 4] – имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение. Так, величина порога в «пороговом методе» определяется опытным путем с привлечением полевых геоботанических данных. Параметры логистических уравнений определяются статистическим способом, но точность логистического метода снижается за счет большого числа статистически-определяемых параметров (более двух) [4].

Настоящая статья посвящена изложению результатов изучения изменчивости фазовых портретов растительности, построенных в двумерном пространстве значений радиационной температуры и Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Результаты исследования являются теоретической основой для разработки методики автоматического определения границ вегетационного периода без привлечения полевых геоботанических данных.

Методика и объекты исследования

Объектом исследований являются древесная растительность (берёза повислая (Betula *pendula*), лиственница сибирская *(Larix sibirica*), осина обыкновенная *(Populu stremula*), пойменные луга в комплексе с кустарниками, ивняками, тополевниками и посевы сельскохозяйственных (с/х) культур (пшеница (*Triticum acstivum*), овес (*Avena*), гречиха (*Fagópyrum*)). Тестовые участки расположены на территории Красноярского края. Верификация спутниковых данных проводилась по данным полевых геоботанических описаний [5].

Изучение фазовых портретов растительных объектов, построенных в двумерном пространстве значений радиационной температуры (T) и NDVI, проводилось по данным прибора Modis спутников Terra и Aqua с пространственным разрешением 250 м (продукты MOD09Q1, MYD09Q1, MOD11A2, MYD11A2). Исследование основывается на комплексном анализе спутниковой информации, измеренной в красном (620–670 нм), ближнем инфракрасном (841–876 нм) диапазонах, совместно с данными о радиационной температуре, восстановленной по измерениям радиометром Modis в тепловых инфракрасных каналах № 31 (10,780–11,280 мкм) и № 32 (11,770–12,270 мкм).

Предварительная [6] и тематическая обработка спутниковой информации проводилась с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного на основе языка IDL (the Interactive Data Language). В ходе тематической обработки спутниковой информации производился расчет средних значений $NDVI_{mean}$ и средних значений радиационной температуры T_{mean} за 8-дневный период по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua.

Результаты и обсуждения

В течение сезонного развития растительное сообщество неоднократно претерпевает изменения состояния – фазовые переходы (распускание почек, начало цветения и т. д.). Рассмотрим изменение фазовых траекторий агрофитоценозов и древесной растительности в пространстве (T, NDVI).

Анализ полученных данных показал, что форму фазовой кривой y = NDVI(T) растительного объекта условно можно разделить на несколько зон.

Форма участка фазовой кривой в виде плато, в начале вегетационного периода, свидетельствует об отсутствии вегетации (участок № 1 на кривой рис. 1). В отличие от естественной растительности, посев семян с/х культур производится в физически спелую почву. Естественная растительность не столь требовательна к состоянию почвы. Процесс её выхода из состояния зимнего покоя начинается при первом оттаивании корнеобитаемого слоя почв. Наличие открытой почвы (без растительного покрова) продолжительный период времени отражается на форме фазового портрета растительности посевов с/х культур в виде характерного плато (рис. 2). Ход кривой нарушается только тогда, когда растения накапливают требуемый для их роста объем тепловой энергии (П1). Критическая точка в функционировании фитоценоза П1 свидетельствует о начале вегетации растительности.

Преодолев порог, скорость прироста биомассы наземных органов резко увеличивается. Это отражается на всех кривых фазовых портретов в виде многократного увеличения значений NDVI (участок № 2 на кривой рис. 1). Посевы с/х культур переходят в фенологическую фазу – всходы, древесная растительность – распускание почек.

Кривая фазового портрета на участке № 3 (рис. 1) имеет вытянутую вдоль оси абсцисс форму. Следовательно, основной вклад в формирование кривой вносит изменчивость значений радиационной температуры (от +10 до +30 °C). Значения NDVI изменяются несущественно. Для посевов с/х культур увеличение данных значений (на 10–12 %) обусловлено увеличением общего проективного покрытия, в связи с ростом генеративных органов (рис. 2). Значения NDVI древесной растительности изменяются не более чем на 4–5 %.

Участок № 4 кривой фазового портрета (рис. 1) отражает доминирование деструктивных процессов у древесных растений (смена окраски и листопад). Посевы с/х культур находятся в стадии созревания, происходит налив и созревание зерна. Переход от восковой стадии созревания до полной спелости сопровождается уменьшением общего проективного покрытия, сменой аспекта растений (от зеленого до желтого), увеличением количества ветоши и мортмассы. Критическая точка

в функционировании фитоценоза П2 свидетельствует об окончании вегетации растительности.

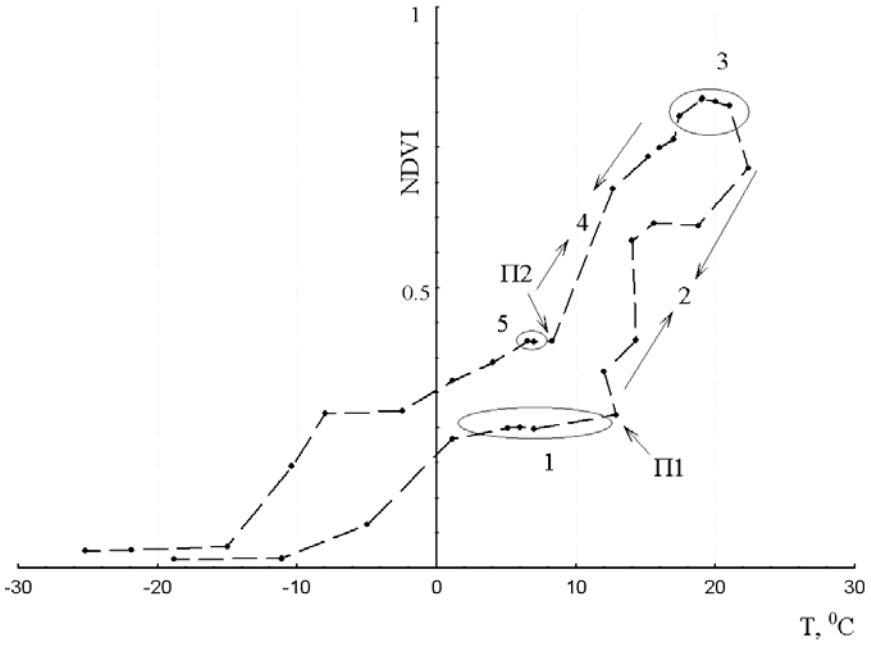


Рис. 1. Обобщенный фазовый портрет растительного объекта в пространстве (T, NDVI). Цифры у кривой указывают фенологическую фазу: 1 – отсутствие вегетации, предвегетационный период; 2 – рост биомассы наземных органов (первый этап вегетационного периода); 3 – сезонный максимум биомассы; 4 – осенняя окраска, увядание листвы; 5 – послевегетационный период, П1, П2 – начало и окончание вегетации растительности

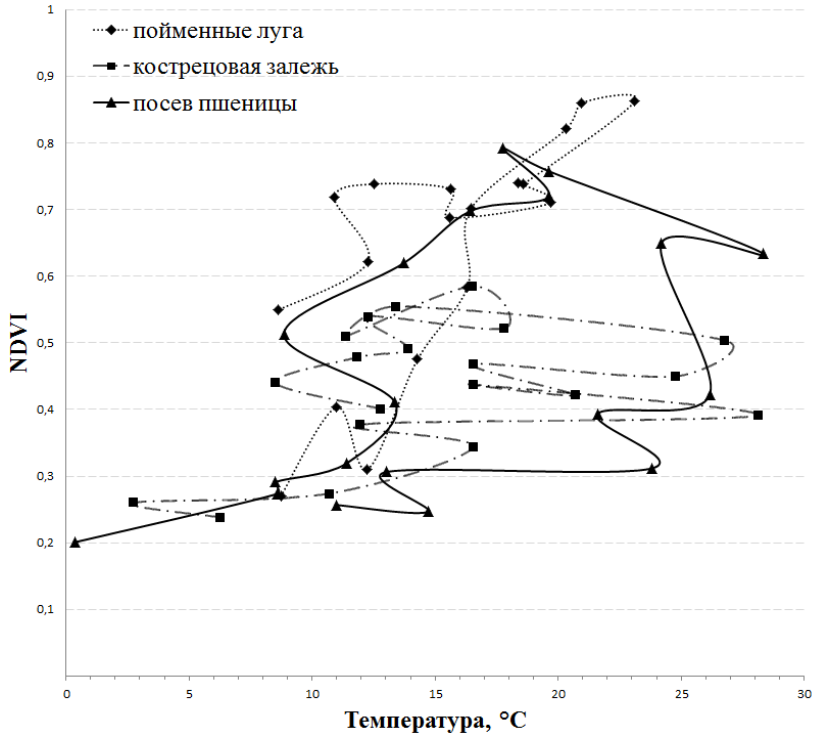


Рис. 2. Фазовые траектории разных типов растительности (посев пшеницы, кострецовая залежь, пойменные луга) в пространстве (T, NDVI), период вегетации 2006 г.

Участок № 5 кривой фазового портрета (рис. 1) отражает процессы послевегетационного периода – посевы с/х культур убраны, окончание листопада, отмирание листвы.

Установлено, что различия в расстоянии между кривыми, обозначающими фазы № 2 и № 4, фазовых портретов и продолжительность фазы № 1 позволяют однозначно определять тип растительности (растительность с/х посевов, хвойная или лиственная древесная растительность).

Выводы

Проведен анализ фенологической изменчивости растительности юга Красноярского края в течение периода вегетации 2006 г. Выявлены отличительные особенности фазовых портретов агрофитоценозов и древесной растительности в пространстве (T, NDVI). Установлено, что изучение фазовых портретов растительности позволяет повысить информативность имеющихся данных NDVI и радиационной температуры. Становится возможным определение границ фенологических состояний фитоценоза, области перехода из одного состояния в другое.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00281 мол_а.

Список литературы

1. Zhang X., Mark A.F., Crystal B.S., Alan H.S., John C.F.H., Gao F., Bradley C.R., Alfredo H. Monitoring vegetation phenology using MODIS // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 84. P. 471–475.

2. Fisher J.I., Mustard J.F., Vadeboncoeur M.A. Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 100 (2). P. 265–279.

3. Hmimina G., Dufrêne E., Pontailler J.-Y., Delpierre N, Aubinet M., Caquet B., Grandcourt A. de, Burban B., Flechard C., Granier A., Gross P., Heinesch B., Longdoz B., Moureaux C., Ourcival J.-M., Rambal S., Saint André L., Soudani K. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 132. P. 145–158.

4. Sohee Kim, Sinkyu Kang, Jong-Hwan Lim, Jung-Hwa Chun, Joo-Han Sung Regional parameterization of canopy onset models using MODIS and flowering onset data // Ecological Modelling. 2012. V. 247. P. 190–198.

5. Сезонная динамика продуктивности агроценозов юга Минусинской котловины / Е.Ю. Жукова, А.П. Шевырногов, В.М. Жукова, Т.М. Зоркина, И.Ю. Пугачева // Вестник Томского государственного университета. 2009. 323. С. 354–357.

6. Pugacheva I.Yu., Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P. A study of backscattered spectra dynamics of agricultural crops during growth period on the territory of the Krasnoyarskii Krai (Russia) // Advances in Space Research. 2010. V. 45. P. 1224–1230.

УДК 528.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ИНДЕКСА NDVI РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

Е. В. Варламова, В. С. Соловьев
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН
e-mail: varlamova1@ikfia.sbras.ru, solovyev@ikfia.sbras.ru

STUDY OF NDVI VEGETATION INDEX CHANGE OF EAST SIBERIA ON REMOTE SENSING DATA

E. V. Varlamova, V. S. Solovyev
Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
varlamova1@ikfia.sbras.ru, solovyev@ikfia.sbras.ru

По данным многолетних (1982–2014) спутниковых наблюдений проведены исследования вариаций индекса NDVI растительности мерзлотного региона Восточной Сибири. Рассчитаны и построены изменения фенологических параметров сезона вегетации. Рассчитаны тренды и корреляции NDVI с температурой воздуха и атмосферными осадками. Показано, что в течение последних трех десятилетий наблюдается тенденция более раннего начала и более позднего окончания сезона вегетации хвойных листопадных лесов и тундровой растительности. В условиях низкого уровня атмосферных осадков доминирующим фактором положительной динамики растительного покрова является температура воздуха.

Ключевые слова: сезонные параметры NDVI, температура воздуха, атмосферные осадки, мерзлотный регион.

Введение

Для обширных и труднодоступных территорий данные дистанционного зондирования являются ценным источником информации о состоянии окружающей среды, обеспечивающим высокий уровень достоверности и регулярности измерений ключевых параметров, в том числе индекса вегетации [1–7]. По данным спутниковых наблюдений показано, что вследствие потепления климата наблюдаются заметные изменения фенологических событий вегетации. Так, в работах [6, 7] отмечается, что за последние три десятилетия в Северном полушарии наблюдается рост индекса NDVI растительного покрова.

В данной работе приведены результаты исследования вариаций сезонных параметров индекса NDVI растительного покрова мерзлотного региона Восточной Сибири, корреляция с приземной температурой воздуха и уровнем атмосферных осадков.

Данные и методика

В работе использованы данные (1982–2014), полученные из открытых источников: данные NOAA CDR Program (индекс NDVI) [8]; среднесуточная приземная температура воздуха получена из архива данных реанализа ERA-Interim (http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim); значения атмосферных осадков взяты из среднемесячного набора данных CRU TS v.3.23 (Climate Research Unit Time Series version 3.23, http://www.cru.uea.ac.uk/data) [9]; использована карта наземных экосистем Северной Евразии, построенная в рамках проекта GLC2000 [10].

На карте наземных экосистем Северной Евразии (рис. 1) показано расположение трех исследуемых участков, обозначенных номерами 1, 2, 3. Участки 1 и 2 расположены на севере Якутии и находятся в одной климатической зоне, на обоих участках преобладает тундровая растительность. Участок 3 расположен в центральной

части Якутии, климат которой (в сравнении с северными участками) более мягкий, основной тип растительности представлен лиственницей даурской, относящейся к хвойному листопадному типу деревьев.

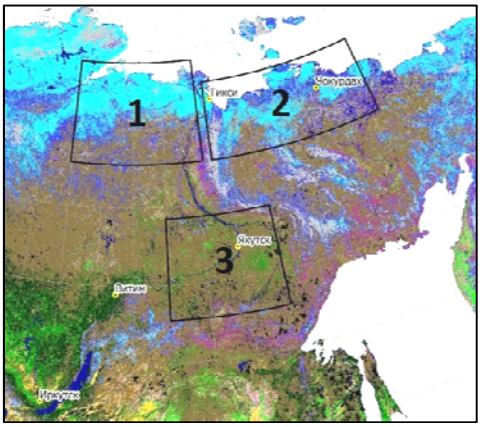


Рис. 1. Расположение исследуемых участков (выделены контуром черного цвета и обозначены цифрами 1, 2 и 3)

Для определения даты наступления начала и конца вегетационного сезона был выбран известный критерий устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 ^{0}C, соответственно, весной и осенью [11]. В результате для территории Восточной Сибири были построены: карты дат устойчивого перехода температуры через 5 ^{0}C весной и осенью; карты пороговых значений NDVI, соответствующих началу (NDVIн) и концу (NDVIк) вегетационного сезона; векторные маски для хвойных листопадных лесов (участок 3) и растительности тундры (участки 1 и 2); рассчитаны значения NDVIн и NDVIк., усредненные за 1982–2014 гг. Для участков 1 и 2 значения NDVIн,к составили 0,3 и 0,4 соответственно, для участка 3 – 0,3 и 0,3.

По полученным пороговым значениям NDVI для каждого участка были рассчитаны начало (SOS – start of season), конец (EOS – end of season) и длительность (LOS – length of season) вегетационного сезона. Расчет SOS, EOS и LOS проводился с помощью специализированного программного обеспечения TIMESAT [12].

Обсуждение результатов

На рис. 2 показаны вариации SOS, EOS и LOS для всех исследуемых участков за период 1982–2014 гг. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной – SOS (рис. 2, а), EOS (рис. 2, *б*) и LOS (рис. 2, *в*) в днях года. Вариации этих параметров для участков 1, 2 и 3, согласно легендам рис. 2, показаны линиями различного цвета. Видно, что графики имеют изменчивый характер, но в целом наблюдаются выраженные тренды положительного и отрицательного знаков. Из рис. 2, *а* видно, что SOS для всех участков имеет тенденцию к снижению, что говорит о более раннем начале сезона вегетации. Напротив, EOS (рис. 2, *б*) имеет положительный тренд, что означает более позднее завершение сезона вегетации. Таким образом, на всех участках наблюдается увеличение длительности (LOS) сезона вегетации (рис. 2, *в*). На северных участках 1 и 2 вегетационный сезон ожидаемо короче (~ на 2 месяца), чем в центральной Якутии (участок 3), что объясняется отличиями климатических зон.

В таблице представлены значения трендов SOS, EOS и LOS, а также среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков для всех участков за период 1982–2014 гг. Как следует из таблицы, на участках 1 и 2 тренд LOS составляет, соответственно, 22 и 28 дней, что заметно больше (в 1,5–2 раза), чем на участке 3, где тренд LOS равен 14 дням. Увеличение LOS происходит в основном за

счет более раннего начала SOS: на участке 1 тренд SOS больше, чем тренд EOS, в ~ 4,5 раза, на участке 2 – в ~ 1,5 раза, и на участке 3 – в ~ 2 раза.

Отметим также, что тренд среднегодовой температуры воздуха на северных участках выше в ~ 2 раза и равен 2,8 ^{0}C, по сравнению с центральной Якутией, где температурный тренд составил 1,2 ^{0}C. Коэффициент корреляции между LOS и среднегодовой температурой воздуха для участков 1 и 2 составил 0,7 и 0,8 соответственно. Для участка 3 в центральной Якутии корреляция заметно слабее и составила 0,2. Тренд суммы атмосферных осадков в целом незначительный, а корреляция с LOS отсутствует.

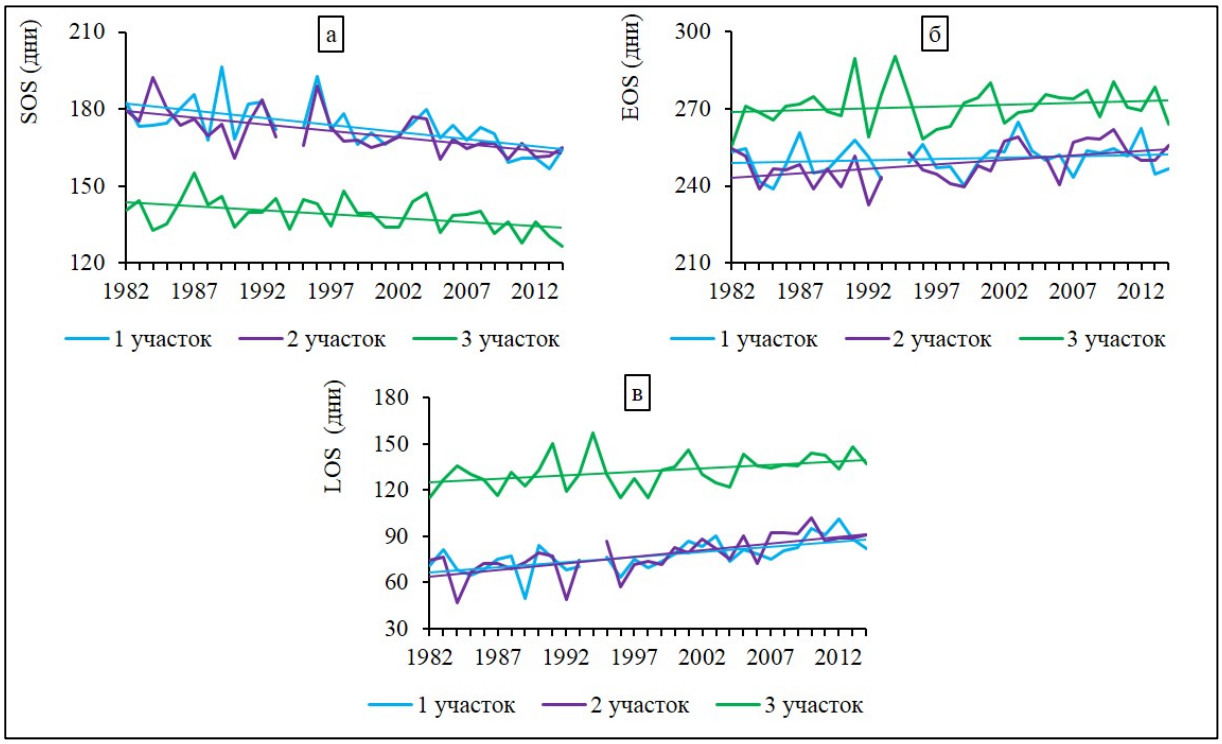


Рис. 2. Вариации фенологических параметров участков за период 1982–2014 гг.: а) SOS, б) EOS, в) LOS

Таблица

Величина трендов сезонных параметров NDVI и метеорологических данных за период 1982–2014 гг. для участков 1, 2 и 3

№	Параметр (ед.)	1-й участок	2-й участок	3-й участок
1	SOS (дни)	–18	–17	–10
2	EOS (дни)	4	11	4
3	LOS (дни)	22	28	14
4	Среднегодовая температура (^{0}C)	2,8	2,8	1,2
5	Сумма осадков (мм)	22	17	66

Выводы

В течение последних трех десятилетий наблюдается увеличение длительности (LOS) вегетационного сезона тундровой растительности (участки 1, 2) и хвойных листопадных лесов (участок 3) на фоне роста среднегодовой температуры воздуха. Наиболее существенное увеличение LOS (на 22 и 28 дней, соответственно, для участков 1, 2) наблюдается на севере Якутии и происходит в основном за счет более

раннего начала вегетационного сезона (на 17 и 18 дней, соответственно, для участков 1, 2). Также на севере Якутии наблюдается существенное увеличение среднегодовой температуры воздуха (на 2,8 ^{0}C) и его высокий коэффициент корреляции (~0,7 и 0,8) с LOS. Тренд суммы атмосферных осадков в целом незначительный, а корреляция с LOS отсутствует. Отсюда можно сделать вывод о том, что доминирующее влияние на положительную динамику тундровой растительности мерзлотного региона оказывает температурный фактор.

Список литературы

1. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium. NASA. 1973. SP-351 I. P. 309–317.
2. Харин Н.Г., Жирин В.М., Татеиши Р. Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов России // Исследование земли из космоса. 2001. № 1. С. 73–79.
3. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 65–70.
4. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Наука и образование. 2012. № 2 (66). С. 58–62.
5. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 10. С. 891–894.
6. J. Ronald Eastman, Florencia Sangermano, Elia A. Machado, John Rogan, Assaf Anyamba. Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // Remote Sensing. 2013. V. 5. P. 4799–4818.
7. Zhao, J.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Guo, X.; Li, X.; Chen, C. Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades // Remote Sensing. 2015. V. *7*. P. 10973–10995.
8. Eric Vermote, Chris Justice, Ivan Csiszar, Jeff Eidenshink, Ranga Myneni, Frederic Baret, Ed Masuoka, Robert Wolfe, Martin Claverie and NOAA CDR Program (2014): NOAA Climate Data Record (CDR) of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Version 4 [1982–2014]. NOAA National Climatic Data Center. doi:10.7289/V5PZ56R6 [20.10.2015].
9. University of East Anglia Climatic Research Unit; Jones, P.D.; Harris, I. CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-Month Variation in Climate (Jan. 1901–Dec. 2013); NCAS British Atmospheric Data Centre: Didcot, UK, 2014. Available online: http://www.cru.uea.ac.uk/data (accessed on 11.01.2014).
10. Барталев С.А., Белвард А.С., Ершов Д.В., Исаев А.С. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. Институт космических исследований РАН, 2004. (http://terranorte.iki.rssi.ru).
11. Степанова Т.А. Метеорологическое обеспечение агронома: метод. указания. Вологда-Молочное, 2009. 16 с.
12. Eklundh, L. and Jönsson, P. TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. In Remote Sensing Time Series, eds. C. Kuenzer, S. Dech and W. Wagner, Springer International Publishing. 2015. V. 22. P. 141–158.

УДК 528.8.04, 528.88

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЕСТЕСТВЕННОЙ И ЛЕСОПАРКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О. А. Васильева, Е. Н. Кулик
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
e-mail: jkz129@mail.ru
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

DYNAMICS ANALYSIS OF NATURAL AND WOODLAND-PARK VEGETATION BASED ON REMOTE SENSING

O. A. Vasileva, E. N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: jkz129@mail.ru

В статье рассмотрены основные технологии обработки данных дистанционного зондирования для проведения анализа и оценки динамики лесопарковой и естественной растительности.

Ключевые слова: спектральные характеристики, многозональная съемка, вегетационные индексы.

В условиях глобальных изменений одной из наиболее актуальных является задача исследования динамики растительного покрова. Незаменимую информацию для ее решения, безусловно, дают системы дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать объективную устойчивую информацию наблюдения всех регионов Земли.

В современном мире лесные массивы являются важнейшим компонентом биосферы, производителем биомассы и кислорода. Леса играют значительную роль как стабилизатор природной среды.

Во многих развитых городах мира экологическая ситуация является предметом особого внимания властей всех уровней, средств массовой информации и общественных движений. Не является исключением и крупный административный центр Сибирского федерального округа – город Новосибирск, занимающий территорию около 505,62 км², с численностью населения 1 567 087 человек [1].

С экологической точки зрения город Новосибирск имеет непростую инфраструктуру. В городе находится большое количество промышленных производств, фабрик, протяженная сеть автомобильных дорог.

В связи с многочисленными вырубками, лесными пожарами, потерями лесных запасов углерода, а также ролью лесов в изменении климата вопрос мониторинга состояния лесов является остроактуальным на сегодняшний день в большинстве стран мира.

Целью данного исследования является анализ динамики естественной и лесопарковой растительности Новосибирской области и ее отдельных районов.

Общая цель работы определила следующие задачи:

– Провести сравнительный анализ растительности за указанные периоды времени как по области в целом, так и по отдельным административным районам.

– Получить данные по обеспеченности области и административных районов города Новосибирска зелеными насаждениями.

– Рассчитать общую площадь зеленых насаждений Советского района.

С учетом значительной территории Новосибирской области, произвести анализ растительности традиционными наземными методами весьма затруднительно, поэтому для достижения указанной цели используются данные дистанционного зондирования Земли.

Мониторинг лесов – это система наблюдений, оценки и прогноза состояния и динамики лесного фонда.

На рис. 1 показана типовая схема обработки ДДЗ с использованием ГИС-технологий. Стадии обработки цифровых данных выделены специально, поскольку на этих этапах обработки объем данных, участвующих в обработке, много больше, чем при геоинформационном моделировании.

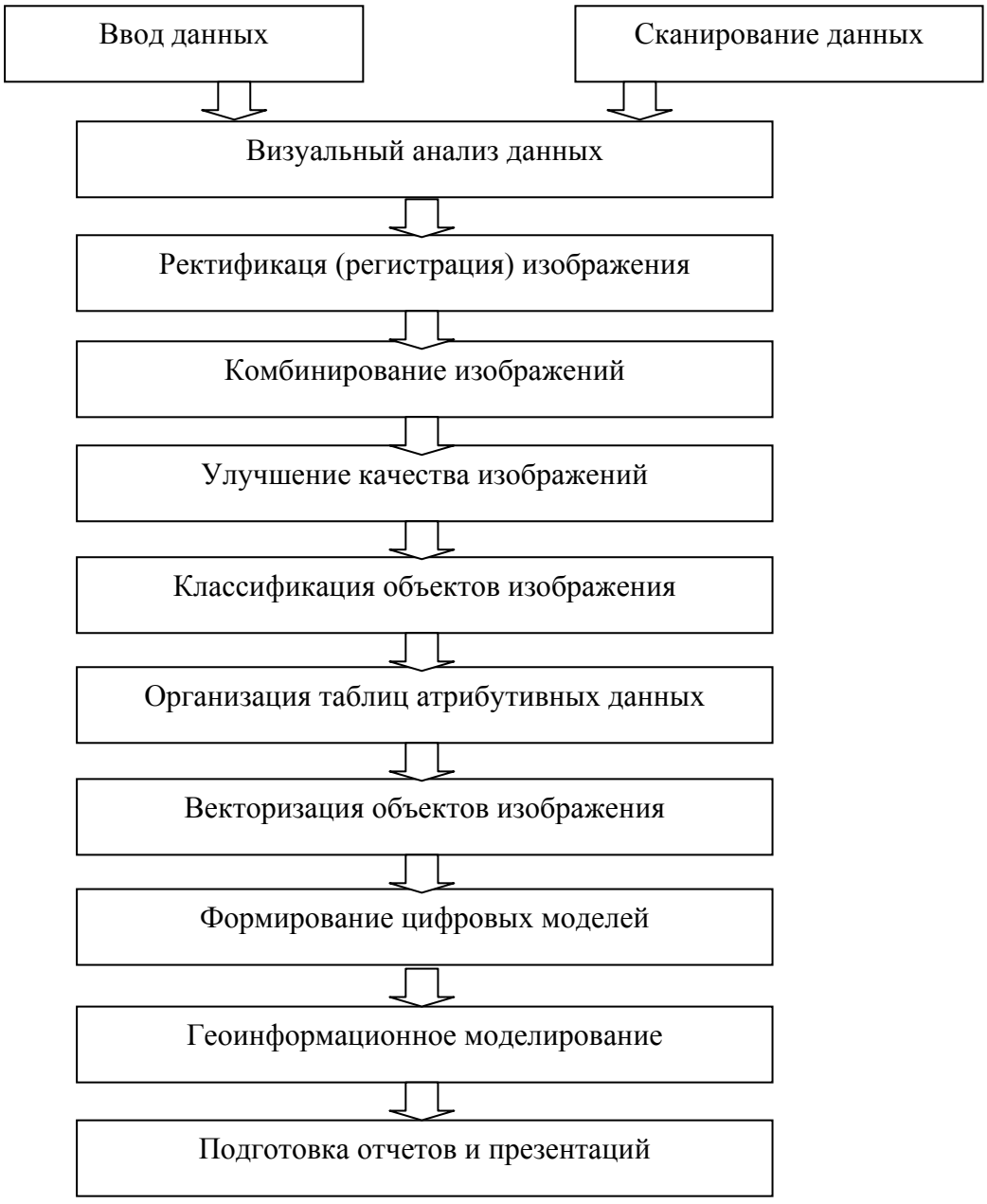


Рис. 1. Технологическая схема обработки данных дистанционного зондирования с использованием ГИС-технологий

В качестве исходных данных в работе использовались архивные мультиспектральные космические изображения, полученные с космических аппаратов

Landsat 5, Landsat 7 и Landsat 8, на периоды активной вегетации (июнь–август) 2003–2014 годы [2, 3].

Картографическая основа в виде растровых изображений отдельных геопривязанных листов карт была взята с сервиса Google maps и использовалась для выбора точек, принадлежащих полигонам растительности [4].

В качестве программного обеспечения использовались: программный продукт ERDAS Imagine, приложение SAS. Планета.

Кроме вышеперечисленных исходных данных, в ходе работы использовались данные электронных карт Новосибирска и Новосибирской области и статистические данные, содержащие общую информацию по городу, районам города и всей области в целом [4, 5].

Была проведена обработка мультиспектральных космических изображений и построены графики динамики вычисленной яркости растительности, приведенные на рис. 2, отражающие состояние зеленого фонда города Новосибирска и Искитимского района за указанный период (2003–2014 гг.).

На рис. 3 показан график динамики вычисленной яркости растительности для Новосибирской области. В целом здесь мы видим стабильный рост показателей, а следовательно, состояние биомассы улучшилось.



Рис. 2. График динамики вычисленной яркости растительности для Искитимского района и города Новосибирска



Рис. 3. График динамики вычисленной яркости растительности для Новосибирской области

На рис. 4 представлен график изменения численности населения Новосибирской области, Искитимского района и города Новосибирска. Численность населения выросла незначительно, что дает возможность сделать вывод, что обеспеченность зелеными насаждениями на душу населения возросла.

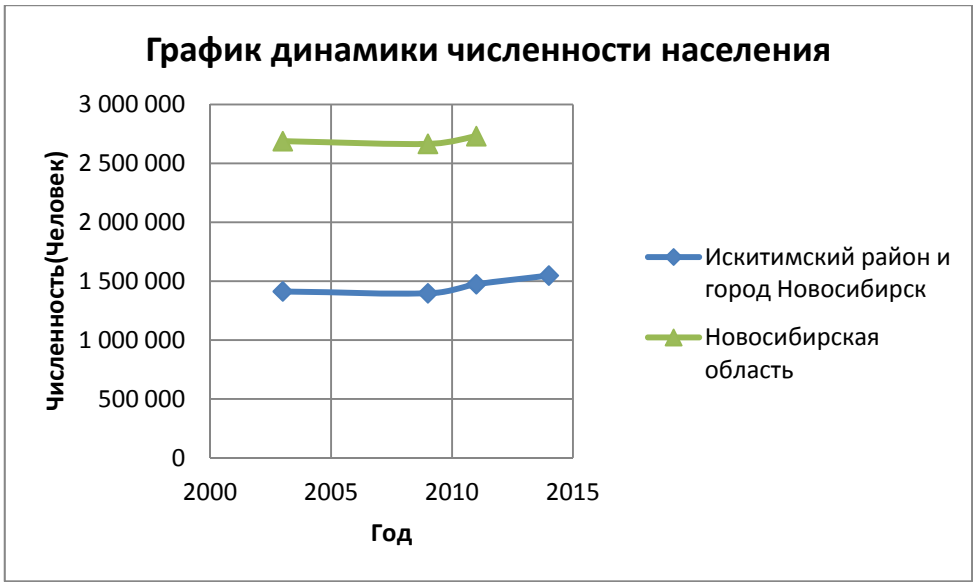


Рис. 4. График динамики численности населения в Новосибирской области, Искитимского района и города Новосибирска

Анализ полученных данных показал, что ситуация в городе и по области в целом изменилась в лучшую сторону. Необходимо отметить, что большим преимуществом Новосибирска перед другими городами является все еще сохранившиеся достаточно обширные территории лесов, именуемые зеленой зоной города, которые благотворно влияют на оздоровление городской атмосферы. Огромные площади зеленых насаждений на правом берегу Новосибирска оказывают благотворное влияние на экологическую ситуацию в черте города. Численность населения по Новосибирской области возросла лишь на 42 753 человека, что для области незначительно [5]. Лесные массивы же, в свою очередь, увеличились, что способствует благоприятной экологической обстановке в области и в отдельных городах.

Для подтверждения возможностей технологии оценки растительности по космическим снимкам проведен детальный анализ ситуации в Советском районе города Новосибирска.

Полученные данные мониторинга позволяют сделать следующие выводы:

За период с 2003 по 2009 год площадь лесов в Советском районе стала меньше, произошла вырубка и застройка некоторых лесных территорий. За период с 2009 по 2014 год (рис. 5) произошло большое сокращение лесных площадей за счет строительства новых городских сооружений. Построен новый крупный жилой комплекс на проспекте Коптюга, возведен новый корпус Новосибирского государственного университета. Помимо сокращения площадей желательно учесть состояние сохранившегося леса – в Академгородке, по данным специалистов Центрального сибирского ботанического сада, многие деревья находятся в неудовлетворительном состоянии и подлежат замене [6].

Анализируя графики, приведенные на рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что общая площадь зеленых насаждений уменьшилась, и, поскольку число жителей возросло почти на 7 тысяч человек, обеспеченность зелеными насаждениями на душу населения также снизилась.



Рис. 5. Маска естественной и лесопарковой растительности Советского района города Новосибирска за 2003–2014 год



Рис. 6. График динамики численности населения Советского район города Новосибирска

Из полученных результатов можно сделать вывод, что ситуация в Новосибирской области и в городе Новосибирске в целом изменилась в лучшую сторону. Состояние биомассы растительности улучшилось, и, поскольку число жителей возросло незначительно, показатели обеспеченности зелеными насаждениями на душу населения также возросли.

Проведенный анализ расчета площади растительности в Советском районе показал не самые хорошие результаты. Общая площадь зеленых насаждений уменьшилась, и, поскольку число жителей возросло, обеспеченность зелеными насаждениями на душу населения снизилась.

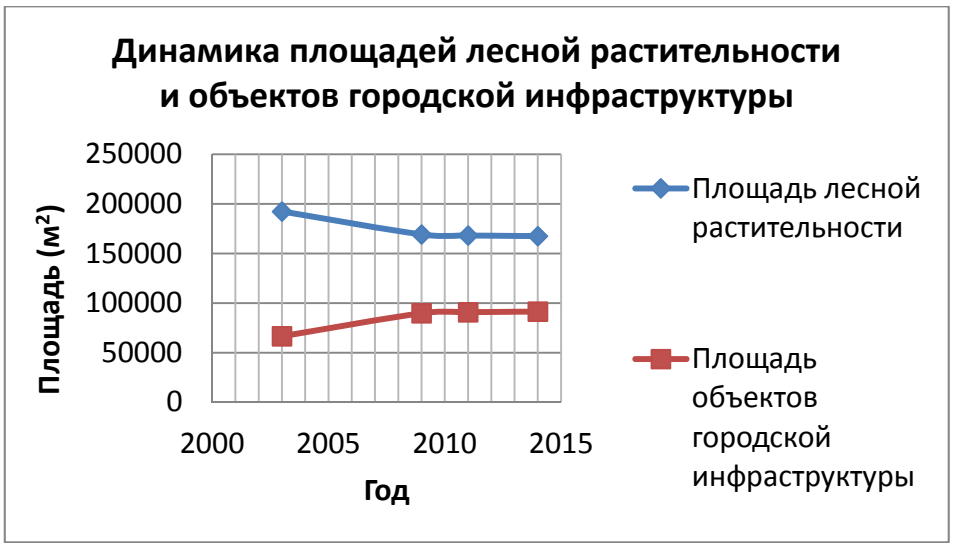


Рис. 7. График динамики площадей лесной растительности и объектов городской инфраструктуры Советского района города Новосибирска

Выполненные расчеты позволили оценить существующее положение и динамику развития естественной и лесопарковой растительности. Кроме того, предоставленные материалы могут использоваться при планировании и размещении новых зеленых насаждений, выявлении лесных пожаров, зараженных деревьев, лесных вырубок, проблемных территорий.

При наличии многозональных снимков более высокого пространственного разрешения появится возможность более точно определять площади, занятые растительностью, также более детально определять её состояние и состав как для области, так и для локальных объектов.

Список литературы

1. Общие сведения и описание Новосибирска [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://xn----7sbiew6aadnema7p.xn--p1ai/sity_id.php?id=3

2. USGS [Электронный ресурс]: U.S. Geological Survey – EarthExplorer / U.S. Department of the Interior. Режим доступа: http://earthexplorer.usgs.gov

3. USGS [Электронный ресурс]: U.S. Geological Survey – Landsat Missions / U.S. Department of the Interior. Режим доступа: http://landsat.usgs.gov

4. Google [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.google.ru/maps/

5. База данных показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst50/DBInet.cgi?pl=8112027

6. Комментарии к аналитическому отчету ЦСБС [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.balatsky.ru/Akadem/rubkom.htm

УДК 528.88

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НОВЕЙШИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ СЕВЕРА ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

М. Г. Вахнин
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
e-mail: oilkominc@mail.ru

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF GEOSPATIAL DATA IN THE STUDY OF TECTONIC PROCESSES AND OIL AND GAS POTENTIAL OF THE NORTH OF THE TIMAN-PECHORA OIL-GAS-BEARING PROVINCE

M. G. Vakhnin
Institute of Geology of Komi SC UB RAS
e-mail: oilkominc@mail.ru

В работе рассматривается изучение новейших тектонических процессов с использованием данных космических съемок в комплексе с геофизическими и геологическими данными в геоинформационной системе по территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Оценивается влияние новейшей тектоники на структурообразование, характер глубинного строения территории, миграцию и формирование залежей углеводородов в провинции.

Ключевые слова: космические снимки, новейшие тектонические процессы, линеаменты, структуры, месторождения углеводородов, геоинформационные системы.

Введение

При прогнозировании нефтегазоносных территорий, кроме традиционных и дорогостоящих методов изучения, таких как сейсморазведка и бурение, рационально использовать данные дистанционного зондирования, являющегося перспективным направлением исследований, дающим возможность проводить предварительное или уточняющее районирование территории с использованием недорогих, но достаточно информативных космических снимков. Геоинформационные технологии позволяют анализировать данные дистанционного зондирования совместно с геологическими, геохимическими и геофизическими данными.

Методы и данные

По территории севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТП НГП) с использованием данных космических снимков проводилось структурное дешифрирование, расшифровка структурного плана, выделение наиболее перспективных объектов для поиска месторождений углеводородов. Космические снимки применялись совместно с геоинформационной системой, содержащей данные по геологическому строению, данные о глубинном строении территории, структурные карты по отражающим горизонтам, карты месторождений и локальных структур, топографическую основу. С использованием данных дистанционного зондирования дешифрировались новейшие разрывные нарушения, одним из проявлений которых являются линеаменты, позволяющие выделять участки, перспективные для поиска месторождений нефти и газа [1]. Дополнительно выделялись кольцевые и дугообразные объекты, соответствующие по морфологии и площади локальным

поднятиям, которые могли быть объектами для накопления и сохранения углеводородов.

Фактический материал исследования – линейные объекты, выделяемые по синтезированным снимкам Landsat 7 и 8 с использованием визуального дешифрирования.

Длина выделяемых линейных объектов (линеаментов) колебалась от нескольких километров до десятков километров. Выделенные линеаменты были объединены с геологическими и геофизическими данными в геоинформационную систему для комплексного анализа.

Наиболее четко на космических снимках выделяются линеаменты, имеющие неотектоническую природу и являющиеся признаками разломов. Так как данные объекты влияют на мерзлотную характеристику пород, на поверхности наблюдается изменение физико-химических свойств пород, что в итоге отражается на эрозионных свойствах и характере растительности. С другой стороны, выделенные дугообразные линейные объекты могут служить дешифровочными признаками неотектонических структурных форм и нефтегазоносных локальных структур.

В пределах однородных по геологическому строению участков по космическим снимкам рассчитывались значения для структурных рисунков линеаментов. Для количественного описания структурной сети линеаментов применялись следующие параметры: плотность, средняя длина, изотропность, розы-диаграммы.

После выделения линеаментов, расчета их размеров, простираний и анализа структурного рисунка были составлены соответствующие таблицы длин и простираний линеаментов для тектонических элементов и всей территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Дополнительно рассчитывались значения анизотропии, в качестве единицы измерения анизотропности распределения линеаментов использовалась их векторная сумма. Затем рассчитывались общая плотность и плотности линеаментов различного простирания, построены розы-диаграммы простираний и определена анизотропность распределения линеаментов по их векторной сумме по мегаблокам ТП НГП. При изотропном (неупорядоченном) распределении линеаментов их векторная сумма равна нулю или близка к нему, а при анизотропном (упорядоченном) значительно отличается от нуля [2]. Нахождение значений анизотропии полученных линеаментов для тектонических элементов основывалось на сравнении суммарных длин взаимно перпендикулярных систем линеаментов [3].

С использованием данных дистанционного зондирования проводилось сравнение современного структурного плана с более древними палеозойскими, построенными по данным геофизических исследований, в которых сосредоточена основная масса скоплений углеводородов. Данный метод предусматривает последовательность выделения объектов путем выявления на космических снимках закономерных соотношений в распределении структурного плана, характерных особенностей для неотектонического и глубинного строения территории.

Основные результаты

Для ТП НГП установлено блоковое строение территории. Был выделен Тимано-Печорский геоблок, состоящий из мегаблоков с принадлежащими к ним нефтегазоносными областями [4].

При анализе новейших разрывных нарушений установлена закономерность между плотностью линеаментов, степенью анизотропии и характером мегаблоков. Максимальная плотность линеаментов отмечена в подвижных мегаблоках, что свидетельствует о повышенной неотектонической активности данных районов. Также можно наблюдать, что подвижные мегаблоки имеют повышенную степень анизотропии распределения линеаментов (таблица).

По изучаемой территории преобладает северо-западное и северо-восточное простирание линеаментов, данные направления хорошо согласуются с планетарной трещиноватостью. Вблизи от зон разновозрастных глубинных разломов наблюдается увеличение плотности линеаментов. Прослеживается зависимость между увеличением плотности линеаментов и концентрацией нефтегазоносных локальных структур в разломных зонах, связанных, по-видимому, с современными неотектоническими процессами. Учет этих закономерностей может быть полезным при поисковых работах на нефть и газ и позволит более эффективно проводить разведку месторождений углеводородов.

Таблица

Основные характеристики линеаментов нефтегазоносных областей

Мегаблоки ТП НГП	Характеристики линеаментов		
	Плотность линеаментов, шт./100 км^2	Средняя длина, (км)	Степень анизотропии
Тиманский	6,8	5,2	0,61
Ижма-Печорский	6,4	4,8	0,43
Печоро-Колвинский	9,4	4,2	0,62
Большеземельский	6,5	6,3	0,60
Предновоземельский	8,5	5,7	0,65
Северо-Предуральский	7,5	5,2	0,62

По структурному рисунку, построенному по результатам дешифрирования космоснимков, выделялись неотектонические поднятия и анализировалась их связь с нефтегазоносностью. Для отдельных районов прослежена связь современного структурного плана и более древних отложений. Например, в районе Харьягинского месторождения, одного из крупнейших в ТП НГП, расположенного на подвижном Печоро-Колвинском мегаблоке, по структурному рисунку рельефа при дешифрировании космических снимков Landsat 7, 8 хорошо выделяется сводовое поднятие в районе месторождения. Также достаточно уверенно дешифрируются линеаменты, связанные с разрывными нарушениями. На рисунке показан пример структурно-геоморфологического дешифрирования неотектонически активной структуры, которая отражает сводовую часть нефтяного месторождения (рисунок).

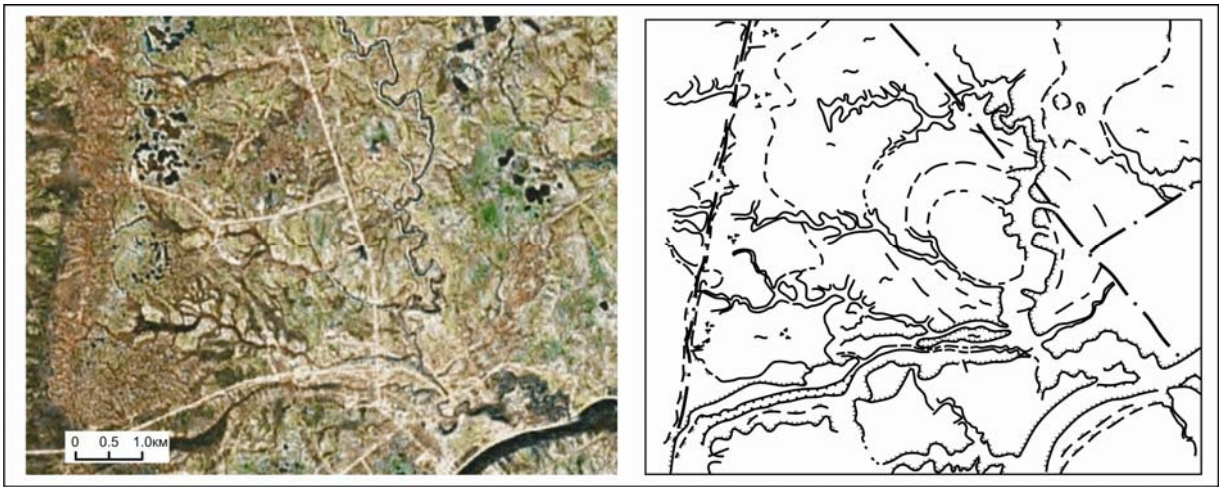


Рис. Дешифрирование космического снимка Landsat-7 структурного осложнения сводовой части месторождения

Заключение

При изучении новейших разрывных нарушений (линеаментов) ТП НГП установлено, что плотность и степень анизотропии их различается для стабильных и подвижных мегаблоков. Для подвижных мегаблоков характерна более высокая плотность новейших разрывных нарушений и более высокое значение анизотропии, что отражает более подвижный фундамент платформенного чехла, а более высокая анизотропия является отражением тангенциального воздействия на мегаблоки со стороны Уральского кряжа и Пай-Хоя. Модели структурных рисунков, выделенных для детально изученных нефтегазоносных районов, можно использовать на слабо изученных площадях, обладающих сходными признаками геологического строения. Изменение характера структурного рисунка для разных участков свидетельствует об изменении структурного плана территории, что позволяет применять эти данные для исследования слабоизученных территорий и прогноза нефтегазоносности.

Работа выполнена при поддержке программ фундаментальных исследований УрО РАН «Закономерности размещения и условия формирования скоплений углеводородов в осадочных толщах Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции» *(проект № 15-18-5-21)*.

Список литературы

1. Башилов В.И., Богородский С.М., Козлов В.В. Комплексное использование данных аэрокосмических и геофизических исследований при поисках месторождений нефти и газа // Геотектоника Европейского Северо-Востока СССР: тр. X Геол. конф. Коми АССР. Сыктывкар, 1988. С. 78–80.

2. Ульмасвай Ф.С., Налимова Н.А., Добрынина С.А. Локальная геодинамика северного Сахалина по результатам анализа линеаментов // ДАН. 2006. Т. 409, N 6. С. 793–794.

3. Кукушкин Д.А., Ян Г.Х. Некоторые вопросы методики анализа линеаментов (по данным дешифрирования космических снимков) // Исследования Земли из космоса. 1983. № 1. С. 51–56.

4. Вахнин М.Г. Влияние блокового строения Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна на морфологические свойства локальных структур // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2010. № 5. С. 2–5.

УДК 528.852.8:528.8.044.1

ОБРАБОТКА ДАННЫХ SENTINEL-1A ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНАХ

О. Л. Гиниятуллина, Л. С. Миков
Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал)
E-mail: skiporol@mail.ru
E-mail: mikov@ict.sbras.ru

Рассмотрен подход к обработке спутниковых радарных данных с космического аппарата Sentinel-1A. Продемонстрировано применение методов радарной интерферометрии для обработки таких данных за 2015 г. на территории таких горнопромышленных регионов, как Кемеровская и Мурманская области.

Ключевые слова: радарные данные, Sentinel-1A, интерферометрия малых базовых линий, радарная интерферометрия, деформации земной поверхности.

В настоящее время в коммерческих и научных проектах по мониторингу смещений земной поверхности в местах добычи полезных ископаемых широко используются радиолокационные данные со спутников Cosmo-SkyMed и ALOS PALSAR [1–3]. В отличие от данных с этих спутников, новые данные Sentinel-1A пока не нашли широкого применения. Это связано с несколькими причинами. Во-первых, съемка одной и той же территории происходит раз в 12 дней (Cosmo-SkyMed – 6–7 дней). Во-вторых, поставляемые изображения требуют наличия специального ПО для предварительной обработки (фокусировка, импорт в формат, пригодный для дальнейшей работы). В-третьих, КА Sentinel-1A снимает с разрешением 5x20 м/пиксель и шириной полосы съемки 240 км (Cosmo-SkyMed – 3 м/пиксель, 40 км), что накладывает некоторые ограничения на уровень детализации результатов обработки.

Радарные снимки Sentinel-1A поставляются в формате Interferometric Wide Swath (IWS). Такие снимки представляют собой сцену, состоящую из 3 полос, каждая из которых включает 9 фрагментов. При предварительной обработке каждый фрагмент записывают в отдельный файл, что удобно при дальнейшей работе, так как не требуется вручную вырезать отдельный район интереса из целого снимка.

В конце 2014 – начале 2015 г. на территории России начали появляться первые радарные снимки Sentinel-1A, пригодные для обработки (продукт типа SLC) [4]. В качестве объекта исследования выбрана Мурманская область, а именно район города Ковдор. Здесь находится крупное месторождение железной руды, добыча которой происходит открытым способом. Общий объем добычи составляет 16 млн т в год [5].

Таким образом, добыча полезных ископаемых в столь большом объеме оказывает огромное влияние на состояние земной поверхности. Для оценки такого влияния разработан подход к обработке многопроходной серии радарных изображений Sentinel-1A, основанный на технологии малых базовых линий (SBaS). Данная технология позволяет выявить деформации земной поверхности, вызванные интенсивной добычей полезных ископаемых в исследуемом районе, а также определить среднюю скорость их изменения в мм/год.

Многократная съемка исследуемого района космическим аппаратом Sentinel-1A с интервалом 12 дней позволила сформировать набор из 12 снимков с разрешением 5x20 метров/пиксель за период с 28.03.2015 по 07.08.2015 гг. Вся обработка производилась в программном комплексе SARscape 5.2.

По результатам обработки многопроходной серии радарных изображений с помощью технологии SBaS получена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности в виде векторного файла (рис. 1). Данный файл содержит 49 198 точек, у каждой из которых есть набор атрибутов, таких как дата, координаты, средняя скорость изменения смещений земной поверхности, значение когерентности и другие.

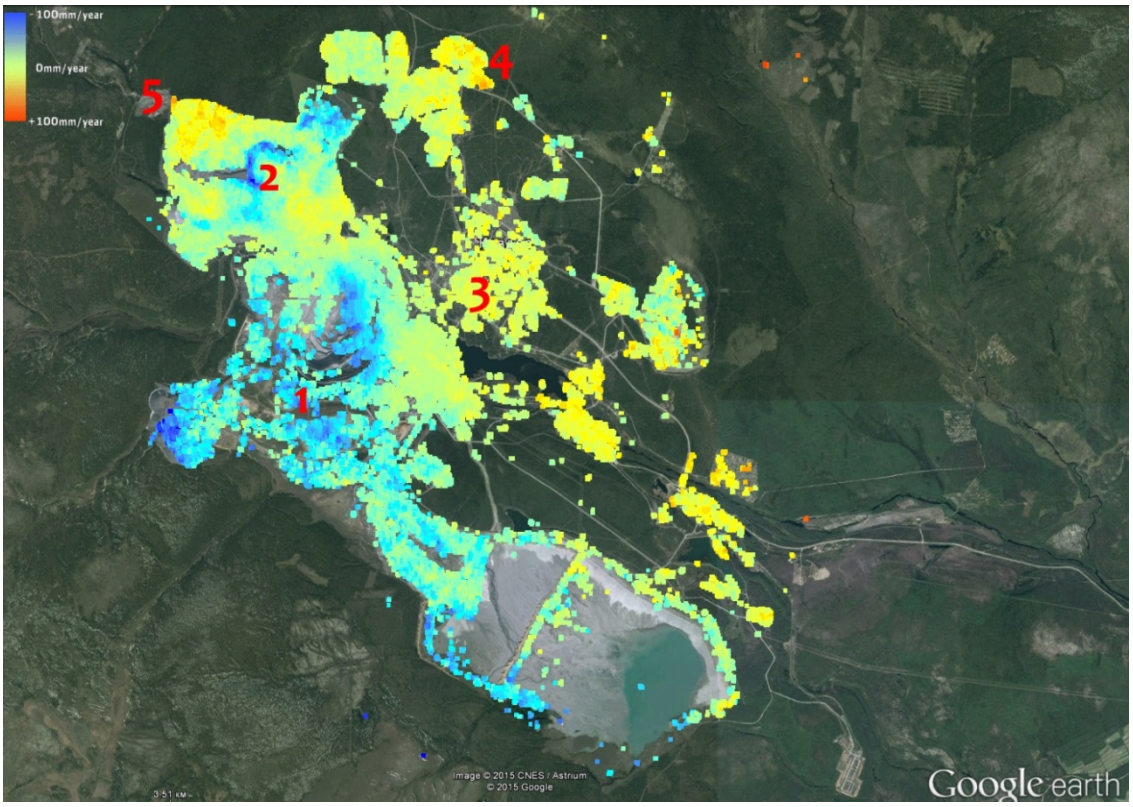


Рис. 1. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений. 28.03.2015–07.08.2015

Разработанный подход позволил выявить несколько участков, на которых регистрируется постоянное оседание земной поверхности (синие точки) – южный склон карьера (1) и центральный участок отвала (2). Участок под городской застройкой (3) довольно стабильный. Итоговые значения средних скоростей вертикальных смещений за 132 дня составили от –131,16 мм/год (оседания) до 107,91 мм/год (поднятия), а итоговые значения самих смещений за этот же период – 515 мм (оседания) до 503 мм (поднятия). Поднятия земной поверхности, связанные с увеличением высоты отвалов, фиксируются на участках (4) и (5), а оседания – в непосредственных местах добычи полезных ископаемых.

Отметим, что технология SBaS позволяет выявить и оценить вертикальные смещения земной поверхности с миллиметровой точностью (погрешность составляет 3–5 мм). Кроме того, эта технология позволяет провести оценку смещений на большой территории (несколько сотен квадратных километров) за относительно короткий промежуток времени (обработка 12 снимков заняла около 3 часов), что, в свою очередь, снижает финансовые (данные поставляются бесплатно), трудовые и временные затраты по сравнению с традиционными наземными измерениями деформаций земной поверхности [6].

Исследуемый район характеризуется высокой техногенной нагрузкой, значения вертикальных смещений за 132 дня достигают полуметра. Все это показывает целесообразность осуществления постоянного мониторинга с применением технологии SBaS. Кроме того, полученные результаты позволяют оценить геодинамическую обстановку в регионе и влияние горного производства на окружающую среду. Спутниковый мониторинг вертикальных смещений совместно с земными измерениями может служить основой для последующей разработки природоохранных мероприятий.

В конце сентября 2015 года появились SLC-изображения с КА Sentinel-1A на территорию Кемеровской области. Однако снимков для обработки технологией SBaS пока недостаточно. На данный момент имеется интерферометрическая пара снимков за 23.09.2015 и 05.10.2015. В качестве исследуемого района выбран район поселка Кедровка. В непосредственной близости к поселку находится Кедровский угольный разрез.

Обработка двух снимков проводилась методом дифференциальной интерферометрии. В результате была получена карта вертикальных смещений (рис. 2).

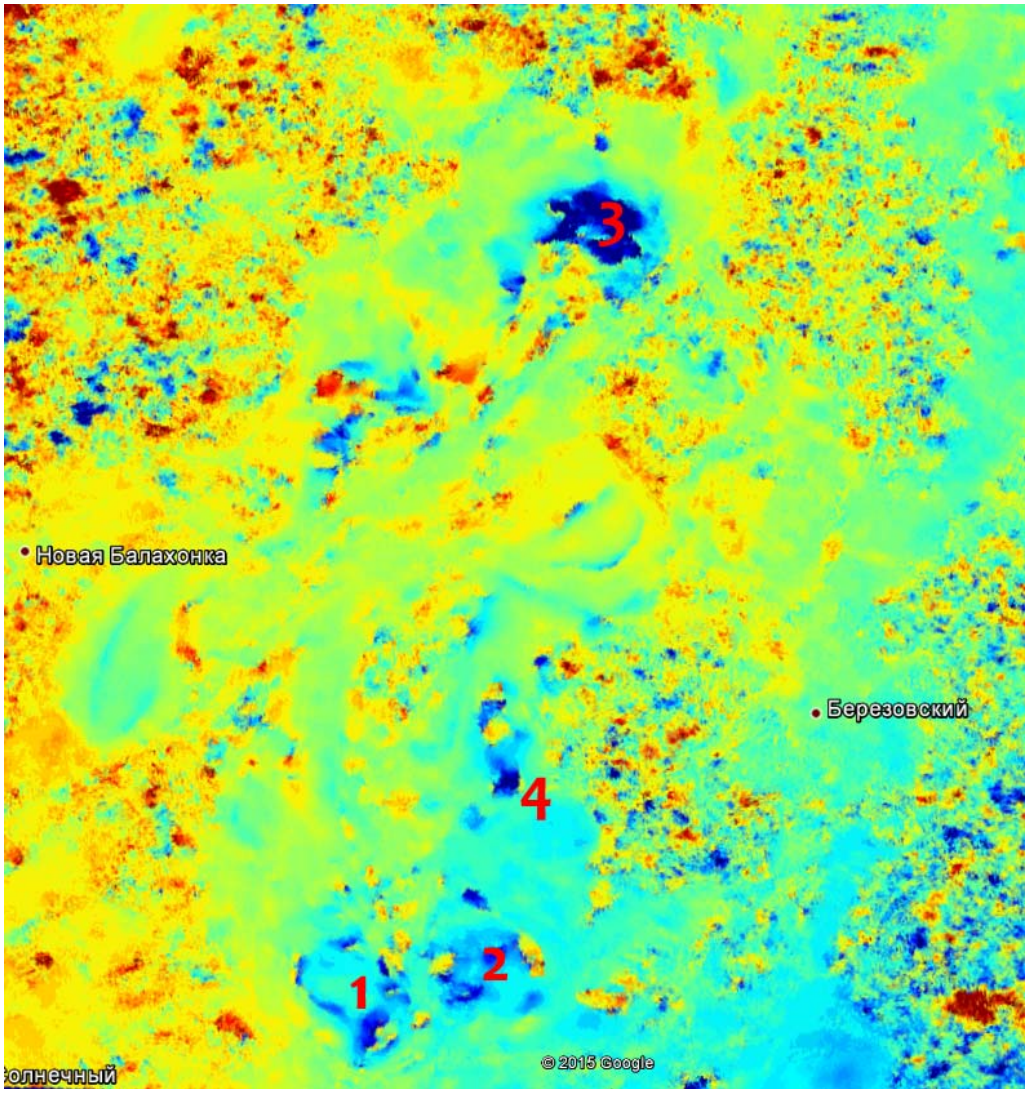


Рис. 2. Карта вертикальных смещений. 23.09.2015–05.10.2015

Метод дифференциальной интерферометрии позволил выявить участки (1–4) оседания земной поверхности (синий цвет). Все эти участки находятся в карьерах, в

которых ведется добыча угля открытым способом. Итоговые значения смещений за 12 дней составили от –8,2 см (оседания) до 6,9 см (поднятия).

Построенная карта вертикальных смещений по данным космической радиолокационной съемки даже за такой короткий срок – 12 дней – показывает возможность оперативного решения проблемы определения деформаций земной поверхности для региона (просадки земной поверхности достигают 8 см) и необходимость осуществления постоянного мониторинга с применением технологий радарной интерферометрии не только на территории угледобывающих городов Кузбасса, но и других горнопромышленных регионов.

Список литературы

1. Жантаев Ж.Ш., Фремид А.Г. Космически радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз // Геоматика. 2012. № 1. С. 61–72.

2. Пиетранера Л., Чезарано Л., Кантемиров Ю.И. Пример мониторинга ледовой обстановки и судоходства в замерзшей акватории Азовского моря в Керченском проливе по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. № 1. С. 72–77.

3. Татьков Г.И. Применение спутниковой радарной интерферометрии ALOS PALSAR для картирования ареалов распространения и измерения интенсивности криогенного пучения грунтов // Инженерные изыскания. 2012. № 9. С. 28–34.

4. SentinelsDataHub [Электронный ресурс]. URL: https://scihub.esa.int/dhus/

5. Ковдорский ГОК – EuroChem [Электронный ресурс]. URL: http://www.eurochemgroup.com/what-we-do/production/kovdorskiy-gok/

6. Гиниятуллина О.Л., Миков Л.С. Использование технологии SBaS для обработки многопроходной серии радарных изображений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». Т 8. № 6. Красноярск: СФУ, 2015. С. 755–762.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОССИЙСКИХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛЕСНЫХ РЕГИОНОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРОВ

Е. А. Григорец, Л. И. Пермитина
АО «Российские космические системы»
e-mail: gea@ntsomz.ru
e-mail: permitina@ntsomz.ru

Продемонстрированы возможности использования российских данных дистанционного зондирования Земли при проведении многолетних спутниковых наблюдений для контроля и оценки динамики восстановления эколого-ресурсного потенциала территорий, подвергшихся воздействию лесных пожаров, на базе оценки объема потерянной биомассы и скорости восстановления растительности.

Ключевые слова: эколого-ресурсный потенциал, лесные пожары, дистанционное зондирование Земли, космический мониторинг, восстановление биомассы, фитомасса, пожароопасная обстановка, оценка объема потерянной биомассы, NDVI.

В связи с непрерывным развитием и модернизацией космических технологий, в частности в сфере дистанционного зондирования Земли, и невозможностью полного предупреждения риска возникновения таких масштабных экологических бедствий и катастроф, как лесные пожары, является актуальным совершенствование метода космического мониторинга пожароопасных ситуаций с целью поиска новых, более эффективных подходов к изучению причин возникновения пожаров и оценки их последствий [1].

Цель работы – изучить возможность применения космических средств дистанционного зондирования для оценки динамики восстановления биомассы территории, пострадавшей в результате воздействия лесных пожаров.

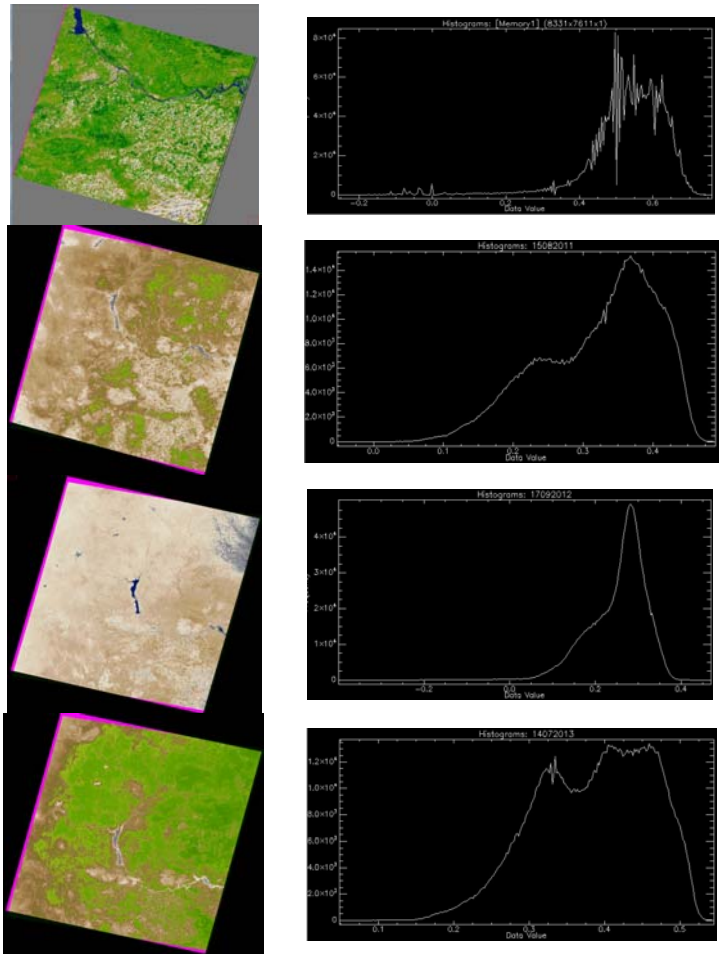
Исследуемый объект располагается на территории Борского и Лысковского района Нижегородской области (рис. 1). Данная область в значительной степени повреждена в результате воздействия катастрофически крупных пожаров в 2010 г. Лесные ресурсы данного объекта занимают 40–45 % территории, отличаются преобладанием хвойных пород деревьев и составляют 2 % от всех лесных запасов России, что является высоким показателем, так как их большая часть сосредоточена на востоке страны (Сибирь и Дальний Восток).



Рис. 1. Карта географического положения исследуемой территории

С целью расчета количества восстанавливающейся растительной биомассы на территории в рамках исследования применен нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), основанный на спектральных свойствах растительности [2].

В качестве исходных использованы данные, полученные в июле–сентябре 2009, 2010, 2011, 2012 и 2013 гг. аппаратурой КМСС со спутника «Метеор-М» № 1 (предоставлены Научным центром оперативного мониторинга Земли, АО «Российские космические системы») и данные Landsat-5 (http://glovis.usgs.gov/index.stml). Обработка данных произведена с использованием следующих программ: ERDAS Imagine, ENVI, ArcGIS.



Карта и гистограмма на основе индекса NDVI № 1. Landsat-5 (10 августа 2009 г.)

Карта и гистограмма на основе индекса NDVI № 2. «Метеор-М» № 1 (15 августа 2011 г.)

Карта и гистограмма на основе индекса NDVI № 3. «Метеор-М» № 1 (17 сентября 2012 г.)

Карта и гистограмма на основе индекса NDVI № 4. «Метеор-М» № 1 (14 июля 2013 г.)

Рис. 2. Построение карт и гистограмм на основе NDVI исследуемой территории

С использованием результатов анализа гистограмм на основе NDVI (рис. 2) и справочных данных официальных документов Рослесхоза, IISS (Международный институт прикладного системного анализа), лесного плана Нижегородской области, паспортов Борского и Лысковского районов Нижегородской области произведен усредненный количественный расчет прироста биомассы на выгоревшей территории с 2011 по 2013 г. (табл. 1).

Зная объем фитомассы, приходящейся на каждый из районов, и площадь лесов каждого района, произвели расчет количества фитомассы на единицу площади. В дальнейшем производился суммарный расчет значений фитомассы по обоим районам, площади лесов и фитомассы на единицу площади.

Аппаратура КМСС космического аппарата «Метеор-М» № 1 имеет пространственное разрешение 60 м, то есть один пиксель соответствует площади 3600 м^2 территории съемки. Для удобства дальнейшего расчета было принято решение рассчитать количество фитомассы на участок, соответствующий площади одного пикселя:

$$Ф_{3600} = \frac{9\,928{,}9 \cdot 3\,600\,м^2}{10\,000\,м^2} = 3\,574{,}4\,т.$$

Таким образом, на один пиксель снимка приходится около 3574,4 т фитомассы.

Таблица 1

Площадь территории и объем фитомассы Нижегородской области, Борского и Лысковского районов Нижегородской области [3]

Территория	Площадь территории (S), км^2	Площадь лесной территории (S), км^2	Фитомасса территории (Ф), т
Нижегородская область (НО)	76 900	37 580	418 220 000
Борский район (Б)	3584	2509	19 491 553,71
Лысковский район (Л)	2134	960	11 605 740,96

Важно учитывать, что данное значение характерно для идеального состояния растительности на территории, следовательно, необходимо провести градацию количества фитомассы в зависимости от значения NDVI:

- 0,1–0,3 – <100/3600 т/м^2;
- 0,3–0,4 – 1500/3600 т/м^2;
- 0,5–1 – 2500–3574,4/3600 т/м^2.

В качестве эталонного значения NDVI, на уровне которого в дальнейшем производилось сравнение, взято значение 0,4, что соответствует количеству фитомассы, равному 1500 т на пиксель, и удовлетворительному состоянию растительного покрова.

В дальнейшем проведены расчеты общей массы растительности для каждого года (табл. 2, рис. 3), основанные на произведении количества пикселей, соответствующих значению NDVI, равному 0,4, площади одного пикселя (0,0036 км^2) и эталонного значения количества фитомассы, на уровне которого в дальнейшем производилось сравнение (1500 т).

Таблица 2

Объем фитомассы исследуемого объекта по годам

Год	Объем фитомассы, т
2011	33 760
2012	38 372
2013	45 900

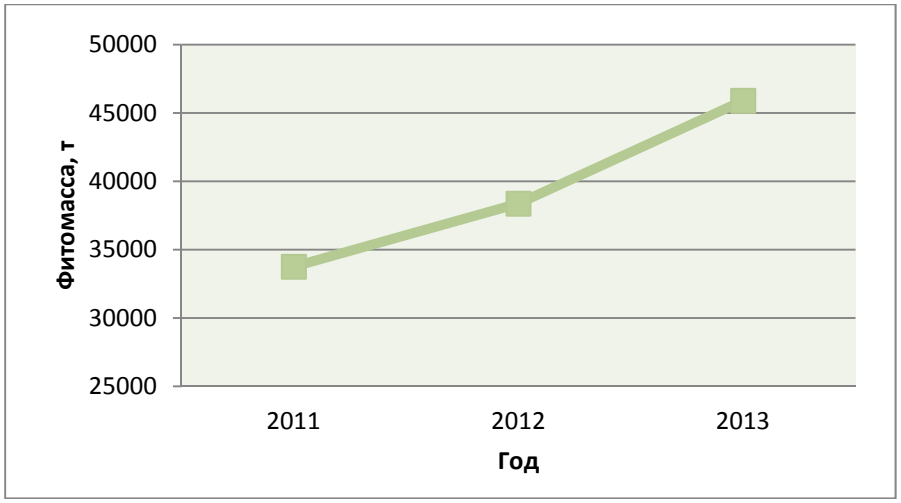


Рис. 3. График изменения количества фитомассы с 2011 по 2013 г.

Увеличение фитомассы с 2011 по 2012 г. составило 4612 т, а с 2012 по 2013 г. – 7528 т.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов можно выявить увеличение биомассы лесной растительности на исследуемой территории за три года, прошедших после катастрофически крупных пожаров 2010 г., что свидетельствует о положительной динамике восстановления эколого-ресурсного потенциала лесных хозяйств на территории Нижегородской области. Предлагаемая методика позволяет оценить состояние и эколого-ресурсный потенциал, биомассу (в частности фитомассу) территории и ее продуктивность с использованием российских данных ДЗЗ.

Список литературы

1. Brown, James K.; Smith, Jane Kapler, eds. 2000. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 2. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 257 p.

2. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3 (4). С. 28–32.

3. IIASA's Global Forest Database (GFD) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/modelsData/GlobalForestDB.en.html

УДК 630.58.02+528.8

CLASSIFICATION AND ESTIMATION OF VEGETATION COVER SPATIAL DIVERSITY USING DIGITAL ELEVATION MODEL AND SATELLITE IMAGERY

I. V. Danilova, V. A. Ryzhkova, M. A. Korets
V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Science
e-mail: tiv80@mail.ru

An algorithm of vegetation regeneration dynamics mapping based on a spatial analysis of Landsat TM/ETM/OLI satellite imagery, a digital elevation model (DEM), and field data was applied using geographic information system (GIS). Based on this algorithm, maps of vegetation types and vegetation growing conditions were build for the Northern Siberia test sites (Taimyr Forest Tundra Ecoregion). The spatial combination of this two maps was used for extrapolation and mapping of ecosystem carbon stock values (kgC/m^2).

Key words: remote sensing data, digital elevation model, geographic information system, vegetation mapping, Northern Siberia.

Introduction

Continuously increasing anthropogenic impacts on the environment have resulted in a decrease of areas occupied by native undisturbed ecosystems. Vegetation cover is changed due to fires, logging, industrial activities and other influences. Monitoring of forest ecosystem diversity and sustainability under ever increasing human-caused environmental stresses is a major forest protection challenge.

Mapping is an important tool for studying and monitoring forest cover, particularly its spatial inventory, dynamics and biodiversity estimation. However, maps built using traditional methods become out of date very soon. Accurate vegetation cover maps created on the remote sensing (RS) data are missing for the most part of Siberia.

The present stage of thematic mapping is essentially based on using GIS-technologies and RS data [1]. These methods allow to objectivize mapping process and to improve map accuracy and validity by automated processing of RS data and field information in combination with traditional cartographic methods. Vegetation cover maps are actually spatial vegetation cover models, which reflect the diversity of vegetation and site conditions. Therefore, these maps can be used as a basis for spatial representation and modelling of different ecosystem parameters (carbon pools, active layer depth etc.).

The purpose of our investigation is the application of an algorithm of vegetation mapping for the Northern Siberia test site using GIS, RS data, DEM and ground observation data.

Materials and methods

The test site (Taimyr Forest Tundra Ecoregion) (68º–69º N, 88º–89º E) was located in the Northern Siberia in forest-tundra and northern taiga subzones. This area presented by different natural vegetation types and their complexes: tundra, forest-tundra, taiga forests and bog complexes.

We used the data of GIS «Central Siberia Forests» [2] to automate mapping of vegetation types and vegetation growing conditions. The GIS data includes topographic base map, DEM SRTM, satellite imagery Landsat TM/ETM/OLI, thematic maps (landscape, soil etc.), and a database of ground observations on sample sites. Satellite images and DEM were analyzed in a stepwise way, with GIS technologies and the standard procedures of ERDAS Imagine 2013 and ESRI ArcGIS 10.

To mapping of vegetation types and vegetation growing conditions of the given area, we used an automated approach to classification and mapping of forest regeneration dynamics described by the authors [3]. To use this approach, we decided a few key tasks:

1. Inventory and classification of the current diversity of vegetation cover.
2. Application of automated technique for classification and mapping of vegetation growing conditions based on a DEM-composite classification.
3. Application of an algorithm for automated interpretation of Landsat TM/ETM/OLI imagery.
4. Creation of GIS-based thematic maps (vegetation growing conditions, vegetation type, soil carbon stock).

Classification of the current diversity of vegetation cover was performed using a topogenetic approach of Russian forest scientist Kolesnikov [4]. According to this approach, forest ecosystem diversity is formed by forest development or regeneration stages present at the same time in a given area. The entire diversity of vegetation communities is classified based on growing condition similarity, and not based on continuously changing outward characteristics (e.g., species composition). Forest type as a main unit of this classification represents a series of genetically linked and sequentially replaced communities developing within a certain type of growing conditions. Growing conditions type presents a key element of the forest type concept. It was identified based on relief (DEM) analysis.

Satellite data pre-processing involved image geometrical correction and transformation to desirable map projections, georeference, as well as radiometric correction and preliminary processing of multiband images to increase their quality. To carry out automatized classification of a DEM-composite (elevation above sea level, slope) and satellite images, we used pixel-based classification algorithms: unsupervised clustering – ISODATA and supervised Maximum Likelihood Classification (MAXLIKE).

Results

In this work, an algorithm to classification and mapping of vegetation cover using dissimilar data was done in a stepwise manner.

The first task is to develop an appropriate preliminary classification of vegetation and vegetation growing conditions, upon which the map legend would be based. We developed classification of vegetation growing conditions for the test area taking into account site topology and the associated vegetation types.

We used SRTM DEM to build topological profiles that crossed the test area and analyzed these transects using the thematic maps, literature and field data.

Using these profiles and thematic maps (landscape, soil etc.), we analyzed geomorphological conditions of the test area and identified sites relatively similar in relief characteristics (i.e., in mesorelief form, range of elevations above sea level, and dissection of surface). The eight identified classes represent certain landscape types and their combinations and presumably correspond to different geomorphological complexes (GMC) of vegetation growing conditions. Therefore, preliminary number of classes for an automated DEM classification was determined.

The next step is an automated classification and mapping of potential vegetation growing conditions. We classified DEM-composite (elevation and slope) using ISODATA algorithm and identified eight classes relatively similar in morphometric relief parameters.

Climate is an important part of vegetation growing conditions. Landscape map [5] was used to analyze sites similarity of climatic conditions.

For analysis and classification of dissimilar data (morphometric and climatic parameters), expert system (decision tree) was created using Knowledge Engineer module / ERDAS Imagine in order to build GMC of vegetation growing conditions. Input variables of the decision tree are the raster layers of morphometric and climatic parameters.

As a result, eight (I-VIII) classes of GMK of potential vegetation growing conditions with respect to geomorphology, zonal soil types, and vegetation were obtained.

More detailed units, vegetation growing conditions (VGC) types, were identified for each GMC based on the ranges of slope and elevation. For refining the classification, we identified sites that were relatively homogeneous in slope (flat surfaces (0–1°), soft slopes (1–2° or 1–3°), moderate slopes (3–5°), steep slopes (5–8°), very steep slopes (8–15°), benches and rocks (>15°)), which have relatively similar soil conditions and hydrological regimes and correspond to VGC types.

The resulting two-layer map (geomorphological complexes and types of vegetation growing conditions) is the basis for classifying vegetation type [6].

The next step is an automated classification RS data. To do this, we used summer (July) cloud-free Landsat 8-OLI scene (2013 year) received as close as possible to the period of field studies. The selected image was converted into the basic map projection and topographically normalized. The normalized image was then combined to obtain 7-band image. We excluded the thermal band.

To classify multiband image, the training samples for major land cover classes were made using ground data. The information classes most common in a given part of the test site and the associated image were developed.

Then parametric signatures were calculated for each information class and a supervised classification of the image was done based upon these signatures and used the method MAXLIKE. As a result, a raster layer of 88 initial land cover classes was obtained.

To correctly classify, the initial classes obtained from RS data classification were distributed using a preliminary classification of vegetation growing conditions types and the associated vegetation type. To build a vegetation types layer, an expert classification based on the Knowledge Engineering Module (ERDAS Imagine) was developed. The results of the analyses of the satellite images and vegetation growing conditions raster layers were used as the input data for building the expert classification. Finally, initial classes were interpreted as 16 vegetation types by expert judgment with the help of available reference data (Figure 1).

Finally, we extrapolated the carbon stock volumes using tabular reclassification approach. We overlaid available field sample points with combined layers of vegetation types and DEM-based vegetation growing conditions classes. The resulted allocation table allowed linking the carbon stock values from the field sample database (carbon pools parameters with values in kgC/m2) to combined vegetation types and vegetation growing conditions maps. A map of soil carbon sock for the test area were shown on Figure 2.

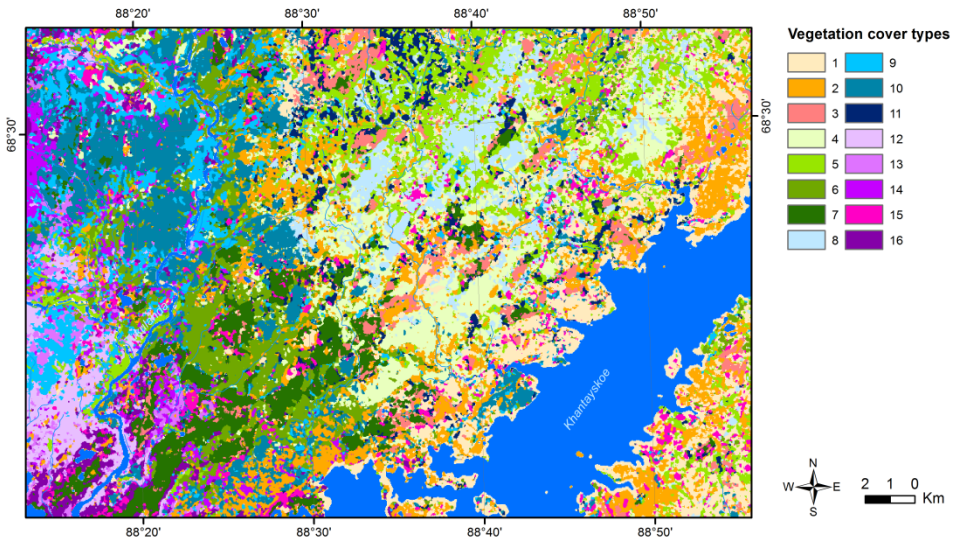


Fig. 1. Map of vegetation cover for the fragment of Taimyr forest-tundra ecoregion (1–16 – classes of vegetation cover types and complexes)

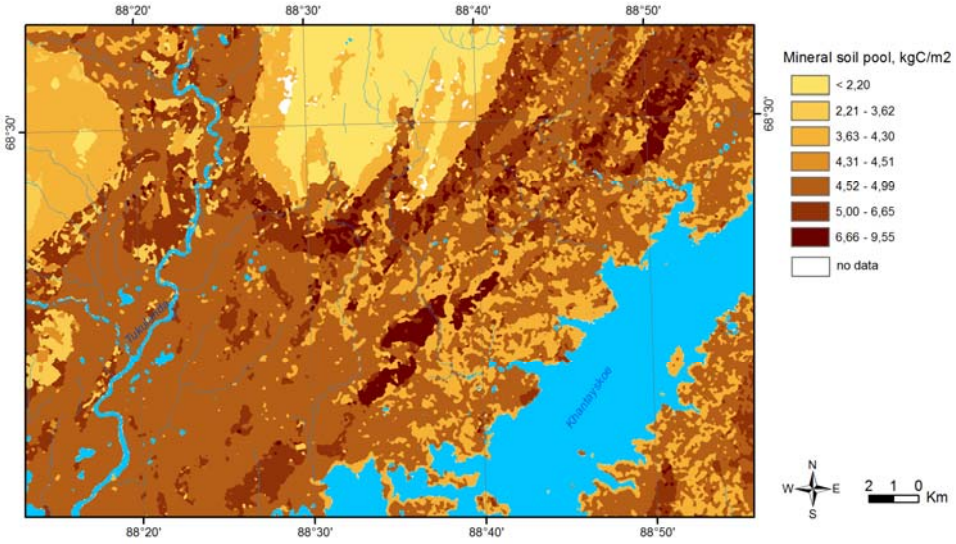


Fig. 2. Spatial distribution of soil carbon stock (soil layer 0–20 cm) for the test area (fragment of Taimyr forest-tundra ecoregion)

Conclusions

The algorithm of automated mapping of potential vegetation growing conditions and vegetation cover types involving a spatial analysis of DEM-composite, multi-band satellite data, and ground measurements was applied to the Northern Siberia (Taimyr Forest Tundra Ecoregion). The combined use of automated methods and expert interpretation of the classes obtained allowed us to identify certain characteristics, such as vegetation growing conditions types, vegetation types, directly unrecognizable in space images, but important regarding thematic mapping.

References

1. Mapping gradients of community composition with nearest-neighbour imputation: extending plot data for landscape analysis / J. Ohmann, M. Gregory, E. Henderson, H. Roberts // Journal of Vegetation Science Issue. 2011. 22. P. 660–676.

2. Korets M.A., Cherkashin V.P., Ryzhkova V.A. Estimation of the forest areas using adjoin analysis of the GIS and remote sensing data // Forest ecosystems of the Yenisei meridian. FUE «Publishing House SB RAS», Novosibirsk, 2002. P. 173–180.

3. Danilova I.V, Ryzhkova V.A & Onuchin A.A. Using of satellite imagery, digital elevation model (DEM) and field data for mapping of forest regeneration dynamics // Geodesy and Cartography. 2013. Vol. 9. P. 25–32.

4. Kolesnikov B.P. Siberian pine forests of the Russian Far East. Moscow-Leningrad, Nauka Publisher, 1956. 252 p.

5. Gudilin I.S. The USSR Landscape Map (1:2 500 000). M., 1987.

6. Ryzhkova V., Danilova I., Korets M. Gis-based forest cover classification and mapping (principles and technique) // Ecology & Safety. 2015. Vol. 9. P. 177–189.

УДК 631.6:556.1:528.8

ГИС-КАРТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАСУШЛИВОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Е. А. Дунаева
ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»
e-mail: water_crimea@hotmail.com

GIS-MAPPING AND EVALUATION THE LEVEL OF DRYNESS WITH EARTH REMOTE SENSING DATA

Ie. Dunaieva
The Federal State Budget Scientific Institution "Research Institute of Agriculture of Crimea"
e-mail: water_crimea@hotmail.com

В статье рассмотрены результаты использования ГИС и ДЗЗ для оценки природной обеспеченности водными ресурсами и степени засушливости территории. Проведена оценка территории по соотношению основных составляющих водного баланса территории – осадков и испарения, а также выполнено картирование территории по индексам аридности и дифференцированному индексу засухи. Выделены территории, наиболее подверженные действию засушливых условий.

Ключевые слова: потенциальное суммарное испарение, актуальное суммарное испарение, индекс аридности AI, нормализованный дифференцированный индекс засухи NDDI, NDVI.

Картирование и оценка степени засушливости очень важны на территориях, подверженных нехватке местных водных ресурсов. Целью данного исследования является картирование водного стресса территории и выявление районов с наиболее благоприятными условиями для выращивания сельскохозяйственных культур с использованием открытого программного обеспечения ГИС, агрогидрологических моделей и спутниковой информации. Исследование проведено на территории степной части Крымского полуострова (Красногвардейский район, Клепининское сельское поселение, опытные поля Института).

Результаты моделирования, полученные с использованием агрогидрологической модели MWSWAT2012, встроенной в интерфейс открытой ГИС MapWindow, дают возможность оценить индекс аридности территории (aridity index, AI) по соотношению осадков к потенциальному суммарному испарению с выбранным временным интервалом (день, месяц, год). Условия по AI классифицируются как гипераридные, когда AI < 0,03, аридные – 0,03 < AI < 0,20, полуаридные – 0,20 < AI < 0,50, сухие гумидные – 0,50 < AI < 0,65, AI > 0,65 – гумидные [1].

Агрогидрологическая модель SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) разработана Джеффом Арнольдом для службы сельскохозяйственных исследований Департамента сельского хозяйства США (ARS – Agricultural Research Service of the USDA). Модель используется с целью прогноза (оценки) влияния изменения технологии управления земельными ресурсами на водные ресурсы, накопления питательных веществ и уровня урожая на больших и сложных водоразделах с различными типами почв, землепользования и практикой управления земельными ресурсами [2, 3].

В данной работе для запуска SWAT в качестве исходных данных использована цифровая модель рельефа (STRM, пространственное разрешение 90 m), информация о структуре землепользования территории (данные проекта WaterBase [4], данные спутникового мониторинга совместно со статистической информацией) и почвенном

покрове (данные проекта WaterBase), базы данных (БД) метеорологической информации, включая максимальную и минимальную температуру воздуха (C°), осадки (мм/сутки), скорость ветра (м/сек), солнечную радиацию (MJ/m^2), относительную влажность воздуха и потенциальное суммарное испарение (мм/сутки) за период 1995–2015 гг.

Модель MWSWAT2012 позволяет картировать AI для гидрологически-характерных единиц или суб-бассейнов, на которые подразделяется исследуемая территория. AI показывает распределение увлажнения по территории, в т.ч. могут выделяться участки, где наблюдаются наиболее благоприятные условия. Территория сельского поселения в целом, в многолетнем плане, характеризуется недостаточным увлажнением в течение вегетационного периода. Среднемноголетнее среднемесячное значение AI за вегетационный период 1995–2015 гг. составляет 0,43 – полуаридные условия, при этом значение индекса аридности за июль 2014 г. равно 0,29, а за июль 2015 г. – 0,18 (см. рис. 1).

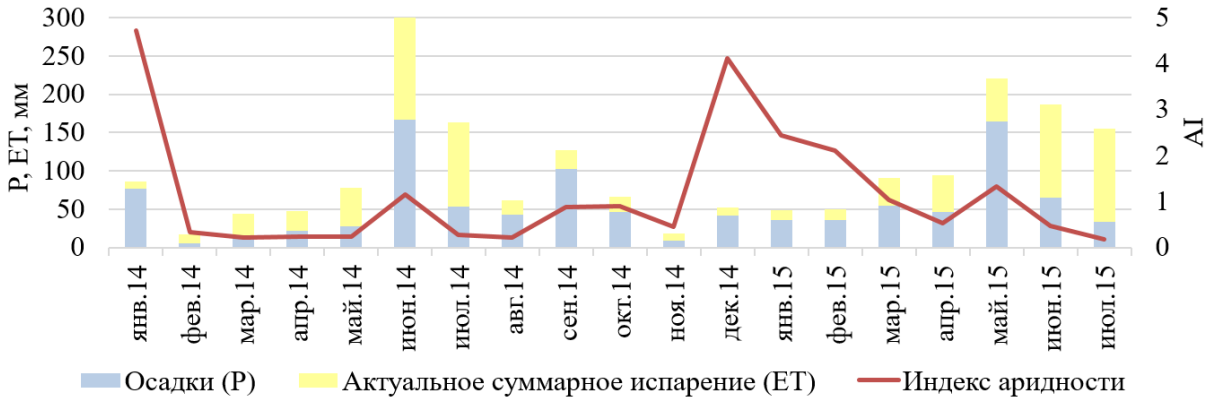


Рис. 1. Соотношение осадков и потенциального испарения

Дополнительные преимущества дает совместное использование ГИС и данных дистанционного зондирования Земли. Фактическое суммарное испарение совместно с нормализованным дифференцированным вегетационным индексом (NDVI) позволяет оценить влияние метеорологических условий на формирование растительного покрова. Значения фактического суммарного испарения (ET) для исследуемой территории вычислено в модели MWSWAT2012 на основании метеорологической информации на базе уравнения Пенмана-Монтейта, а также получены по данным продукта MOD16A1 (разрешение сетки координат 0,05 градуса) [5]. Для продукта MOD16A1 в большинстве случаев на территорию среднего по площади сельского поселения приходится от 2 до 5 пикселей. По данным MOD16A1, значение потенциального суммарного испарения (PET) в июле 2014 г. для территории Клепининского сельского поселения варьирует в диапазоне 216–228 мм, а суммарное актуальное испарение составило 34,7–56,8 мм. Значения ET и PET также были получены по данным результатов агрогидрологического моделирования на базе суточных значений метеопараметров за период 1995–2014 гг. с использованием укрупненной структуры и фактического землепользования Клепининского сельского поселения согласно карте севооборотов. При запуске SWAT2012 по укрупненным данным актуальное суммарное испарение территории ET за июль 2014 г. варьирует в диапазоне 61–115 мм (при фактической структуре – от 56 до 114 мм), а за июль 2015 г. ET составляет 70–125 мм и при детальном землепользовании 66–123 мм соответственно. При этом значение PET по укрупненному землепользованию за июль 2014 и 2015 г. составляет 185 и 181 мм, а по фактическому – 180 и 175 мм.

Анализ водообеспеченности территории степной части Крымского полуострова проведен с использованием L8 OLI/TIRS (пространственное разрешение 30 м) Landsat 8 (уровень 1 GEOTIFF Data Product) и программного обеспечения QGIS 2.14, ILWIS 3.8. Степень засушливости с использованием NDVI определяется по состоянию растительной биомассы и динамики изменения ее состояния. На рис. 2 представлены значения NDVI за июль 2014 и 2015 г. с выделением границ землепользования.



а) б)

Рис. 2. NDVI за июль 2014 (а) и 2015 г. (б) (Клепининское сельское поселение)

При уточнении структуры посевов с использованием индекса NDVI зачастую бывает необходима дополнительная информация о сроках наступления основных фенологических фаз, сева и уборки культуры. Структура землепользования оцифровывалась с помощью ПО GoogleEarth и корректировалась на основе наземных данных в QGIS 2.14.

Индекс NDVI является не только одним из базовых косвенных показателей, который характеризует уровень развития растительной биомассы и используется во многих системах анализа данных наблюдений за поверхностью Земли, и, кроме того, его значения применяются для расчета более специализированных индексов, таких как нормализованный дифференцированный индекс засухи, NDDI.

NDDI вычисляется на основе NDVI и нормализированного дифференцированного водного индекса (NDWI) по следующей формуле [6]:

$$NDDI = (1 – NDWI / NDVI) / (1 + NDWI / NDVI)$$

NDDI изменяется от –1 до 1 и может быть представлен как в пределах этого диапазона, так и в процентном соотношении. Большие значения индекса показывают суровость степени засухи. Оценка степени засушливости и водообеспеченности исследованной территории по NDDI показана на рис. 3.

Картирование и классификация земель по NDDI позволяет выделить участки территории, подверженные водному стрессу или более водообеспеченные. Наиболее благоприятные условия по увлажнению в 2014–2015 гг. характерны для полей под паром.

Выводы: использование различных косвенных методов оценки позволяет получить информацию о состояния засушливости территории, оценить и выделить территории, подверженные водному стрессу. Однако для повышения точности полученных данных необходима наземная информация, а именно метеорологическая информация, данные истории полей, данные о сроках сева и уборке, особенности роста культур в регионе.

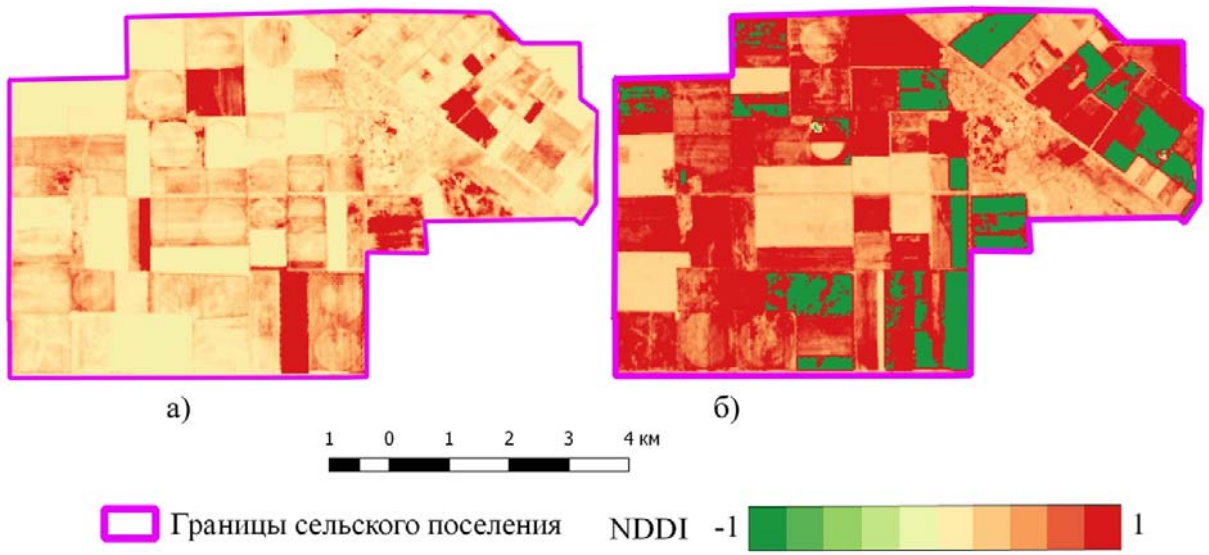


Рис. 3. Засушливость территории Клепининского сельского поселения по индексу NDDI за июль 2014 г. (а) и 2015 г. (б)

Использование данных ДЗЗ в комбинации с ГИС и агрогидрологическим моделированием создает дополнительные возможности для получения данных относительно состояния, временной и пространственной динамики физических процессов и является эффективным инструментом для мониторинга и контроля засушливости территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00059 мол_а.

Список литературы

1. UNEP (United Nations Environment Programme) / World atlas of desertification 2ED. UNEP, London, 1997.

2. Soil and water assessment tool input / output file documentation. Version 2005 / S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, J.R.Williams – Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural research Service and Blackland Research centre of Texas Agricultural Experiment Station, Texas. 2004. 541 p.

3. Dunaieva Ie. Evaluation of Water Resources State Parameters with Using SWAT Model / Ielizaveta Dunaieva // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 2. Issue 9, September. 2013. P. 2162–2167.

4. Проект WaterBase. URL: http://www.waterbase.org

5. MOD16A1. URL: http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16

6. Дунаева Е.А. Определение индекса засухи NDDI для территории Крыма средствами дистанционного зондирования Земли и ГИС // Сб. тр. VIII междунар. науч. конф. молодых ученых и талантливых студентов: Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность (25–27 июня 2014 г., Москва, Российская Федерация) // ИВП РАН, 2014. С. 18–22.

УДК 622.85:622.271.45:550.814

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ И ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ И ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

И. В. Зеньков
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт нефти и газа
СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН
e-mail: zenkoviv@mail.ru

В статье приводятся результаты оценки структуры нарушенных земель в результате добычи угля открытым способом и формирования на них природных экосистем на территории Красноярского края и Иркутской области. По космическим снимкам установлены площади сформированных растительных экосистем, а также выявлены их качественные характеристики.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, угольные разрезы, рекультивация земель, формирование растительных экосистем, породные отвалы.

В Сибирском федеральном округе в промышленно развитых регионах (Красноярский край, Иркутская область) производится масштабная добыча угля открытым способом и выработка тепловой и электрической энергии на тепловых станциях. Топливная составляющая топливно-энергетического комплекса (ТЭК) этих регионов представлена двенадцатью крупными угольными разрезами с суммарным годовым объемом добычи угля в диапазоне 42–46 млн т. Большая часть объема добытого угля сжигается на месте, часть Канско-Ачинских углей отправляют по всей России.

Согласно российскому законодательству, предприятия ТЭК проводят большую работу по снижению техногенной нагрузки на окружающую природную среду. Вместе с тем, на наш взгляд, на всех объектах ТЭК недостаточно эффективно проводятся природоохранные мероприятия, поскольку не все резервы используются в повышении экологической эффективности их промышленной деятельности.

Наш коллектив продолжает развивать научно-практическое направление в области решения вопросов экологии в топливно-энергетическом комплексе, горнодобывающей промышленности, при этом широко используются результаты дистанционного зондирования Земли. В настоящей работе представлены результаты дистанционного горно-экологического мониторинга горнопромышленных ландшафтов, образованных в ходе добычи угля открытым способом.

Дистанционное зондирование в решении наших задач применялось для получения информации о состоянии рекультивации породных отвалов на пяти наиболее крупных угольных разрезах и формирования растительных экосистем. Традиционно в Красноярском крае местами открытой угледобычи считаются окрестности гг. Шарыпово, Назарово, Бородино, Канск и др. Наиболее масштабные нарушения земной поверхности (6635 га) произведены при разработке Назаровского буроугольного месторождения. Схема взаиморасположения действующего разреза «Назаровский» и отработанных участков на Назаровском месторождении угля представлена на рис. 1. При этом был использован информационный ресурс [1].

Исторически на Назаровском угольном месторождении фиксировались наиболее высокие темпы развития горных работ. В результате площадь нарушенных земель, задействованных в открытой угледобыче, составила 6635 га в июле 2015 г. На отработанных участках Назаровского угольного месторождения коэффициент

рекультивации составил 0,94. Это означает, что на разрозненных участках горнопромышленного ландшафта, суммарной площадью 94 % от всех нарушенных земель, произошло восстановление экосистемы естественным либо искусственным путем (рекультивация земель).

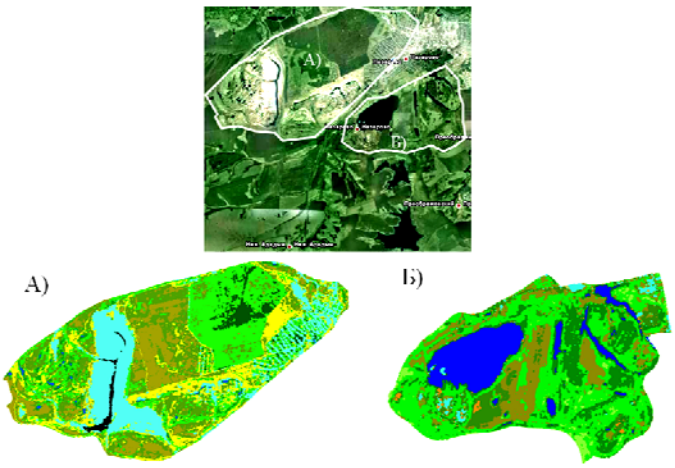


Рис. 1. Фрагменты космоснимков действующих и отработанных угольных карьеров в районе г. Назарово: на верхнем снимке представлена компоновочная схема размещения объектов угледобычи; на рис. А) в левой его части действующий угольный карьер; на рис. Б) – отработанные участки Назаровского буроугольного месторождения

В ходе горно-экологического мониторинга пяти угольных разрезов выделены основные типы растительных экосистем, сформированных на территории внешних и внутренних породных отвалов карьеров, а также на территории действующих разрезов. Так, восстановление горнопромышленных ландшафтов, образованных при отработке Назаровского угольного месторождения, проводилось по широкому спектру направлений рекультивации: лесотехническая (посадки сосны), рекреационная (обустройство дачного массива), сельскохозяйственная и водная. За основные направления на других разрезах приняты: лесотехническая рекультивация и сельскохозяйственная. Кроме того, в настоящее время на разрезах края весьма популярным становится отсутствие специальных работ по рекультивации нарушенных земель.

Результаты восстановления экосистем на горнопромышленных ландшафтах представлены на космоснимках (рис. 1, 2). На них оттенками зеленого цвета показаны контуры растительных экосистем, синим цветом – техногенные водоемы, оттенками серого – породные отвалы без растительного покрова и черным цветом изображены вскрытые угольные пласты либо их остатки в почве отработанных пластов, не перекрытые сверху вскрышными породами.

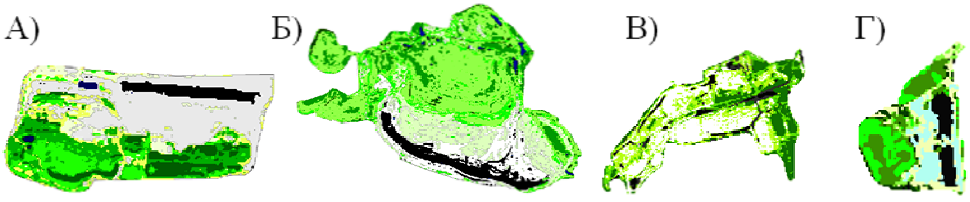


Рис. 2. Космоснимки действующих угольных разрезов после дешифрирования: А) разрез «Березовский»; Б) разрез «Бородинский»; В) разрез «Переясловский»; Г) разрез «Канский»

Структура нарушенных и восстановленных земель в угледобывающем секторе ТЭК Красноярского края, установленная по результатам дистанционного зондирования в июле 2015 г., представлена на рис. 3.

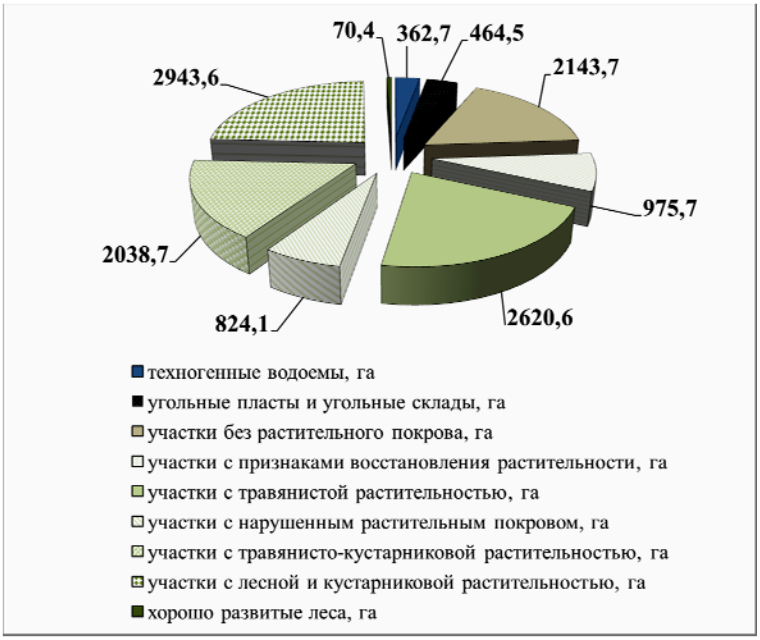


Рис. 3. Структура нарушенных и восстановленных земель в ходе разработки открытым способом угольных месторождений в Красноярском крае

На других четырех угольных разрезах из пяти обследованных (рис. 2), в зависимости от подходов их собственников к ведению горных работ, коэффициент восстановления экосистем (рекультивации) намного ниже и находится в диапазоне 0,33–0,98. При этом самый низкий коэффициент на уровне 0,33 отражает состояние экологии горных работ на разрезе «Переясловский», а самый высокий, на уровне 0,98, характеризует весьма наглядно восстановление буквально всех видов экосистем на протяжении последних 50 лет на отработанном поле Назаровского буроугольного месторождения. Средний коэффициент восстановления экосистем (рекультивации) по пяти угольным разрезам Красноярского края составил 0,79 на площади нарушенных и частично восстановленных земель, равной 12 444 га.

Топливная составляющая ТЭК Иркутской области представлена четырьмя угольными разрезами в системе ООО «Востсибуголь», при этом добыча угля составляет 10–12 млн т в год. Большая часть объема добытого угля сжигается на месте, частичный объем Черемховского каменного угля отправляют на экспорт в страны Азии. Традиционно в Иркутской области местами открытой угледобычи считаются месторождения в окрестностях г. Тулун и Черемхово. Взаиморасположение действующих разрезов и отработанных участков месторождений в районе г. Тулун с использованием ресурсов [1] представлено на рис. 4.

На территориях действующих угольных разрезов просматриваются следы формирующихся молодых экосистем в контурах фигур Б и Д. Анализ структуры восстановленных земель показывает наличие всех экосистем на территории горнопромышленных ландшафтов (рис. 1, В, Г, Е). Так, в районе г. Тулун на отработанных участках угольных месторождений созданы техногенные водоемы, используемые местным населением как районы для дачного строительства. Здесь же находятся чистые сосновые боры, созданные путем проведения лесотехнической рекультивации.

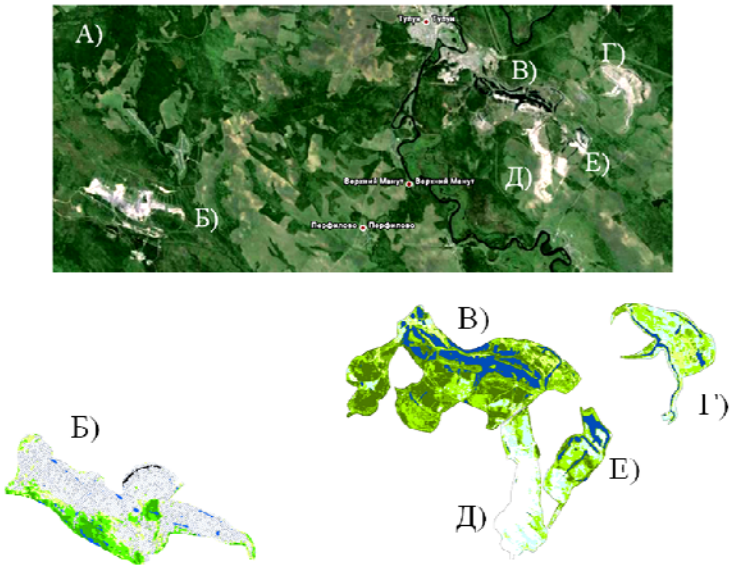


Рис. 4. Фрагменты космоснимков действующих и отработанных угольных карьеров в районе г. Тулун: А – компоновочная схема размещения объектов угледобычи (верхний снимок); Б, Д – действующие угольные карьеры; В, Е, Г – отработанные участки Азейского буроугольного месторождения

Большая часть рекультивированных земель под использование в сельском хозяйстве заросла древесно-кустарниковой растительностью ввиду их неиспользования по прямому назначению.

Компоновочная схема действующих угольных разрезов и отработанных участков месторождений в районе г. Черемхово представлена на рис. 5.

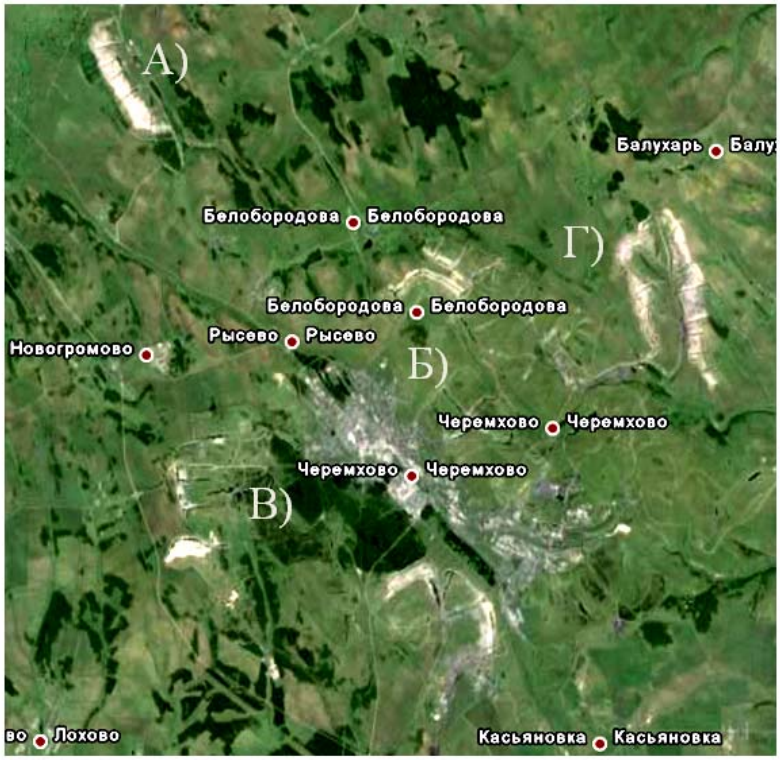


Рис. 5. Фрагмент космоснимка с расположением угольных карьеров и отработанных участков буроугольного месторождения в районе г. Черемхово

Действующие разрезы показаны фигурами А и Г. Отработанные участки представлены фигурами Б, В на рис. 6.

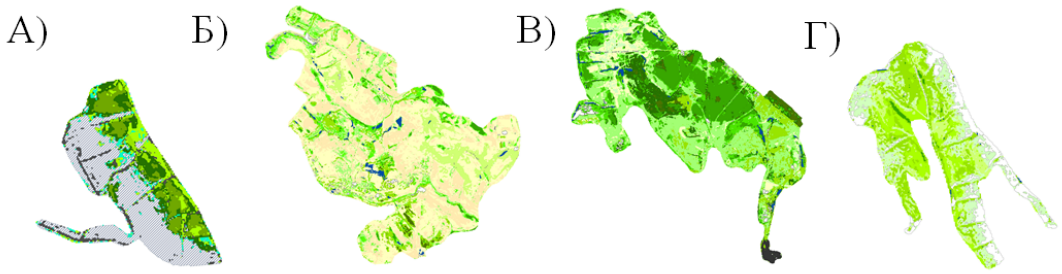


Рис. 6. Исследуемые участки после дешифрирования космоснимков: А, Г – действующие угольные карьеры; Б, В – отработанные участки Черемховского угольного месторождения

Структура нарушенных и восстановленных земель в районе г. Тулун и г. Черемхово по результатам дистанционного зондирования в июле 2015 г. представлена на рис. 7.

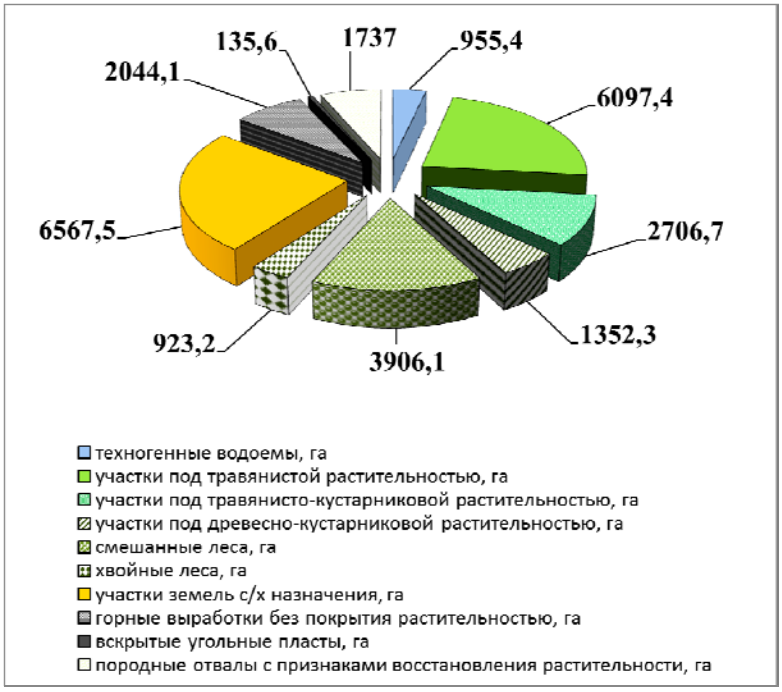


Рис. 7. Структура нарушенных и восстановленных земель в ходе разработки открытым способом угольных месторождений в Иркутской области

На отработанных участках Азейского буроугольного месторождения коэффициент рекультивации 89 %. Здесь исключение составляют те земли, на которых происходит оврагообразование, или рельеф не был сформирован должным образом, что приводит к затруднительной ситуации с восстановлением растительной экосистемы на этих участках горнопромышленного ландшафта. Вместе с тем происходит систематическое увеличение водоема, образованного в остаточной карьерной выемке. Его наполнению способствует расположение на более низких высотных отметках относительно рельефа прилегающих территорий, и поэтому в период снеготаяния и ливневых дождей поверхностные воды наполняют водоем. Кроме того, водоем имеет

подпитку из подземных горизонтов. Эти факторы приводят к расширению площади зеркала водоема, при этом площадь наземной растительной экосистемы в незначительной мере, но сокращается. Кроме того, как показывает исследование территории с применением средств дистанционного зондирования, искусственные хвойные леса уходят в категорию смешанных лесов за счет поселения между соснами представителей смешанных лесов, чьи семена, снабженные крыльчаткой, эффективно переносятся ветрами на большие расстояния.

Проанализировав структуры нарушенных и восстановленных земель по отдельным участкам, переходим к формулировке следующих основных выводов. Коэффициенты восстановления природной экосистемы на отработанных участках Б и В (Черемховское месторождение каменных углей) достигают высоких уровней 0,98 и 0,89. В первом случае это означает, что практически на всей площади нарушенных земель произошло достаточно эффективное 100%-е восстановление природной экосистемы. Во втором случае имеется поле, зарастание которого является проблемным, и потребуется еще несколько лет для полного его заселения нижними ярусами растительной экосистемы. Аналогичные коэффициенты на участках Черемховского месторождения, на которых производятся горные работы, почти в 2 раза ниже, что оговаривается временным отставанием начала формировании экосистем от момента окончания отсыпки породных отвалов (момента окончания горных работ). Значения коэффициента восстановления на уровне 0,57 и 0,42 характерны для участков А и Г соответственно.

Комплексный анализ состояния использования, восстановления земель, задействованных в открытой угледобыче Красноярского края и Иркутской области, позволяет сделать вывод о том, что на всех объектах имеется необходимость перехода на ресурсосберегающие экономически и экологически эффективные промышленные технологии в рекультивации нарушенных земель при производстве работ по этому виду деятельности.

УДК 338.5:622

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ И УГОЛЬНОЙ ЛОГИСТИКИ В АВСТРАЛИЙСКОМ ШТАТЕ НОВЫЙ ЮЖНЫЙ УЭЛЬС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

И. В. Зеньков
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт нефти и газа
СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН
e-mail: zenkoviv@mail.ru

В статье приводятся результаты оценки технологического потенциала и возможности по добыче угля угольных карьеров и угольной логистики по экспорту угля в штате Новый Южный Уэльс в Австралии. По космическим снимкам установлены технологические показатели угольных разрезов, применяемого горнотранспортного оборудования, элементы систем разработки угольных месторождений, а также сделаны количественные и качественные оценки оборудования, задействованного на перевозке угля и его погрузке в морском порту Ньюкасл.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Австралия, штат Новый Южный Уэльс, угольные карьеры, морские порты, железнодорожные перевозки, экспорт угля, эффект от масштаба производства.

В настоящее время Австралия занимает одно из лидирующих положений в мировой экономике по объемам добычи угля. Экспорт угля за последние 10 лет достиг внушительных размеров, что стало возможным за счет того, что на материке, в его восточных штатах построены самые мощные угольные разрезы в мире с протяженностью фронта горных работ до 48 км. С целью понимания происходящего в области разработки угольных месторождений открытым способом на Австралийском континенте взят небольшой участок площадью 1580 км^2 в штате Новый Южный Уэльс, на территории которого производится масштабная разработка угольных месторождений открытым способом, а также имеются крупные тепловые станции с угольной генерацией. На космоснимке представлен исследуемый район (рис. 1). Стороны выделенного четырехугольника составили 57, 32, 60 и 22 км соответственно для западного, северного, восточного и южного ограничивающих отрезков.

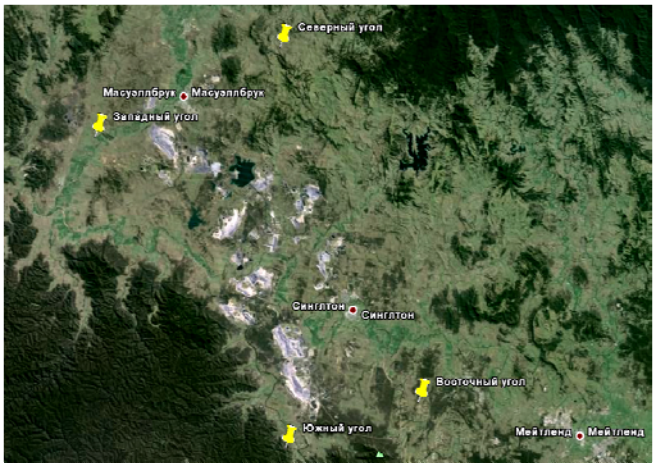


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с выделением участка открытой угледобычи в штате Новый Южный Уэльс (Австралия)

Всего на обследованном участке находятся в разработке либо стоят в резерве 28 самостоятельных угольных карьеров. Суммарная длина добычного фронта составляет 38 570 м. Длина фронта добычных работ на угольных карьерах находится в диапазоне от 300–400 до 4600 м. На момент космической съемки в резерве находились 8920 м добычного фронта на угольных карьерах: Масуэллбрук, Эддертон, Равенсворт, Лемингтон, Маунт Торли. Пять карьеров находятся в затопленном состоянии до момента, когда спрос на уголь повысится либо горно-геологические условия разработки на соседних добычных участках достигнут более худших показателей в сравнении с резервом.

Анализ показателей работы угольных карьеров говорит о том, что угледобывающие предприятия ведут добычу угля при весьма благоприятных горно-геологических условиях залегания угольных пластов. Количество вскрышных уступов в среднем составляет 2–4. Угольные пласты имеют мощность до 20 м. Залегание пластов в основном слабонаклонное с углами падения пластов $4–6^0$. Конструкции нерабочих бортов на флангах карьеров позволяют сделать вывод о том, что вкрест простирания по падению угольные пласты имеют без уклонов горизонтальное залегание. В открытой угледобыче при небольших углах наклона на нижнем вскрышном уступе используют достаточно эффективно шагающие экскаваторы-драглайны. На момент съемки на всех карьерах было задействовано 8 драглайнов типа ЭШ-100/95 и один драглайн типа ЭШ-100/125. Практически на всех разрезах разработка вскрышных пород производится после предварительного рыхления буро-взрывным способом. Фрагменты горных работ на австралийских угольных разрезах выборочно представлены на рис. 2.

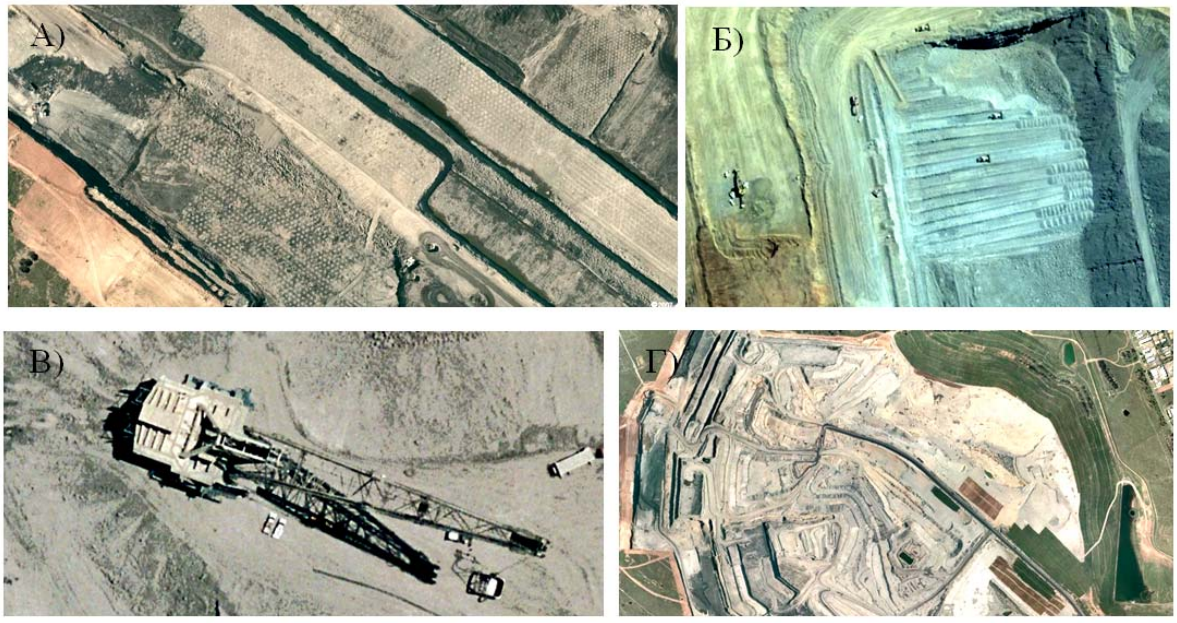


Рис. 2. Фрагменты открытых горных работ на снимках из космоса: а) разработка угольных пластов панелями; б) зачистка кровли угольного пласта бульдозерами перед его экскавацией; в) вскрытие угольного пласта драглайном (длина стрелы 95 м, емкость ковша 100 м^3); г) фрагмент рабочего борта карьера, породные отвалы и рекультивация северо-восточного сектора отвала

На рис. 2, *а* хорошо просматриваются обуренные взрывные блоки, подготовленные для зарядки ВВ и последующего взрывания. Скважины бурятся по сетке 7×7 м в шахматном порядке. Выемочные панели имеют размеры 150×500 м.

Объем горной массы после взрывания одной такой панели составляет 1,5 млн $м^3$. В этом имеется глубокий экономический смысл – максимальная загрузка мощных экскаваторно-автомобильных комплексов. На рис. 2, *б* представлен фрагмент бульдозерных работ по зачистке кровли угольного пласта бульдозерами типа Komatsu D475A. На рис. 2, *в* изображен драглайн с ковшом емкостью не менее 100 $м^3$, поскольку площадь ковша измеряется 40 $м^2$. В момент снимка с космического летательного аппарата драглайн находится на техническом обслуживании, если учитывать нахождение автомобилей в зоне радиуса перемещения ковша, что категорически запрещено правилами безопасного ведения открытых горных работ. На рис. 2, *г* видим фрагмент карьера с радиальным перемещением фронта горных работ. В правой части рисунка просматриваются террасы на откосе породного отвала после работ по рекультивации земель.

Все угольные карьеры на исследуемом участке в зависимости от горно-геологических условий разработки пластов можно условно разделить на две группы: ровные прямолинейные контуры рабочих уступов на месторождениях без тектонических сдвигов пластов и криволинейные в плане контуров уступов на месторождениях со смятыми пластами. На месторождениях первой группы на нижних вскрышных уступах применяют драглайны с годовой производительностью 25–30 млн $м^3$. Это позволяет значительно снизить затраты на вскрышные работы. Все вскрышные уступы, за исключением надугольного уступа, отрабатывают мехлопатами или гидравлическими экскаваторами с объемом ковша 30–40 $м^3$ с погрузкой в автосамосвалы грузоподъемностью 300 т и более. Вскрышные породы транспортируют во внутренние отвалы по внутрикарьерным перемычкам либо по въездным траншеям, расположенным на расстоянии 1–1,5 км. Добычные работы производятся аналогичным оборудованием с транспортировкой угля до поверхностных углепогрузочных терминалов. С последних уголь из накопительных емкостей диаметром 14–15 м и высотой до 50 м отгружают в железнодорожные составы, в которых он транспортируется до морского порта Ньюкасл на побережье Тихого океана. Объем угольных накопителей составляет 5000–5500 $м^3$, что отвечает объему железнодорожного состава, состоящего из 80–90 вагонов грузоподъемностью 100 т. При мощности угольных пластов 20 м и годовом подвигании фронта горных работ 100 м объем добычи угля на всех разрезах составляет 95 млн т. Соответственно, при 2- и 3-кратном увеличении объем добычи может составить 190 и 285 млн т в год.

В конце XX – начале XXI вв. Австралия достаточно прочно заняла одно из лидирующих положений на мировом рынке каменных углей. На ее территории располагаются многочисленные месторождения высококачественных энергетических и коксующихся углей с благоприятными условиями разработки, расположенные на расстоянии до 180 км от морских портов восточного побережья континента. В настоящее время многие задачи мировой экономики достаточно эффективно и наглядно решаются при использовании спутниковых снимков высокого разрешения в свободном доступе. Понимание эффективности сформированной угольной логистики в Австралии, обеспечивающей доставку добытого угля от разрезов до морских портов, кратко представлено в настоящей статье.

Итак, в шести морских портах на восточном побережье Австралии круглогодично отгружается уголь в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, Европы, Центральной Азии: Корея, Китай, Франция, Италия, Великобритания, Индия и др. (рис. 3). В шести морских портах Австралии, приспособленных для приема угля из железнодорожных составов, одновременно могут загружаться 19 морских крупных сухогрузов (балкеров) водоизмещением 150 000–160 000 т. В каждом порту созданы от одного до трех угольных складов, в которые уголь доставляется в вагонах по железной дороге с мест его добычи. Забор угля со складов производится роторными экскаваторами-погрузчиками

производительностью 3000–3500 т в час. При одновременной работе трех-четырех таких погрузчиков на одном угольном складе время загрузки одного сухогруза составляет 12–15 часов. С учетом времени на маневровые операции с сухогрузом (подход, отплытие от причала), собственно загрузку угля в корабельные трюмы, выход в открытый океан время подготовки сухогруза к отправке в порт назначения составляет 20–22 часа.

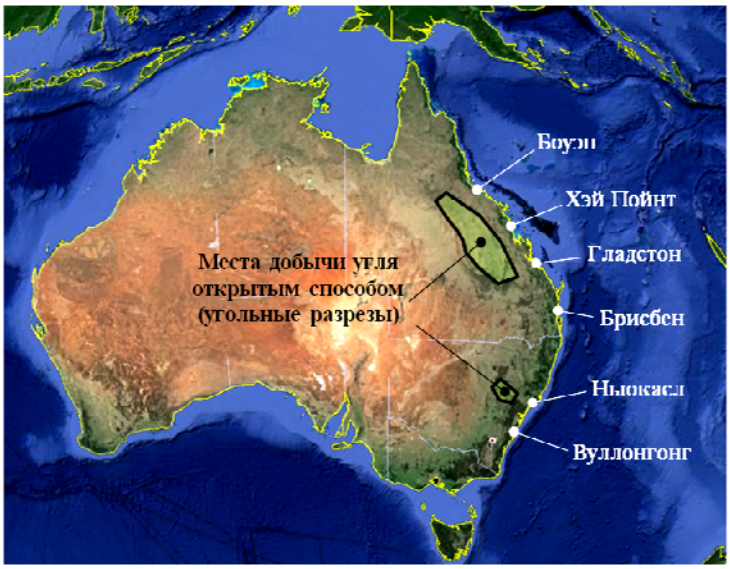


Рис. 3. Схема размещения морских угольных терминалов на восточном побережье Австралии

С учетом этого одновременно в шести портах возможен разовый объем загрузки угля в диапазоне от 2,85 до 3,04 млн т за одни сутки. Учитывая время на техническое обслуживание, годовые и капитальные ремонты, принимаем годовой календарный фонд эффективного рабочего времени 300 суток. Принимая во внимание эти показатели, получим возможный годовой объем угля, идущего на экспорт, в диапазоне 855–912 млн т. Этот показатель требует подтверждения путем определения технологических возможностей каждого из функционирующих морских угольных терминалов. Далее кратко остановимся на технических характеристиках перегрузочного оборудования, установленного в морском порту Ньюкасл, в котором осуществляется погрузка угля в сухогрузы, добытого на угольных месторождениях в штате Новый Южный Уэльс.

В морском порту Ньюкасл три морских причала обеспечивают одновременную установку под погрузку 7 балкеров водоизмещением не менее 150 000 т каждый, но по производительности роторных погрузчиков на трех угольных складах суточная возможность загрузки кораблей в этом порту составляет всего 6 балкеров (рис. 4).



Рис. 4. Фрагменты морских угольных терминалов в порту Нью-Касл: а) компоновочная схема размещения терминалов; б) Северный и Центральный терминалы; в) Южный терминал

Северный угольный склад с координатами центра 32^0 $52^/$ $24^{//}$ ю., 151^0 $45^/$ $47^{//}$ в. оборудован 8 конвейерами протяженностью 2,7 км и 4 роторными экскаваторами-погрузчиками. Центральный угольный склад имеет координаты центра 32^0 $52^/$ $35^{//}$ ю., 151^0 $45^/$ $17^{//}$ в., оборудован 4 конвейерами протяженностью 1,4 км и обслуживается 4 роторными экскаваторами-погрузчиками. Южный угольный склад имеет координаты центра 32^0 $54^/$ $06^{//}$ ю., 151^0 $45^/$ $38^{//}$ в., оборудован 8 конвейерами протяженностью 1,0 км и обслуживается 4 роторными экскаваторами-погрузчиками. Всего за один календарный год в этом порту на экспорт может быть отгружен объем угля на уровне 270 млн т.

Инновационные решения в области повышения производительности транспортной железнодорожной составляющей детально просматриваются на снимках со спутников. На рис. 5 в его центральной части просматриваются ангары углеприемных ям на северном угольном складе в порту Ньюкасл. При прохождении над этими ямами вагонов с открытыми люками производится выгрузка угля. Вполне понятно, что в этом процессе отсутствуют стационарные вагоноопрокидыватели, при функционировании которых неизбежно возникает потребность в разъединении, а затем в соединении всех вагонов, входящих в железнодорожный состав. Последнее обстоятельство существенно снижает производительность железнодорожного транспорта в целом. На этом складе одновременно могут выгружаться четыре состава, о чем говорит наличие четырех железнодорожных путей, входящих и выходящих из ангара по выгрузке угля.

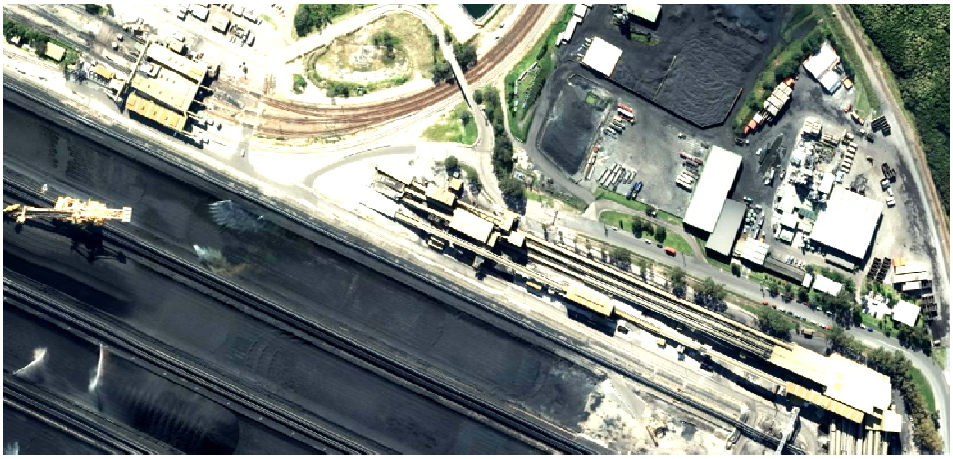


Рис. 5. Фрагмент спутникового снимка с изображением ангаров для выгрузки угля из вагонов и наклонных углепередаточных конвейеров

Весьма интересным является инженерное решение по загрузке железнодорожных составов углем в местах его добычи. В центре рис. 6 изображена накопительная металлическая башня для кратковременного хранения угля. В нижней части конструкции башни имеется сквозной проезд, позволяющий свободно перемещаться железнодорожному составу под разгрузочными люками. Конструктивные размеры башни диаметром 15 м и высотой до 50 м позволяют размещать в ней до 7 тыс. т угля, предназначенного для загрузки в железнодорожный состав из 70 вагонов. Время погрузки одного состава не более 30–35 минут.

Всего на момент спутниковой съемки в 2008 и в 2015 гг. на транспортировке угля до морского порта Ньюкасл задействовано 2328 и 2684 вагонов грузоподъемностью 100 т и 102 и 117 магистральных тепловоза (российский аналог ТЭМ-7) соответственно. Принимая во внимание количество вагонов, участвующих непосредственно на перевозке угля (часть вагонов находится на техническом обслуживании или в ремонте) в количестве 2400 единиц, трехкратное их обращение за 24 часа и при количестве

рабочих дней в году 360, получим фактически достижимый объем перевозки угля на уровне 259 млн т в год. При сравнении производительности транспортной составляющей с техническими возможностями погрузочного оборудования в морских терминалах отметим незначительное отставание первой на 11 млн т. Результаты выполненной работы наглядно демонстрируют возможности обеспечения объема добычи и экспорта угля на уровне 255–260 млн т в год в австралийском штате Новый Южный Уэльс.



Рис. 6. Компоновочная схема погрузки угля в железнодорожные составы

В заключение отметим, что, используя спутниковые снимки высокого разрешения, можно эффективно выполнять исследовательские работы аналитического характера, связанные с определением возможностей мировой экономики в глобальном недропользовании буквально на всех континентах, независимо от государственной принадлежности и технологических показателей транспортной логистики, обеспечивающей движение добытых ресурсов Земли для нужд современного общества.

УДК 551.507, 550.34

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ВЕСНОЙ 2011 г.

В. Б. Кашкин, Т. В. Рублева, Р. В. Одинцов
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
e-mail: tvrubleva@mail.ru

По спутниковым данным ATOVS построены и проанализированы вертикальные профили температуры-давления на изобарических уровнях 200, 300 и 450 гПа в эпицентре землетрясения для «спокойной» и сейсмически возмущенной атмосферы. Для рядов температур на изобарических уровнях 450 и 200 гПа вычислены коэффициенты корреляции. По данным спектрометра OMI/AURA, над эпицентральной областью Японского землетрясения выявлена озонная аномалия с повышенным содержанием озона.

Ключевые слова: сейсмическая активность, землетрясение, дегазация, озон.

Катастрофические события изучаются достаточно давно, однако происходящие из года в год новые природные катаклизмы вызывают повышенный научный интерес. Весной 2011 г. в Северном полушарии наблюдался ряд уникальных геофизических явлений, обсуждение механизма которых сохраняет свою актуальность. Во-первых, в этот период в полярных и приполярных широтах образовались сильный циркумполярный вихрь и озоновая аномалия, подобные атмосферным объектам, существующим в весенний период в Южном полушарии [1]. А во-вторых, в области умеренных широт в зоне постоянной сейсмической опасности (около восточного побережья о-ва Хонсю, Япония) в марте 2011 г. произошло сильнейшее катастрофическое событие магнитудой $M = 9{,}0 – 9{,}1$ [2]. Землетрясение возникло в Японском жёлобе – глубоководной океанической впадине, где океаническая Тихоокеанская плита погружается под материковую Охотскую плиту, над которой располагается часть Евразийского континента и некоторые Японские острова. Координаты эпицентра землетрясения 38º19’ с. ш. и 142º21’ в. д., глубина гипоцентра –32 км. Целью данной работы является исследование атмосферных возмущений и изменение малых газовых составляющих (на примере озона) над сейсмоактивной областью Японского землетрясения.

Для изучения атмосферных изменений над эпицентральной областью использовались спутниковые данные о вертикальных профилях температуры-давления, полученные с помощью аппаратуры ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, КА NOAA серии POES) [3]. При восстановлении профилей решается обратная задача, для этого использовался пакет прикладных программ IAPP. Поле вертикальных профилей температуры атмосферы определяется на неравномерной сетке из 600 точек, выбираемых из условия получения заметной разницы в значениях между соседними точками. Стандартное отклонение данных ATOVS по температуре от показаний радиозондов составляет 1,3 К.

Графики изменения температур атмосферы T_{450} и T_{200}, на изобарических уровнях 450 и 200 гПа соответственно, с 1 февраля по 14 апреля 2011 г. приведены на рис. 1. В условиях «спокойной» атмосферы уровень 450 гПа обычно лежит ниже тропопаузы, а уровень 200 гПа попадет в тропопаузу. Коэффициент корреляции между временными рядами температур T_{450} и T_{200} за исследуемый период составляет $R = –0{,}76$. Во время сейсмических событий на уровне 200 гПа наблюдается повышение температуры, а на изобарическом уровне 450 гПа – понижение. Обращает на себя внимание значительная амплитуда колебаний температуры на каждом уровне, достигающая 20 °С и более. Как

указывается в [4], графики на рис. 1 можно интерпретировать как изменения давления на различных уровнях температуры. Уменьшение температуры на графике характеризует преобладающее увеличение давления, а увеличение температуры – уменьшение давления.



Рис. 1. Изменение температур T_{450} и T_{200} на уровнях 450 и 200 гПа, стрелками показаны моменты землетрясения 11 марта (M = 9,0 – 9,1) и афтершока 11 апреля (M = 7,0)

Изменения температур на изобарических уровнях 200, 300 и 450 гПа (июль 2011 г.) в эпицентре землетрясения показаны на рис. 2. Сейсмические события в данном регионе в это время практически завершились. Графики на рис. 2 существенным образом отличаются от тех кривых, которые приведены на рис. 1 для сейсмически возмущенной тропосферы. Анализ результатов показывает, что ряды температур на рис. 2 схожи между собой и, возможно, характеризуют метеорологические процессы в атмосфере. Парные коэффициенты корреляции для рядов на уровнях 200, 300 и 450 гПа лежат в интервале R = 0,26 – 0,75.

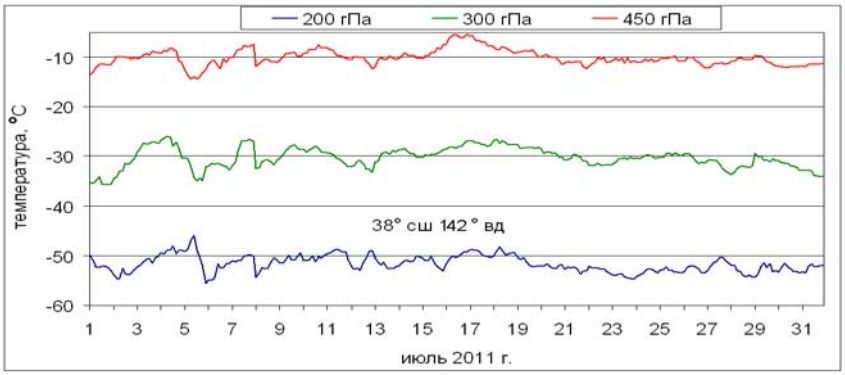


Рис. 2. Изменение температуры на изобарических уровнях 200, 300 и 450 гПа в эпицентре землетрясения в июле 2011 г.

Для анализа вариаций температур атмосферы T_{450} и T_{200} в эпицентральной области Японского землетрясения был расширен временной интервал исследования (рис. 3). С 01.07.2010 г. по 01.09.2011 гг. средняя температура на изобарическом уровне 200 гПа практически не меняется. Средняя температура на уровне 450 гПа, начиная с сентября 2010 г., уменьшается, достигает минимума в январе–апреле 2011 г. и возвращается к прежней величине в июне 2011 г. Данные вариации характеризуют сезонную изменчивость. Представляет интерес изменение коэффициента корреляции R между временными рядами T_{450} и T_{200}. Результаты вычислений значений R за каждый месяц исследуемого периода представлены на рис. 4. До 01.09.2010 г. и после 30.06.2011 г.

коэффициент корреляции положительный, что типично для сейсмически-спокойной обстановки. В декабре 2010 г. и январе–апреле 2011 г. возбуждаются интенсивные внутренние гравитационные волны [4]. Значения R – отрицательные. Минимальное значение $R = –0{,}86$ достигается в марте 2011 г., когда произошло сильное землетрясение.



Рис. 3. Изменение температуры на изобарических уровнях 450 и 200 гПа над эпицентром землетрясения



Рис. 4. Коэффициент корреляции между временными рядами T_{450} и T_{200} для изобарических уровней 200 и 450 гПа

Известно, что в момент сейсмического события происходит резкое увеличение потока газов из внутренних областей Земли [1]. В работе на основе спутниковых данных проведен анализ изменения атмосферного озона над эпицентром Японского землетрясения в период его подготовки, во время основных подземных толчков и колебаний земной поверхности, после сейсмического события. Изменение состояния озонового слоя изучалось по космическим данным, полученным спектрометром OMI (КА Aura, USA). Прибор OMI измеряет рассеянное «назад» солнечное УФ-излучение в двух спектральных каналах UV-1 (264–311 нм) и UV-2 (307–383 нм). Погрешность измерений 2–4 %. Ежедневные озонные данные представлены на сайте NASA [5] на сетке 1°x1°. Трехмерное изображение озонового слоя над очаговой областью Японского землетрясения за 9.03.2011 г., построенное на основе спутниковых данных, показано на рис. 5.

Анализ состояния озонового слоя над эпицентральной областью (рис. 6) показал, что с 7 до 11 марта общее содержание озона (ОСО) увеличилось с 344 до 412 е.Д. (1 е.Д. = 10^{-3} см). Над эпицентром «облако с повышенным содержанием озона» просуществовало семь дней (с 7 по 14 марта), что, вероятно, связано с продолжающейся сейсмической активностью в данном регионе и, как следствие, с дополнительным притоком количества озона в приземной атмосферный слой.

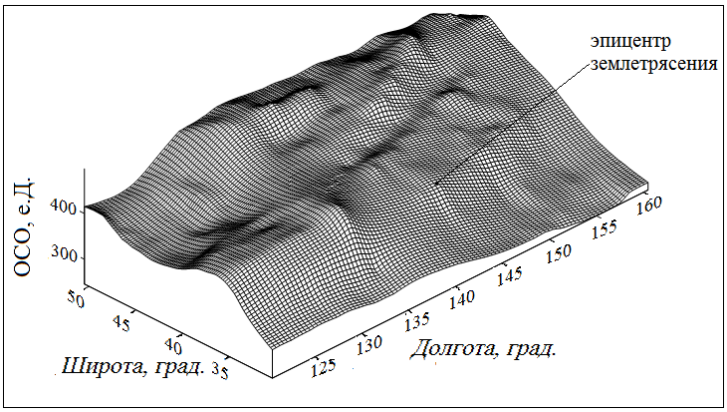


Рис. 5. Изображение озонового слоя над очаговой областью Японского землетрясения за 9.03.2011 г.

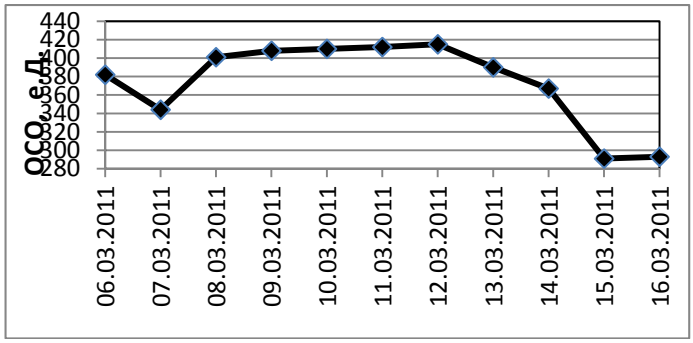


Рис. 6. Изменение ОСО над эпицентром Японского землетрясения

Таким образом, по спутниковым данным ATOVS для периода с 01.07.2010 г. по 01.09.2011 г. были проанализированы вертикальные профили температуры-давления на различных изобарических уровнях (200, 300, 450 гПа) для «спокойной» и сейсмически возмущенной атмосферы над эпицентром землетрясения. Отражением активных сейсмических явлений стало изменение температур на изобарических уровнях 200 и 450 гПа. На основе спутниковых данных спектрометра OMI/AURA над эпицентральной областью Японского землетрясения выявлена озонная аномалия с повышенным содержанием озона. Время существования данной аномалии составило семь дней (с 7 по 14 марта) – это период наибольшей сейсмической активности. Представленные в работе результаты демонстрируют отдельные, но весьма характерные атмосферные возмущения, связанные с волновой и сейсмической активностью в момент землетрясения.

Список литературы

1. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2015. 184 с.

2. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET / Н.П. Перевалова, С.В. Воейков, Ю.В. Ясюкевич, А.Б. Ишин, Е.С. Воейкова, В.А. Саньков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 172–180.

3. URL: http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html

4. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.

5. URL: fttp://toms.gsfc.nasa.gov/

УДК 634.9:504.03

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

М. А. Корец, И. В. Данилова, А. С. Шишикин
ИЛ СО РАН
e-mail: mik@ksc.krasn.ru

В рамках государственных контрактов на проведение работ по мероприятию «Мониторинг состояния окружающей среды в зоне воздействия предприятий Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» дешифрированы материалы космической съемки, проведена камеральная обработка результатов полевых работ, дана оценка современных размеров и границ зон различной степени нарушенности растительности, а также изменений состояния растительности за период 1991–2011 гг.

Ключевые слова: норильский промышленный район, космическая съемка Landsat TM, NDVI, оценка картирование состояния растительности.

Введение

Целевое назначение работ заключалось в проведении экологического мониторинга в зоне воздействия предприятий Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель». Задачей дистанционных наблюдений на территории воздействия предприятий норильского промышленного района являлось уточнение размеров и границ зон различной степени нарушенности растительного покрова и оценка их динамики в период 1991–2011 гг.

Исходные данные

На территорию в зоне воздействия предприятий Заполярного филиала были подобраны материалы космической съемки среднего и высокого пространственных разрешений (2000–2011 гг.). Для оценки современных размеров и границ зон различной степени нарушенности растительности и их картографирования использовалась мультиспектральная съемка среднего пространственного разрешения (30 м/пикс.) Landsat-5 TM. В качестве опорных (калибровочных) данных для зонирования территории по степени повреждения растительного покрова привлекалась база данных наземных измерений 2000–2011 гг., а также выборочная съемка высокого пространственного разрешения (3–1 м/пикс.) QuickBird и WorldView-2.

Полевые исследования проводились в соответствии с программой и требованиями нормативных документов и [1, 2] с учетом специфики района исследований. Основными признаками для дешифрирования нарушенности растительного покрова являлись два показателя. Первый показатель – доля сухостоя в составе насаждения. Дешифрирование космических снимков по этому показателю позволяет сравнивать зоны нарушенности насаждений с лесопатологической картой 1991 года. Второй показатель – степень нарушенности растительного покрова, выраженная в баллах от 1 до 5 (ненарушенные (фоновые) экосистемы, слабонарушенные, умеренно нарушенные, сильно нарушенные и очень сильно (тотально) нарушенные). Этот показатель выведен по комплексу лесоводственных, геоботанических параметров растительных сообществ, а также учитывает уровень химического загрязнения (по содержанию химических загрязнителей в растительных образцах).

С целью сравнительного анализа изменений состояния растительности в зоне воздействия предприятий была использована оцифрованная карта результатов

лесопатологического обследования 1987 и 1991 гг. для части Таймырского лесничества бывшего Таймырского лесхоза Красноярского края [3].

Методы

Оценка размеров и границ зон различной степени нарушенности растительного покрова осуществлялась по относительному уровню содержания хлорофилла, оцененному через индекс NDVI [4], рассчитанному по стандартной формуле разностного отношения спектральной яркости красного (R) и ближнего инфракрасного (IR) каналов спутниковой съемки: $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$. С целью снижения влияния сезонной вариабельности индекса и влияния атмосферных помех для начального (2001 г.) и конечного (2011 г.) периодов рассчитывались композитные по максимуму NDVI изображения на основе 3–5 разносезонных снимков (2000–2001 и 2010–2011 гг.).

Для категорий состояния растительности (на основе процента усыхающих и усохших насаждений) в окрестностях ключевых точек (в окнах размером 3х3 пикселя – 90х90 м) были рассчитаны средние значения вегетационных индексов по изображениям Landsat TM 2001 и 2011 гг. Далее определялись интервалы значений NDVI, соответствующие различным категориям повреждения растительности, вычислялись также средние значения и среднеквадратичные отклонения для каждой категории. При использовании изображения NDVI 2001 г. расчет велся по 61 ключевой точке 2001–2004 гг., а для изображения NDVI 2011 г. совместно анализировались данные полевых учетов 2008–2011 гг. и результатов дешифрирования модельных участков по изображениям высокого разрешения, общей численностью 320 точек. Середины интервалов значений вегетационных индексов для выделения соответствующих категорий состояния и степеней нарушенности растительности устанавливались как расчетные средние значения индексов, а ширина интервалов выбиралась пропорциональной среднеквадратичному отклонению соответствующих индексов. В результате интервальной классификации исходных значений вегетационных индексов формировались изображения зон или категорий состоянии растительности по проценту сухостоя для двух периодов – 2001 и 2011 гг.

При картировании из расчета исключались высокогорные территории (выше 580 м н.у.м.), так как низкое значение вегетационных индексов в этих районах в первую очередь обусловлено отсутствием древесной растительности по естественным климатическим причинам, не связанным с антропогенной нарушенностью. Для этого по цифровой модели рельефа создавались маски высот. Маски водной поверхности, каменистых россыпей, горных тундр, болот и регулярно затапливаемых площадей формировались с использованием метода неуправляемой классификации ISODATA [4].

Результаты и обсуждение

В результате для периодов 2001 и 2011 гг. были сформированы карты категорий состояния растительности по проценту сухостоя. На основе полученных карт были рассчитаны площади соответствующих зон (табл. 1).

Таблица 1

Площади категории состояния насаждений в 2001 и 2011 гг. по данным спутниковой съемки

Категория состояния	Количество усыхающих и сухостойных деревьев, %	Площадь зон различных категорий состояния насаждений, тыс. га	
		2001 г.	2011 г.
Ослабленные	11–25	610	510
Сильно ослабленные	26–50	570	658
Усыхающие	50–75	505	555
Погибшие	75 и более	570	710
ИТОГО		2255	2433

Учитывая, что лесопатологические обследования проводились только для территории Таймырского лесхоза, для сравнительного анализа с результатами космомониторинга был произведен перерасчет площадей нарушенности растительности только для района, ограниченного территорией лесопатологического обследования 1991 г. с исключением площадей нелесных категорий (гольцы, каменистые россыпи, болота, тундры, сенокосы, песчано-галечные отмели и горная тундра). В результате были получены усеченные карты категорий состояния для трех периодов 1991, 2001 и 2011 г. (рисунок) и рассчитаны площади соответствующих им зон (табл. 2).

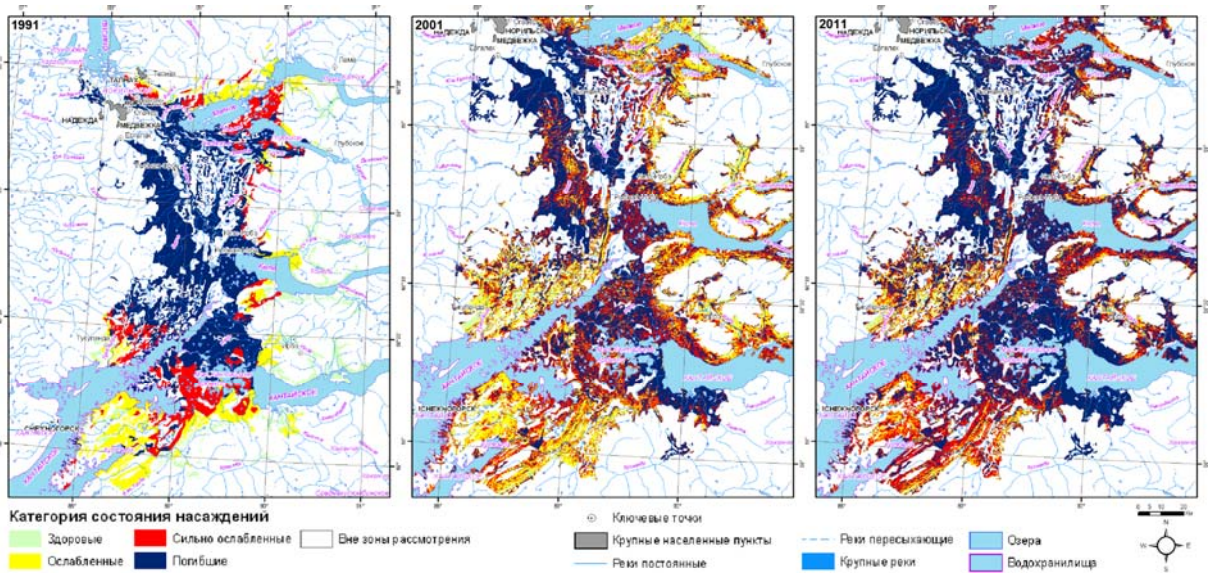


Рис. Категории состояния насаждений, выделенные при лесопатологическом обследовании 1991 г. и по данным космической съемки 2001 и 2011 гг.

Таблица 2

Динамика площадей насаждений по категориям состояния за период 1991–2011 гг. (для территории Таймырского лесхоза)

Категория состояния	Площадь зон различной степени нарушенности растительности, тыс. га		
	1991	2001	2011
Ослабленные	124	106	104
Сильно ослабленные	122	236	215
Усыхающие	351	183	213
Погибшие		117	224
ИТОГО	597	642	756

Как видно из данных таблицы, ухудшение жизненного состояния насаждений не локализовалось в границах прежних зон. Произошло перераспределение площадей из одной категории состояния в следующую. Таким образом, в границах лесопатологического мониторинга площадь поврежденных лесов за 20-летний период увеличилась на 26 % и составила 756 тыс. га, при этом зона усыхающих и погибших лесов увеличилась на 24,5 %.

Согласно картам зон повреждения лесов, границы поражения лесов сместились преимущественно в южном и северном направлениях. Отмечено расширение зоны поражения в восточном направлении, охватывающем западные отроги плато Путорана.

Стоит отметить разницу в методах выделения категорий состояния насаждений. Если при дешифрировании снимков по характеристике нарушенности (выраженной в индексе NDVI) имеет значение каждый пиксель, то при лесопатологическом обследовании границы зон определялись границами таксационных кварталов, что достаточно грубо. Тем не менее при сравнении этих фрагментов видно, что произошло общее перераспределение площадей разных категорий состояний насаждений. За 20-летний период на указанной территории существенно увеличилась доля сильно ослабленных насаждений и границы повреждения фактически значительно сдвинулись в юго-восточном направлении.

Анализ данных дешифрирования показал, что на склонах западной и южной экспозиций, скрытых от прямого воздействия ветров, несущих промышленные выбросы с предприятий НПР, доля сухостоя в составе древостоя соответствует зональной норме (по данным мониторинговых исследований 2001–2010 г. на пробных площадях в условиях природного фона доля сухостоя составляет в среднем 16 %). На ветроударных склонах северной и северо-западной экспозиций, испытывающих на себе наибольшее влияние промышленных выбросов, а также на выровненных возвышенностях рельефа процент сухостоя заметно выше и составляет в среднем 24, 25, 22 % соответственно, в самых неблагоприятных условиях произрастания достигая 40–50 %.

Лесопатологический мониторинг в прежние годы проводился по большей части на территории лесного фонда, при этом оценивалось только состояние лесов. Он преследовал цель оценить ущерб, нанесенный лесному хозяйству региона в результате деятельности предприятий Заполярного филиала. Фактически площадь, подверженная воздействию выбросов предприятий НПР, гораздо шире. Территория поражения относится к лесотундровой зоне, при этом лесистость территории составляет около 35 %, т. е. при проведении лесопатологического мониторинга, во-первых, не учитывается состояние главного зонального типа растительности, а во-вторых, обследуется только часть территории поражения.

Для пространственного представления динамики нарушенности растительности за период 2001–2011 гг. было рассчитано изображение относительного изменения вегетационного индекса NDVI по изображениям Landsat TM 2001 и 2011 гг.:

$$\Delta NDVI = \frac{NDVI_{2011} - NDVI_{2001} + \alpha}{NDVI_{2001}} \cdot 100\ \%,$$

где $NDVI_{2011}$ и $NDVI_{2001}$ – значения вегетационных индексов в 2011 и 2001 гг. соответственно; α – поправка фенологического различия. Поправка фенологического различия использовалась для учета различия в фоновом фенологическом состоянии растительности, вызванном климатическими различиями из-за различия дат съемки и общего фонового климата в 2001 и 2011 гг. Величина поправки вычислялась как среднее значение разницы NDVI в 2011 и 2001 гг., вычисленное для фоновых ключевых участков с минимальной нарушенностью растительности. В нашем случае $\alpha = 0{,}113$.

Оценка изменений состояния нарушенности растительного покрова выполнена на ту часть территории, на которую имелись качественные данные космической съемки в вегетационные периоды 2001 и 2011 годов. Карта относительного изменения вегетационного индекса NDVI иллюстрирует динамику состояния растительности за 10-летний период.

Наибольшие изменения индекса NDVI повсеместно отмечаются в переходных зонах (слабой и умеренной нарушенности), где растительные сообщества еще сохраняют черты зональной нормы, но уже ослаблены настолько, что перманентное воздействие внешних неблагоприятных факторов (в том числе техногенное

загрязнение) неизбежно приводит к изменениям количественных и качественных параметров фитоценозов.

Заключение

На основании материалов наземных измерений и дешифрирования снимков высокого пространственного разрешения в 2011 г. на основе оценки индекса NDVI были уточнены границы зон нарушенности растительного покрова в зоне воздействия предприятий Заполярного филиала. Современные размеры площади повреждения лесов оцениваются в 2,433 тыс. га, а общая зона поражения растительного покрова – в 2,75 млн га.

Выявлена динамика нарушенности растительного покрова. В границах лесопатологического мониторинга площадь поврежденных лесов за 20-летний период увеличилась на 26 % и составила 756 тыс. га. В целом отмечается расширение зоны погибших и сильно ослабленных насаждений в восточном направлении, что подтверждается также ростом площадей соответствующих зон нарушенности.

Список литературы

1. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 336 с.

2. Руководство по полевой практике. Методы сбора и первичного анализа геоботанических и демографических данных / О.В. Смирнова, Л.Г. Ханина, М.В. Бобровский, Н.А. Торопова, Л.Б. Заугольнова // Сохранение и восстановление биоразнообразия: учеб.-метод. издание. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. С. 109–144.

3. Порядок организации и осуществления лесопатологического мониторинга, утвержденный приказом МПР РФ от 09.07.2007 № 174.

4. Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis // Berlin: Springer, 1986. P. 281.

УДК 528.8.04, 528.88

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АНОМАЛЬНО ВЫСОКИХ ВОЛН: ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ПРОГНОЗ ОПАСНОСТИ

Н. О. Кудря[(1)], М. А. Курако[(1)], К. В. Симонов[(2)]
[(1)]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: kudrya_nadezhda@gmail.com
e-mail: mkurako@gmail.com
[(2)]Институт вычислительного моделирования СО РАН
e-mail: simonokv@icm.krasn.ru

Исследование посвящено обработке данных гидрофизического мониторинга морских катастрофических явлений, получивших название «волны-убийцы». Объектом исследования являются записи регистрации волн-убийц в различных морских акваториях. Отдельным вопросом анализа данных наблюдений являются предложения по разработке локальных систем обнаружения предвестников аномально высоких волн в ближней зоне защищаемых гидротехнических объектов. Предлагается группа алгоритмов для построения соответствующих аппроксимаций, спектральной декомпозиции и кластерного анализа данных.

Ключевые слова: гидрофизический мониторинг, волны-убийцы, алгоритмы анализа данных регистрации, локальные системы обнаружения, оценка опасности.

Введение

В работе изучаются зарегистрированные различными системами гидрофизического мониторинга (включая дистанционное зондирование поверхности океана из космоса) случаи возникновения катастрофических волновых явлений (аномально высоких волн) в морских акваториях, которые получили в научной литературе название «волны-убийцы» [1–4].

Волны-убийцы рассматриваются в теоретическом плане как поверхностные волны в океане, которые обладают следующими основными признаками: одиночная волна или небольшая группа волн, состоящая из двух-трёх волн, амплитуда которых значительно превосходит амплитуду остальных волн в данном районе; имеет большую крутизну; возникает внезапно; обладает достаточно большой энергией и импульсом [2–4].

В отличие от цунами, возникающих в результате подводных землетрясений или оползней и набирающих большую высоту лишь на мелководье, появление волн-убийц не связано с катастрофическими геофизическими событиями. В то же время, достигая высоты в 30 и более метров, эти волны несут реальную угрозу для морских судов (танкеров), нефтяных платформ и морских гидротехнических сооружений [3, 4].

Далее рассматриваются основные методы анализа и подходы к оценке опасности от аномально высоких волн на примере акваторий Чёрного и Северного морей.

1. Кластеризация пространственных данных наблюдений

Изучая данные наблюдений для исследуемой акватории Чёрного моря, алгоритм кластеризации данных позволяет разбить на кластеры зарегистрированные случаи проявления волн-убийц и тем самым обозначить конкретные участки акватории, в которых наиболее часто возникают волны убийцы. Процесс кластеризации применён к акватории Чёрного моря, где в качестве базы данных послужили наблюдения за аномальными волнами.

Используемые алгоритмы кластеризации для выделения характерных областей преимущественного проявления волн-убийц в исследуемых акваториях позволяют продолжить исследование их возможной связи с геодинамикой региона, топографией рельефа дна, а также с определёнными геофизическими и гидрофизическими факторами.

2. Вейвлет-анализ данных регистрации

На основе обработки данных наблюдений о волнах-убийцах алгоритмами вейвлет-преобразования получены вейвлет-спектры, дающие представления об энергетических процессах в момент достижения волной максимальной амплитуды.

Численные эксперименты по спектральной декомпозиции проведены на основе данных наблюдений для акваторий Чёрного и Северного морей. Выявлено, что адаптированный и используемый алгоритм visualize_coeffs_distribution модуля PyWavelet, реализованный на языке Python, пригоден для решения поставленной задачи разложения данных профилей волн-убийц в вейвлет-спектр. Расчёты с реальными и модельными данными проведены с использованием различных семейств вейвлетов. В результате выявлены семейства вейвлетов и их конкретные представители (coif5 и db20) как наиболее ярко выделяющие особенности профилей в данных наблюдений (рис. 1, 2).

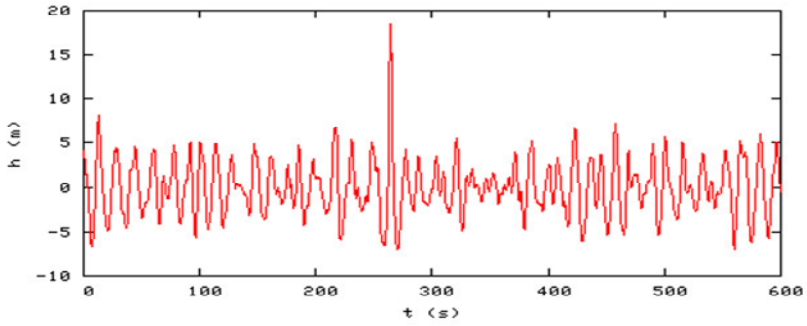
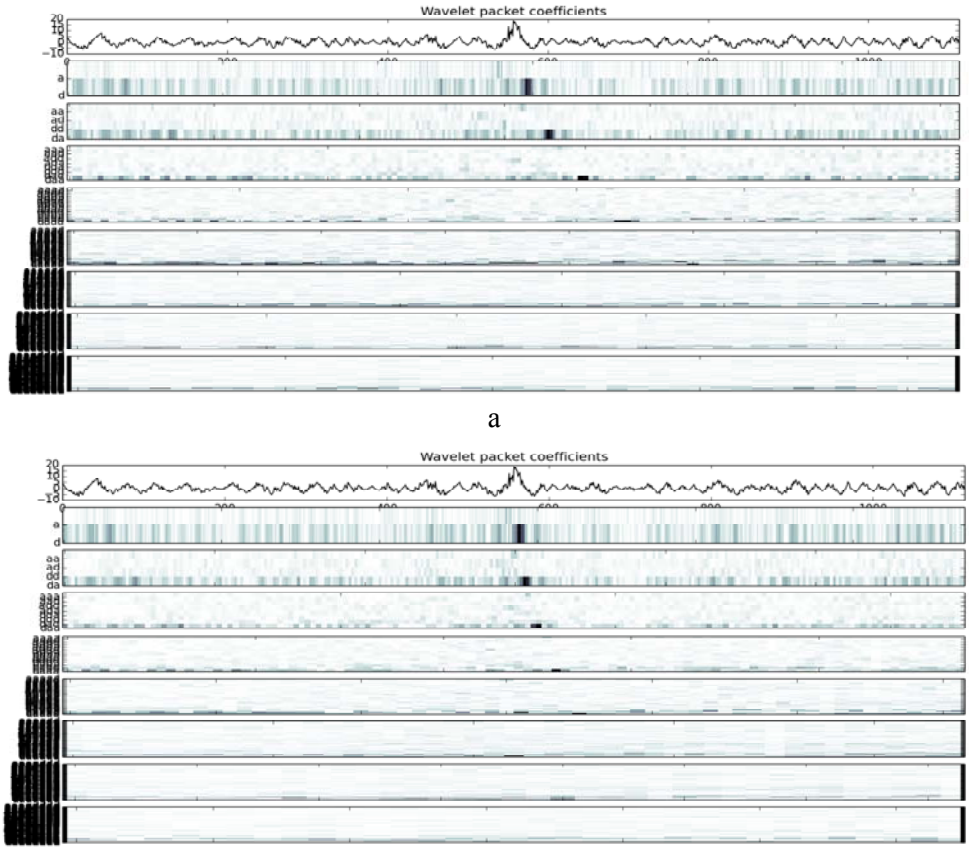


Рис. 1. Данные регистрации аномально высокой волны: Северное море, платформа Горм (1997 г.)



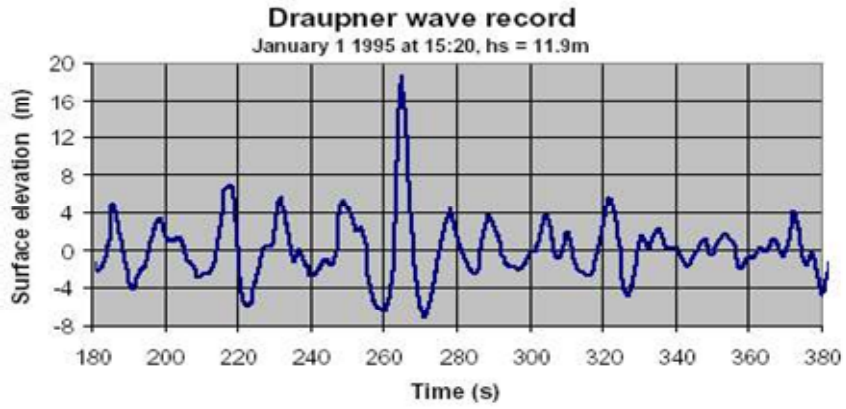
а

б

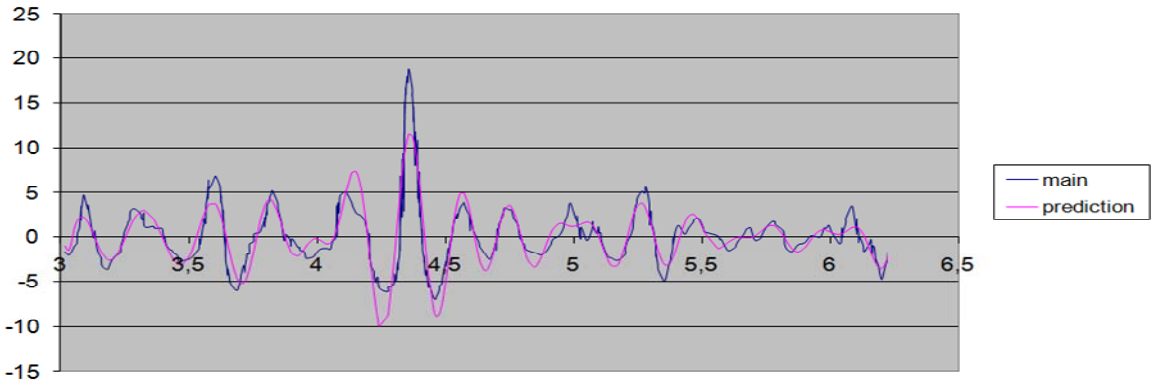
Рис. 2. Вейвлет-преобразование данных регистрации:
а – вейвлет Db20 (Добеши20); б – вейвлет Coif5 (Коифлет5)

3. Аппроксимация данных наблюдений

С помощью алгоритма быстрой нелинейной многопараметрической регрессии во временной области проведена аппроксимация числовых данных регистрации волны-убийцы. В качестве реальных данных рассматривались профили волн-убийц, оцифрованные в GetData Graph Digitizer. Пример численного эксперимента по обработке данных представлен на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Исходные данные (а) и результат работы алгоритма нелинейной многопараметрической регрессии (б)

4. Оценка опасности и ущерба

Волны аномально большой амплитуды представляют угрозу для морских судов, нефтяных платформ и морских сооружений. В отличие от цунами, волны-убийцы возникают внезапно. Всё это делает актуальными задачи оперативного прогноза волн-убийц и оценки риска их возникновения на определённом участке водной поверхности.

Оценку опасности от волн-убийц предлагается разделить на следующие задачи:

– долгосрочная оценка опасности, которая строится через применение функции повторяемости высот аномальных волн в определённом пункте наблюдения;

– краткосрочная оценка опасности, которая основывается на анализе предвестников: изменение максимальный крутизны свободной поверхности в некоторый момент времени и отношения наблюдаемых высот волн (более чем в 3 раза) в тот же момент времени для защищаемого участка морской акватории;

– оценки риска для волн-убийц, которая основывается на базовой формуле оценки опасности от морских природных катастроф и включает оценку ожидаемого ущерба от воздействия вероятной катастрофической волны.

Задача оценки вероятного ущерба решается на основе результатов о статистических характеристиках воздействия волн-убийц за длительный период

времени наблюдений. Одним из способов анализа таких данных может служить применение распределения Парето. В работе этот способ применяется для анализа статистических данных о количестве погибших в результате катастроф супертанкеров от воздействия волн-убийц. Показано, что распределение имеет выраженную линию перегиба и в логарифмическом масштабе хорошо аппроксимируется прямыми линиями.

Заключение

Таким образом, проведённые исследования позволяют более детально рассмотреть актуальные задачи генерации волн-убийц на основе комплексного анализа данных наблюдений. Разработанный инструментарий позволяет решать задачи локального прогнозирования с целью оценки степени опасности волн-убийц.

Список литературы

1. Аномально высокая волна в Чёрном море: наблюдения и моделирование / Б.В. Дивинский, Б.В. Левин, Л.Н. Лопатухин [и др.] // Докл. АН. 2004. Т. 395. № 5. С. 948–950.

2. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2004. 158 с.

3. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Волны-убийцы // Сборник тр. Морского гидрофизического института. Сер. «Современные проблемы океанологии». Вып. 1. Севастополь, 2006. 44 с.

4. Захаров В.Е., Шамин Р.В. О вероятности возникновения волн-убийц // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 2. С. 68–71.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ЛЕСОВ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

Х. Б. Куулар
Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН
e-mail: khbk@list.ru

THE MONITORING INFORMATION SYSTEM OF VEGETATION COVER IN THE TYVA REPUBLIC

K. B. Kuular
FSBIS Tuvinian Institute for Exploration Natural Resources SB RAS
e-mail: khbk@list.ru

Потенциал географических информационных систем не используется в достаточной мере в региональной практике. В этих целях создание региональной информационной системы мониторинга лесов Республики Тыва является необходимым условием осуществления контроля за состоянием лесов.

Ключевые слова: горные леса, спутниковые снимки Landsat, мониторинг лесов, информационная система.

Вписываясь в широтные границы бореальных лесов, территория республики относится к южной части гор Южной Сибири. По площади земель лесного фонда (10 882,9 тыс. га) в Сибирском федеральном округе Республика Тыва занимает 6-е место. Современное распределение основных типов растительности на территории республики отчетливо сопряжено с рельефом, определяющим глубокую контрастность климатических условий. Особые черты находят внешнее выражение главным образом в растительном покрове и в определённых территориальных корреляциях между растительностью, климатом и рельефом. Горно-котловинный рельеф региона оказывает большое влияние на распределение бореальных лесов, и отмечается хорошая корреляция с глубиной расчленения рельефа ($R = 0.53$), со среднегодовой температурой воздуха ($R = 0.43$).

Горно-таёжные и высокогорные лиственничные и тёмнохвойные леса Республики Тыва являются наиболее уязвимыми в условиях изменяющегося климата и возрастания антропогенного воздействия, и сохранение и повышение устойчивости лесных экосистем становится важнейшей задачей. Это можно решить на основе интеграции данных о лесах региона в информационную систему мониторинга бореальных лесов, что даёт возможность обрабатывать комплексную разнообразную информацию в едином логическом пространстве. В настоящее время информационная база мониторинга лесов республики формируется:

1. Полевыми данными (2002–2015 гг.), имеющими все высотные пояса на территории ключевых участков и их цифровыми моделями рельефа (ЦМР), данными лесоустройства Государственного комитета лесного хозяйства Республики Тыва, оценивающими состояние лесов (1984–1987 гг.).

2. Данными климата Тувинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и сведений, имеющимися в открытом доступе в Интернете (1960–2015 гг. с объёмом 102 МБ), оценивающими климатическую и погодную ситуацию в республике.

3. Картографическими данными (топокарт м-ба 1:100 000 (1980–1984 гг.), картосхемы лесов республики м-ба 1:300 000 (1992 г.), лесоустроительных планшетов лесничеств м-ба 1:50 000, карты растительности А.И. Шретера м-ба 1:5 000 000 (1957 г.), карты ландшафтов Алтае-Саянского экорегиона м-ба 1: 2000 000 (2007 г.)).

4. Данными о пожарах растительности авиационной и наземной охраны Государственного комитета лесного хозяйства Республики Тыва; спутниковой информацией, собираемыми в центре приема данных со спутников ИЛ СО РАН (Красноярск) с 1999 г., данными спутника Landsat.

5. Спутниковыми снимками Landsat TM/ETM+/OLI-TIRS (с объёмом 282 Гб), фиксирующими состояние лесов в период 1976–2015 гг. Созданы карты лесов ключевых участков по следующему алгоритму: а – отбор наиболее значимых каналов снимков методами дисперсионного анализа; б – классификация (автоматическая и с обучением, вегетационными индексами: NDVI (normalized difference vegetation index), NDWI (normalized difference water index), NMI (normalized moisture index), NBR (normalized burn ratio index), MSI (moisture stress index), SWIR/NIR) снимков и распознавание полученных растровых изображений); в – обработка космоснимков, синтезированных из значимых каналов методом главных компонент; г – идентификация классификации по полевым точкам; д – векторизация объектов и создание полигонального слоя цифровой карты, создание и редактирование атрибутивных таблиц векторных слоев.

В данный момент создается карта лесов Республики Тыва на основе космических снимков Landsat. Методические вопросы дешифрирования космоснимков, определения породного состава лесов по космоснимкам и создания цифровой карты разрабатываются с учётом материалов лесоустройства лесного хозяйства республики.

Таким образом, в данный момент информационная система мониторинга лесов республики организована как система, содержащая многопрофильную информацию о динамике лесов региона: пространственные данные, цифровые карты, атрибутивные данные, динамику процессов, протекающих в лесах, методы получения и обработки данных. Обработка и анализ данных проводится с использованием программных пакетов цифровой обработки изображений и пространственного анализа данных, геоинформационного моделирования Erdas Imagine 9.2, MapInfo 7, ArcView 9.3, ArcMap 10.1, также статистических пакетов Statistica 6.0, Grafer 9 и Excel.

УДК 528.8:622

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

А. А. Леженин[(1)], В. Ф. Рапута[(1)], Т. В. Ярославцева[(2)]
[(1)]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru, raputa@sscc.ru
[(2)]ФБУН «Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора»
e-mail: tani-ta@list.ru

USE OF SATELLITE OBSERVATIONS FOR CALCULATION OF METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

A. Lezhenin[(1)], V. Raputa[(1)], T. Yaroslavtseva[(2)]
[(1)]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru , raputa@sscc.ru
[(2)]FGUN «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» Rospotrebnadzora
e-mail: tani-ta@list.ru

Предложен метод оперативной оценки составляющих скорости ветра в нижней атмосфере. Используются спутниковые наблюдения траекторий дымовых факелов от высотных труб промышленных предприятий, данные аэрологического зондирования и модель экмановского пограничного слоя. Представлены результаты численного восстановления вертикальных профилей компонентов скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена в зимних условиях для г. Омска.

Ключевые слова: атмосфера, дымовой шлейф, спутниковые снимки, численное моделирование.

Введение. Спутниковые снимки позволяют оперативно отслеживать траектории распространения шлейфов дыма от труб промышленных предприятий на расстояния до нескольких десятков километров [1]. Ширина дымовых шлейфов может варьироваться в достаточно широких пределах. В работе [2] на основе модели переноса и диффузии примеси при продувках газовых скважин на газоконденсатных месторождениях проведён совместный анализ спутниковой и метеорологической информации. Решением обратной задачи подгонки к наблюдениям расчетной формы и оптической плотности шлейфа получена оценка параметров источника выброса и текущих характеристик атмосферы.

Объекты исследования. Зимние спутниковые снимки территории г. Омска послужили основой для анализа распространения дымовых шлейфов в пограничном слое атмосферы. На снимках хорошо визуализируются траектории дымовых выбросов от труб ТЭЦ и промышленных предприятий города. Высота источников варьируется в широких пределах: от нескольких десятков метров до двух-трех сотен метров.

На рис. 1 представлен снимок г. Омска за 3 января 2015 г., полученный с ИСЗ Landsat-8 в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА». Видно, что направления выносов примеси от источников, расположенных вблизи поверхности земли и на больших высотах, существенно различаются. Так, для невысоких источников (предприятие «Техуглерод») траектории выноса дымовой смеси уходят на северо-восток, а дымовые факелы

высотных труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5 сносятся практически в восточном направлении. Высота труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5 составляет 265 и 275 м соответственно. Отметим, что, в зависимости от метеорологических условий, эффективная высота подъема газоаэрозольной примеси, выбрасываемой из этих труб, может достигать 400–500 м. На таких высотах происходит правый поворот ветра [3, 4], что и подтверждается космическим снимком, представленным на рис. 1. Видно, угол поворота дымовых факелов от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5 относительно направления приземного ветра примерно составляет 35 градусов.

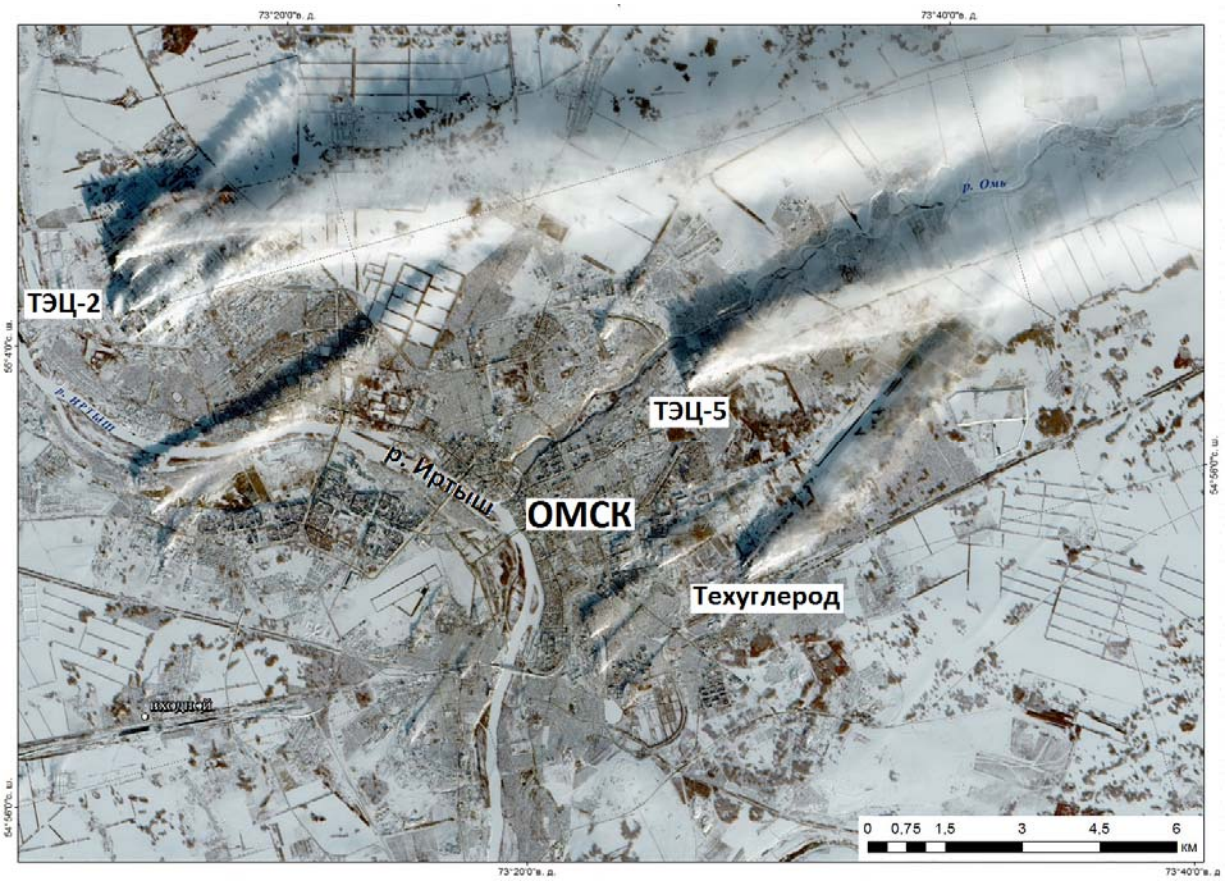


Рис. 1. Снимок г. Омска с ИСЗ Landsat-8 (03.01.2015 г.) на 12 ч местного времени

В табл. 1, 2 представлены распределения по высоте основных метеорологических параметров, измеренных 3 января 2015 г. в 6 и 18 часов местного времени на аэрологической станции г. Омск. Станция расположена на высоте 90 м над уровнем моря.

Таблица 1

Данные аэрологического зондирования нижней атмосферы г. Омска на 06 часов местного времени 3 января 2015 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
90	1007	–30,7	270	1
137	1000	–27,1	270	2
536	947	–20,7	280	6
710	925	–20,5	285	7

Таблица 2

Данные аэрологического зондирования нижней атмосферы г. Омска на 18 часов местного времени 3 января 2015 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
90	1007	–26,5	135	3
171	1000	–24,1	180	3
215	994	–22,8	195	4
267	987	–21,3	204	5
426	966	–19,7	230	6
574	947	–18,3	237	7
749	925	–17,9	245	7

Из анализа табл. 1, 2 следует, что в течение рассматриваемого дня метеорологические условия в г. Омске характеризовались низкими температурами у поверхности земли, наличием инверсии, слабыми приземными ветрами и наблюдались резкие изменения направлений ветра в пограничном слое атмосферы.

Модель восстановления составляющих скорости ветра. Для описания поля скорости ветра в пограничном слое атмосферы использовались уравнения Экмана [3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial U}{\partial z}+2\omega_z\left(V-V_g\right)=0\ , \qquad \frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial V}{\partial z}+2\omega_z\left(U-U_g\right)=0\ . \tag{1}$$

Здесь U, V – горизонтальные компоненты скорости ветра в направлении осей x, y соответственно; U_g, V_g – горизонтальные компоненты геострофического ветра; ось z направлена вертикально вверх; k – коэффициент вертикального турбулентного обмена; ω_z – параметр Кориолиса.

Для случая, когда ось Ox совпадает с направлением геострофического ветра $(V_g=0, U_g=C_g)$, аналитическое решение системы (1) имеет вид [3]

$$U(z,\theta)=C_g\left\{1-e^{-\theta z}\cos(\theta z)\right\}, \qquad V(z,\theta)=C_g e^{-\theta z}\sin(\theta z)\ . \tag{2}$$

Здесь $\theta=\sqrt{\omega_z/k}$.

Соотношения (2) позволяют выразить угол α между вектором геострофического ветра и вектором ветра на высоте h в явном виде

$$tg(\alpha)=\frac{V(h)}{U(h)}=\frac{e^{-\theta h}\sin(\theta h)}{1-e^{-\theta h}\cos(\theta h)}. \tag{3}$$

Таким образом, с помощью выражения (3) можно оценить параметр θ по измеренным составляющим скорости ветра на высоте h или по измеренному значению угла α. Подставляя рассчитанное значение параметра θ в соотношения (2) получим профили скорости ветра в пограничном слое.

Результаты и обсуждения. Верификация модели (1)–(3) была проведена на данных ветрового зондирования в г. Лейпциге [4]. Эти данные получены для достаточно большого временного периода осреднения с привлечением шаропилотных наблюдений. На рис. 2, *а* представлены результаты оценивания составляющих скорости ветра по указанной модели. Параметр θ оценивался по измеренным компонентам

скорости ветра на высоте $h = 400$ м. Из анализа рис. 2, *а* вытекает вполне удовлетворительное согласие измеренных и восстановленных составляющих скоростей ветра.

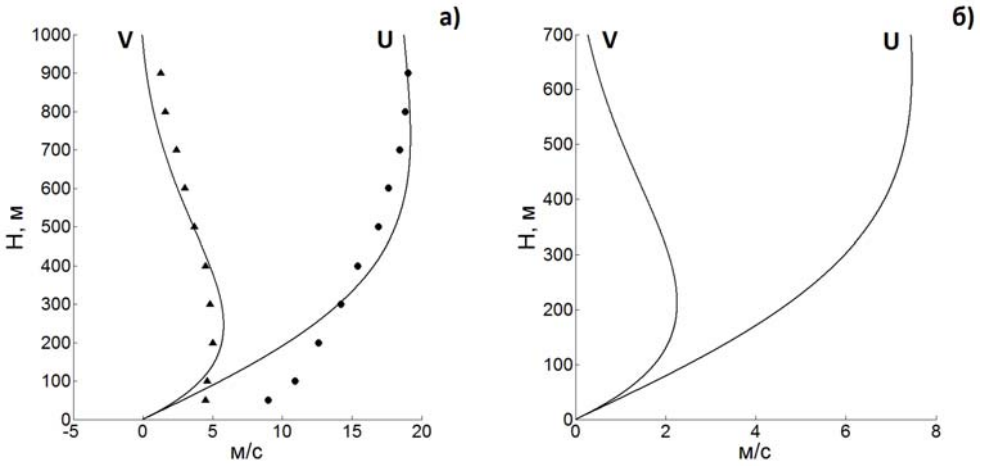


Рис. 2. Рассчитанные по модели (1)–(3) составляющие скорости ветра на основе данных Лейпцигского эксперимента (а) и по измеренному значению угла α на спутниковом снимке г. Омск (б). ●, ▲ – измеренные на различных уровнях компоненты скорости ветра U , V соответственно

На рис. 2, *б* приведены рассчитанные значения U , V при скорости геострофического ветра C_g = 7 м/с, полученной из аэрологического зондирования и по измеренному углу на снимке (рис. 1) между направлениями переноса дымовых факелов ТЭЦ-5 и источников промпредприятия «Техуглерод» ($\alpha = 35^0$).

Заключение. Предложена модель численного восстановления профилей скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы, основанная на уравнениях Экмана. Проведена верификация модели на известных аэрологических данных Лейпцигского эксперимента. Представлены результаты численного моделирования поля ветра, выполненного на основе спутниковых наблюдений дымовых факелов от высотных труб ТЭЦ г. Омска и данных аэрологического зондирования.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН 16.

Список литературы

1. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля / К.Я. Кондратьев, Ал.А. Григорьев, О.М. Покровский, Е.В. Шалина. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 216 с.

2. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника / Б.М. Балтер, Д.Б. Балтер, В.В. Егоров, М.В. Стальная // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66.

3. Динамическая метеорология / под ред. Д.Л. Лайхмана. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 608 с.

4. Браун Р.А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 151 с.

УДК 004.9; 633.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ И ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Ю. А. Маглинец[(1)], Ю. В. Селютина[(1)], О. А. Власенко[(2)]
[(1)]Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО СФУ
e-mail: maglinets@mail.ru
e-mail: 4julia.se@gmail.com
[(2)]Институт агроэкологических технологий, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ
e-mail: ovlasenko07@mail.ru

В статье обсуждается методика использования открытых спутниковых данных (значений вегетационного индекса растительности NDVI) для оценки продуктивности и дифференциации сельскохозяйственных культур. Показано соответствие динамики значений индекса NDVI и динамики запасов биомассы различных зерновых культур, возделываемых на территории Красноярского края.

Ключевые слова: вегетационный индекс растительности NDVI, спутниковая система дистанционного зондирования Terra-MODIS, зерновые культуры, пшеница, ячмень, овес.

Введение

Одним из важных направлений использования открытых спутниковых данных является построение системы оперативного и малозатратного мониторинга сельскохозяйственных угодий, позволяющей получать информацию о составе, состоянии и потенциальной урожайности сельскохозяйственных культур, проводить инвентаризацию земельных ресурсов, оценку биомассы, изучать динамику сельскохозяйственного использования земель [1, 2].

Общедоступные космические данные низкого разрешения (250 м), получаемые спутниковой системой Terra MODIS, позволяют вести наблюдения с высокой частотой и пространственным разрешением, достаточным для наблюдения крупных сельскохозяйственных полей, распознавания типов сельскохозяйственных угодий и отслеживания динамики их продуктивности [3, 4].

В связи с этим целью данной работы являлось уточнение методики использования спутниковых данных для дифференциации и оценки продуктивности пшеницы, ячменя и овса, возделываемых на территории Сухобузимского района Красноярского края.

В задачи исследования входило: проведение агрономической оценки почв тестового полигона; полевое определение динамики влажности почвы и динамики запасов биомассы зерновых культур в определенные фазы их роста и развития; определение корреляционной зависимости и выявление соответствия между значениями NDVI, полученными с помощью спутниковой системы Terra MODIS, и динамикой запасов биомассы зерновых культур в течение вегетации.

Объекты и методы исследований

Исследования проводились на территории красноярской лесостепи в ООО «Учхоз Миндерлинское» Красноярского ГАУ в 2015 г. (рис. 1). Для исследований были выбраны производственные посевы яровой пшеницы сорта «Новосибирская 15» (площадь поля № 166 – 116,8 га), ячменя сорта «Ача» (площадь поля № 155 – 61,9 га), овса сорта «Саян» (площадь поля № 176 – 129,6 га). Посевы пшеницы и ячменя были на комплексах черноземов выщелоченных и обыкновенных, овса – на темно-серых лесных почвах. Анализ погодных условий показал, что гидротермический коэффициент в условиях хозяйства за весь период вегетации был 0,7–1,2 при среднемноголетней

норме 1,3–1,4, таким образом, период вегетации 2015 г. был более теплый и сухой по сравнению со среднемноголетними показателями для данной территории.

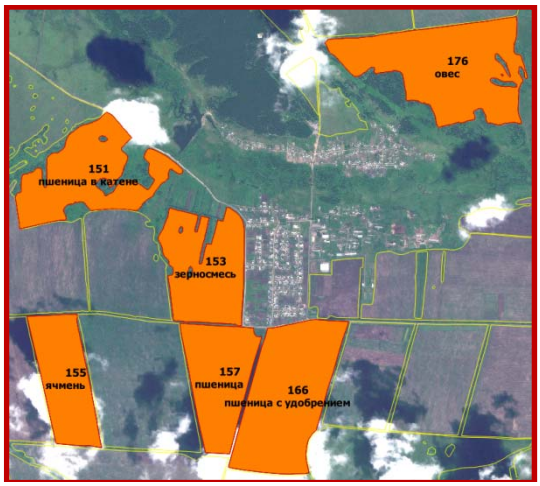


Рис. 1. Картосхема расположения полей для подспутниковых исследований в ООО «Учхоз Миндерлинское» в Сухобузимском районе Красноярского края

Во время полевых исследований надземную биомассу зерновых культур учитывали методом укосов в 10-кратной повторности 7 раз за вегетацию, от момента появления всходов до уборки урожая. Влажность почвы определяли в 10-кратной повторности термовесовым методом. Для расчета корреляционной зависимости и определения соответствия значений индекса NDVI запасам биомассы различных зерновых культур использовали продукт Modis Terra MOD09GQ, композитные снимки которого формируются с предварительно выполненной атмосферной коррекцией каждые 8 дней.

Результаты исследований и обсуждение

На первом этапе задача по оценке продуктивности и дифференциации зерновых культур на основе индекса NDVI предусматривает создание базы данных и проведение наземных исследований, связанных с характеристикой почвенных условий и учетом биомассы зерновых культур в течение вегетации. Почвы тестовых площадок являются самыми распространенными на территории красноярской лесостепи. Содержание гумуса в черноземе выщелоченном высокое, в темно-серой лесной – среднее. Емкость катионного обмена в черноземе выщелоченном очень высокая, в темно-серой лесной – высокая. Реакция среды в пахотном горизонте чернозема выщелоченного слабокислая, в темно-серой лесной почве – среднекислая. Таким образом, уровень потенциального плодородия почв хозяйства оптимальный для возделывания зерновых культур.

Динамика влажности почвы на тестовых площадках зависит от количества осадков и температуры воздуха в течение вегетационного периода. В начале вегетации в период появления всходов зерновых культур влажность почвы была оптимальной на уровне 21–29 %, что соответствует диапазону доступной влаги, в результате всходы были дружные. Самой жаркой и сухой была вторая декада июня 2015 г., в это время содержание влаги в почве было минимальным и колебалось на уровне 9–12 %. В изученных черноземах выщелоченных и темно-серых лесных почвах такая влажность соответствует диапазону труднодоступной влаги. В это время у зерновых культур был период между фазами кущения – выхода в трубку, который является критическим по водопотреблению, снижение влажности почвы в это время может привести к замедлению развития вторичной коревой системы у зерновых. Однако засуха продолжалась недолго, это позволило культурам реализовать свой биологический

потенциал и в целом не отразилось на их продуктивности. Ко второй декаде июня в фазы колошения (выметывания у овса) и цветения влажность почвы возросла до 22–27 % и находилась в доступном диапазоне для растений. В целом содержание влаги в почве и ее динамика в течение вегетационного периода 2015 г. была оптимальной для зерновых культур, за исключением второй декады июня, когда был короткий засушливый период.

На следующем этапе был проведен расчет попиксельных и средних значений NDVI на тестовых полях по снимку Modis Terra в программе ArcMap 9.3 (рис. 2).

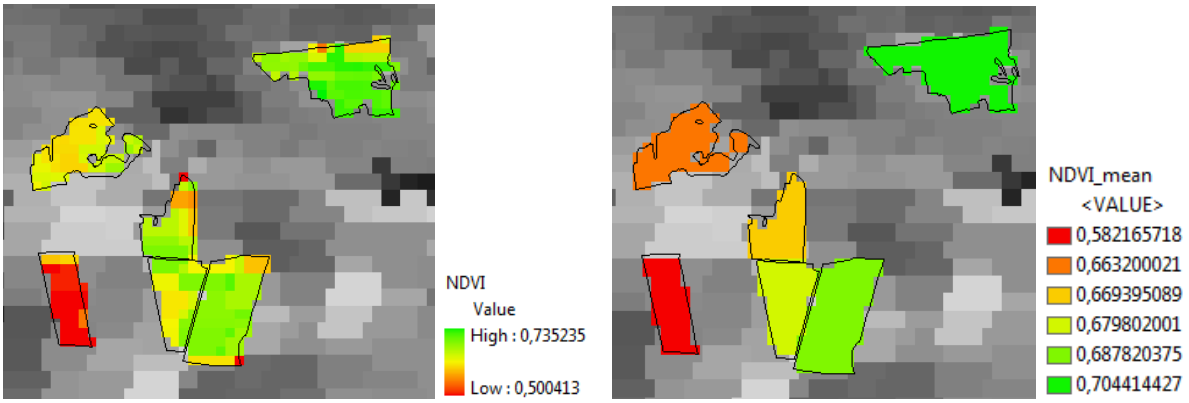


Рис. 2. Пример расчета попиксельных (слева) и средних (справа) значений NDVI для опытных полей по данным снимка Modis Terra от 26.07.2015 (фаза цветения у зерновых культур)

Далее мы сопоставили значения NDVI со спутника Modis и данные о запасах биомассы зерновых культур, полученные в ходе полевых исследований (табл. 1).

Таблица 1

Динамика запасов биомассы зерновых культур и соответствующие им значения NDVI в течение вегетации

Культура	Показатель	05.06.15	22.06.15	07.07.15	15.07.15	25.07.15	11.08.15	21.08.15
Пшеница	NDVI	0,44	0,73	0,84	0,82	0,78	0,46	0,38
	Биомасса г/м^2	37,54	658,84	888,07	1592,17	1640,62	1278,40	689,60
Ячмень	NDVI	0,45	0,65	0,71	0,68	0,62	0,36	0,38
	Биомасса г/м^2	46,58	452,81	477,07	789,87	556,34	604,80	488,76
Овес	NDVI	0,41	0,62	0,73	0,75	0,72	0,60	0,57
	Биомасса г/м^2	37,08	490,50	1333,58	1524,47	1399,37	1339,20	983,62

Для пшеницы характерны самые высокие значения индекса NDVI от 0,44 в начале вегетации до 0,82 в фазу цветения. После цветения значения индекса постепенно снижаются до 0,38. Для ячменя характерны минимальные значения индекса, которые варьируют в пределах от 0,38 до 0,71, после фазы цветения – молочной спелости у ячменя обнаружено резкое падение значений индекса. Для овса динамика значений NDVI очень сглаженная, данные NDVI варьируют в пределах от 0,41 до 0,75, значительного падения индекса в конце вегетации не выявлено.

Корреляционный анализ динамики значений NDVI со спутника Modis и динамики запасов биомассы зерновых культур в течение вегетации представлен в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между индексом NDVI и запасами биомассы культур в течение вегетации

Культура (№ поля)	до 07.07.15	до 15.07.15	до 25.07.15	до 11.08.15	до 21.08.15
Ячмень (№ 155)	0,99	0,85	0,83	0,35	0,30
Яровая пшеница (№ 157)	1,00	0,84	0,79	0,50	0,52
Овес (№ 176)	0,94	0,95	0,95	0,87	0,85

Максимальные коэффициенты корреляции между индексом NDVI и запасами биомассы обнаруживаются в начале вегетации в период между фазами появления всходов и кущения у зерновых культур и составляют 0,94–1,0, что указывает на очень тесную прямую положительную зависимость. Это вполне закономерно, поскольку идет активный прирост биомассы, проективное покрытие пашни и сомкнутость посевов интенсивно увеличивается. Далее в фазы выхода в трубку, колошения (выметывания) и цветения, коэффициент корреляции между индексом NDVI и запасами биомассы зерновых несколько снижается до 0,79–0,95, однако такие значения также указывают на тесную прямую положительную связь. В этот период сомкнутость посевов не увеличивается, но запасы биомассы зерновых культур существенно возрастают. В фазу созревания зерна цвет поля существенно меняется, из зеленого становится желтым. В этот период корреляционная связь между приростом биомассы пшеницы и значениями индекса NDVI снижается до 0,5, что указывает на среднюю прямую положительную зависимость. У ячменя корреляционная зависимость снижается до 0,30, это говорит об очень слабой положительной связи. У овса корреляционная связь остается на значимом уровне 0,85 до конца вегетации.

Выводы и практические рекомендации

Полевые измерения запасов биомассы зерновых культур на территории красноярской лесостепи можно заменить данными значений индекса NDVI со спутника Modis Terra.

Для целей прогнозирования урожайности зерновых культур необходимо использовать значения индекса NDVI до фазы цветение – начало спелости, когда была зафиксирована значимая прямая связь между приростом биомассы и значениями индекса NDVI.

Для целей дифференциации сельскохозяйственных культур необходимо рассматривать значения NDVI в течение всего вегетационного периода, поскольку результаты исследований показали, что для разных зерновых культур динамика значений NDVI имеет свои особенности.

Список литературы

1. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России [Электронный ресурс] // Геоматика № 2, 2011. URL: http://geomatica.ru/pdf/2011_02/2011_02_011.pdf

2. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А., Савин И.Ю. Использование данных спутникового радиометра MODIS для распознавания пахотных земель, чистого пара и посевов озимых культур // Материалы Всеросс. науч. конф. «Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения». 29–30 сент. 2009 г. М., 2010. С. 417–422.

3. Использования спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, В.А. Толпин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.

4. Использование спутникового мониторинга для контроля данных всероссийской сельскохозяйственной переписи России [Электронный ресурс]. URL: http://www.cisstat.com/BigData/CIS-BigData_11%20Rosstat%20IKI.pdf

УДК 433

ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ (ЧИСЛО ДНЕЙ В ГОДУ С ОСАДКАМИ 20 ММ/ДЕНЬ И БОЛЕЕ) В ШИРАКСКОМ РЕГИОНЕ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

В. Г. Маргарян
Ереванский государственный университет. Армгосгидромет
e-mail: vmargaryan@ysu.am

CHANGES THE EXTREME PRECIPITATION INDEX (THE NUMBER OF DAYS WITH PRECIPITATION OF 20 MM / DAY OR MORE) IN THE SHIRAK REGION THE REPUBLIC OF ARMENIA

V. G. Margaryan

В работе рассмотрены, выявлены и проанализированы закономерности изменения динамики числа дней в году с осадками 20 мм/день и более в Ширакском регионе. Использованы данные фактических ежедневных наблюдений за атмосферными осадками на метеостанциях, расположенных на исследуемой территории и близлежащих высокогорных станциях Гидрометслужбы МТУиЧС РА.

Ключевые слова: число дней в году с осадками 20 мм/день и более, обильные осадки, закономерности временного распределения, динамика изменения.

Введение

Атмосферные осадки относятся к одной из наиболее важных метеорологических величин, являясь основным источником увлажнения суши, и представляются большим числом климатических показателей. Число дней с осадками за месяц или за год, наряду с суммами осадков, является существенным климатическим элементом.

Число дней с осадками 20 мм/день и более преимущественно влияет на деятельность человека и окружающую его среду, что может проявляться как в положительном, так и в отрицательном смысле. При наблюдении обильных осадков создаются условия для возникновения некоторых неблагоприятных и опасных метеорологических явлений. Обильные осадки часто затрудняют работу транспорта, наносят вред сельскому хозяйству и другим сферам экономики, в отдельных случаях становятся причиной человеческих жертв. Поэтому в уязвимых сферах для планирования и продуктивной организации работ очень важна оценка обильных осадков, особенно в условиях изменения климата.

Поэтому в работе была поставлена цель – исследовать и оценить, выявить и проанализировать закономерности изменения динамики числа дней в году с осадками 20 мм/день и более в Ширакском регионе.

Материалы и методы

С целью решения поставленной задачи собраны, обработаны и проанализированы ежедневные фактические данные наблюдений за атмосферными осадками на метеорологических станциях изучаемой территории и высокогорных метеостанциях близлежащих территорий. Последние хранятся в фондах Гидрометслужбы Министерства территориального управления и чрезвычайных ситуаций РА и опубликованы в климатическом справочнике [7, 8, 11].

На изучаемой территории инструментальные наблюдения за атмосферными осадками проводятся начиная с конца XIX века (Гюмри, 1895 г.), а систематические –

начиная с 30-х годов XX века. В настоящее время (2014 г.) в области действуют 4 метеорологические станции (Ашоцк, Амасия, Гюмри ГМС, Артик) и 3 поста (Пахакн, Ахурик, Айкадзор) (рис. 1). Чтобы пространственная картина стала более очевидной, в работе использованы также результаты фактических наблюдений высокогорных метеостанций близлежащих территорий (Амберд, Арагац в/г).



Рис. 1. Сеть метеорологических станций и постов в Ширакe

Отметим, что на сети станций Ширакской области в 1948–57 гг. перешли на новый прибор – осадкомер с защитой Третьякова, который заменил дождемер с защитой Нифера, в связи с чем наблюдалось нарушение однородности ряда атмосферных осадков. С целью обеспечения однородности ряда вводятся поправки в ряды наблюдений по дождемеру «на приведение к осадкомеру». Однако он определен только для месячных и годовых значений. С 1966 г. в данные ежедневных наблюдений по осадкомеру вводятся поправки на «смачивание» (некоторое количество осадков не стекает в измерительный сосуд, а остается на стенках ведра осадкомера) [10]. Следовательно, нами проведены исследования с 1966 по 2014 г.

В Республике Армения анализом формирования синоптических условий обильных осадков, изучением закономерностей пространственно-временного распределения, а также вопросами прогнозирования занимались некоторые отделы Гидрометслужбы, Г.А. Александрян, А.М. Геворгян, В.Г. Маргарян, Г.Г. Суренян и др. [1, 3, 4, 9, 10, 12, 13].

Ширакская область в Республике Армения имеет окраинное расположение. Область на севере граничит с Республикой Грузия, на западе – с Турцией. Это самая морозная область Армении, зимой иногда температура воздуха может достигать –42 °С. Самая высокая точка – 4090 м (северная вершина Арагаца), самая низкая – около 1400 м (долина Ахуряна). На приграничной с Турцией реке Ахурян действует Ахурянское водохранилище, которое по своему объему (525 млн м^3) является самым крупным в республике.

Образование осадков вообще, как и обильных осадков на территории Армении, в основном обусловлено сложным взаимодействием атмосферной циркуляции с горным рельефом республики. При выпадении обильных осадков на территории Армении, как правило, наблюдаются фронтальные процессы, активная циклоническая деятельность или внутримассовые процессы.

В процессе исследования применены методы общенаучный, ситуационный, математико-статистический, корреляционный, экстраполяции, географический, а также методы сопоставления и сравнения, анализа. Проанализированы и обработаны литературные источники [1, 2, 5, 6].

Результаты и обсуждения

Обильные осадки, обусловленные географическим местоположением, циркуляцией атмосферы, орографическими особенностями изучаемой территории, выделяются разнообразием внутригодового и пространственного распределения (табл. 1).

На изучаемой территории в течение года максимальное число дней с числом осадков 20 мм и более наблюдается в период весенне-летних половодий (апрель–июнь)

и осенних паводков (октябрь), а минимальное – в периоды летнего и зимнего маловодья. Аналогичный ход внутригодового распределения характерен также для распределения количества осадков.

Таблица 1

Месячные величины числа дней осадков 20 мм и более (дни) для периода 1966–2014 гг.

Мет. станции	*Месяцы*											
	I	*II*	*III*	*IV*	*V*	*VI*	*VII*	*VIII*	*IX*	*X*	*XI*	*XII*
Ашоцк	*0,06*	*0,09*	*0,12*	*0,37*	*0,57*	*0,34*	*0,23*	*0,22*	*0,08*	*0,31*	*0,14*	*0,11*
Амасия	*0,16*	*0,25*	*0,14*	*0,53*	*0,63*	*0,47*	*0,23*	*0,15*	*0,13*	*0,33*	*0,21*	*0,21*
Гюмри ГМС	*0,00*	*0,06*	*0,08*	*0,18*	*0,39*	*0,57*	*0,33*	*0,14*	*0,10*	*0,24*	*0,08*	*0,02*
Артик	*0,03*	*0,03*	*0,11*	*0,21*	*0,41*	*0,64*	*0,33*	*0,28*	*0,20*	*0,43*	*0,05*	*0,00*
Арагац в/г	*0,56*	*0,87*	*1,09*	*0,85*	*0,55*	*0,34*	*0,43*	*0,44*	*0,15*	*0,54*	*0,81*	*0,94*
Амберд	*0,35*	*0,53*	*0,43*	*0,55*	*0,71*	*0,31*	*0,24*	*0,14*	*0,14*	*0,37*	*0,39*	*0,39*

Самая большая повторяемость случаев осадков за год 20 мм и более в среднем наблюдается на метеорологической станции Амасия (около 3,4 дня), которая растет с высотой (рис. 2). Число дней с осадками 20 мм и более за год колеблется сравнительно в больших пределах – 0–20 дней. Причем амплитуда колебания возрастает с высотой местности.

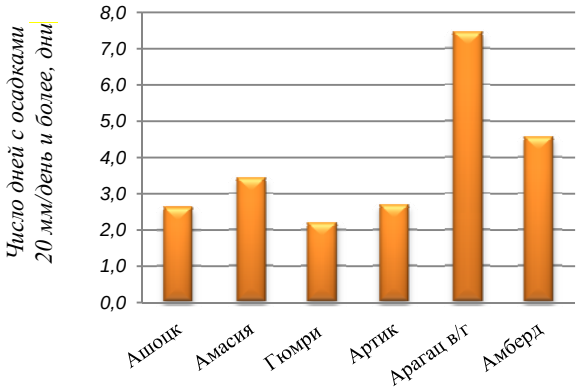


Рис. 2. Число дней в году с осадками 20 мм/день и более за 1966–2014 гг. на метеорологических станциях

Как правило, с высотой местности наблюдается рост и годового количества атмосферных осадков, и числа дней с количеством атмосферных осадков 20 мм и более за год (табл. 2). Однако из-за микроклиматических особенностей (в особенности крутизны склонов, местоположения, характера рельефа) иногда могут наблюдаться отклонения от указанных закономерностей.

Таблица 2

Число дней с осадками 20 мм и более (дни) по вертикальным поясам

Высота над уровнем моря, м														
1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000
Число дней в году с осадками 20 мм/день и более, дни														
1,6	1,9	2,2	2,8	3,4	4,0	4,6	5,2	5,8	6,4	7,0	7,6	8,2	8,8	9,4

Выяснилось, что с высотой на каждые 1000 м годовое количество осадков изучаемой территории возрастает примерно на 287 мм, в среднем годовое число дней с обильными осадками (≥ 20 мм/день) – на 3 дня [9, 10].

Выяснилось, что на изучаемой территории как закономерность замечена тенденция как роста (Ашоцк), так и понижения (Амасия, Гюмри, Артик) числа дней с осадками 20 мм и более за год. Отметим, что тенденция понижения наблюдается

также на близлежащих высокогорных метеорологических станциях (Арагац в/г, Амберд) (рис. 3).

Получается, что динамика изменения годового числа дней с осадками 20 мм и более также тесно связана с местными особенностями, т.е. носит локальный характер. Следовательно, для изучения как пространственного распределения, так и динамики изменения обильных осадков необходимы микроклиматические исследования. Это особенно необходимо для осуществления соответствующих мероприятий (их рационального использования или правильной организации и планирования работ по смягчению воздействия неблагоприятных и опасных последствий).

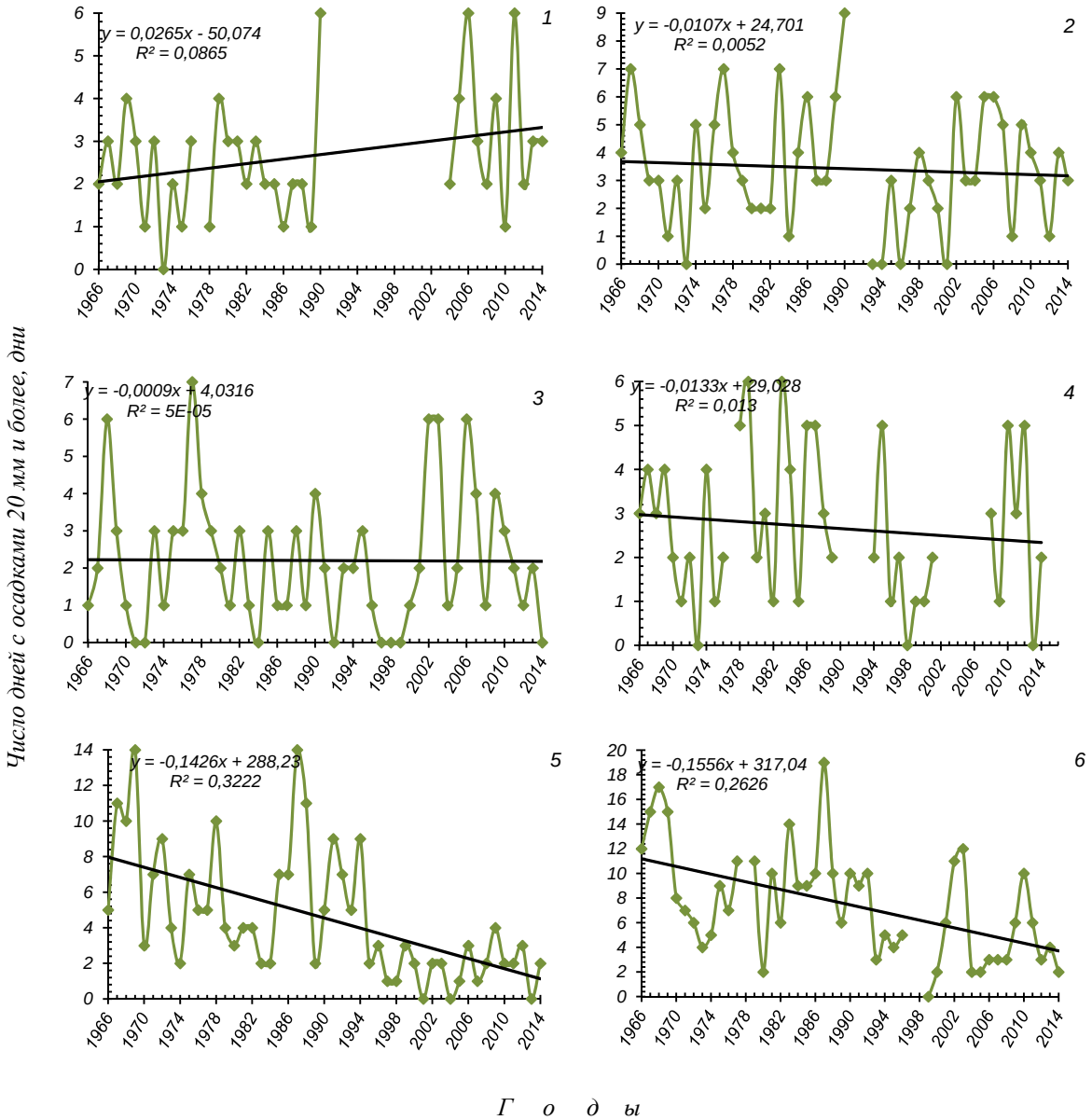


Рис. 3. Динамика изменения годового числа дней с осадками 20 мм и более за период 1966–2014 гг.

1 – Ашоцк; 2 – Амасия; 3 – Гюмри ГМС; 4 – Артик; 5 – Амберд; 6 – Арагац в/г

Таким образом, выяснилось, что на изучаемой территории ход годового числа дней с осадками 20 мм и более совпадает с ходом годового количества осадков: максимальные значения наблюдаются в апреле–июне и октябре, а минимальные – в июле–сентябре и ноябре–марте.

С высотой наблюдается рост годового числа дней с осадками 20 мм и более: вертикальный градиент составляет 0,3 день/100 м.

На изучаемой территории преимущественно наблюдается тенденция как роста, так и понижения годового числа дней с обильными осадками. Поэтому для изучения как пространственного распределения, так и динамики изменения обильных осадков предлагаем микроклиматические исследования, индивидуальный подход для осуществления необходимых мероприятий.

Список литературы

1. Александрян Г.А. Атмосферные осадки в Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1971. 180 с.

2. Варданян Т.Г., Маргарян В.Г. Метеорология и климатология: учеб. пособие для вузов. Ереван: Изд-во «Астхик Гратун», 2014. 532 с.

3. Геворгян А.М. Синоптические условия образования обильных и максимальных осадков в Армении // Труды ГГО. С.-Петербург, 2010. Вып. 562. С. 127–138.

4. Геворгян А.М. Условия образования и прогноз обильных осадков на территории Армении: автореф. дис. … канд. геогр. наук. СПб., 2011. 21 с.

5. Кошкин Д.А. Динамика экстремальных климатических показателей на территории Иркутской области: автореф. дис. … канд. геогр. наук. Иркутск, 2012. 19 с.

6. Нынешнее состояние климатических служб и перспективы развития в Армении. Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Армения. Государственная служба гидрометеорологии и мониторинга. Ереван, 2013. 62 с.

7. Климатологический справочник СССР. Вып. 16. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. II. Атмосферные осадки. Ч. III. Снежный покров. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 339 с.

8. Климатический справочник. Ч. II. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Ереван: «Армгосгидромет», 2012. 172 с.

9. Маргарян В.Г., Варданян Т.Г., Манучарян П.К. Особенности экстремальных индексов атмосферных осадков Ширакской области // Современные проблемы гидрологии, метеорологии и климатологии в Армении: материалы науч. семинара, посвященного Всемирному дню воды и метеорологии, 21–22 марта 2014 г. Ереван: Изд-во «Лусабац», 2014. С. 74–77.

10. Маргарян В.Г., Симонян Л.М. Закономерности пространственно-временного распределения обильных осадков в Республике Армения (на примере Ширакской области) // Природные опасности: связь науки и практики: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Саранск, 23–25 апр. 2015 г. / редкол.: С.М. Вдовин (отв. ред.) [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. С. 252–258.

11. Справочник по климату СССР. Вып. 16. Армянская ССР, данные за отдельные годы. Ч. II. Атмосферные осадки. Тбилиси, 1973. 528 с.

12. Суренян Г.Г., Хоецян А.В. Аэросиноптический анализ образования обильных осадков и возможности прогнозирования в Республике Армения. Ереван: Ученые записки ЕГУ. № 2. 2008. С. 137–144.

13. Суренян Г.Г. Синоптический анализ барических полей, формирующих погодно-климатические условия Республики Армения: дис. … канд. геогр. наук. Ереван, 2010. 145 с.

УДК 528.7, 528.8, 528.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ

Н. А. Моисеева
Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС»
e-mail: moiseewa@scamnex.ru

USING OF REMOTE SENSING DATA FOR MONITORING OF LAND CONDITION AND LAND USE

N. A. Moiseeva
Research and development center «SCANEX»
e-mail: moiseewa@scamnex.ru

В статье описана последовательность работ при выполнении комплексного мониторинга состояния и использования земель на основе данных дистанционного зондирования Земли с применением данных государственного кадастра недвижимости. Мониторинг состояния и использования земель рассматривается в аспекте выявления нарушений земельного законодательства и выявления участков развития негативных процессов.

Ключевые слова: спутниковая съемка, дистанционный мониторинг, государственный кадастр недвижимости.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса сегодня находят применение в решении одной из ключевых проблем земельно-имущественных отношений в Российской Федерации – проблемы мониторинга состояния и использования земель.

Мониторинг состояния и использования земель проводится в двух аспектах:

1. Выявление признаков нарушений земельного законодательства в пределах границ кадастровых участков земель различных категорий.
2. Выявление участков развития негативных процессов на объекте работ.

Данные ДЗЗ сверхвысокого и высокого пространственного разрешения – это основа для формирования оптимальной, наименее затратной и наиболее достоверной методологии для определения кадастровых участков, содержащих признаки нарушения земельного законодательства, и территорий, подверженных развитию негативных процессов.

Реализация работ по мониторингу состояния и использования земель была выполнена для территории о. Русский Владивостокского городского округа. При реализации работ была разработана технико-методологическая схема проведения работ, а также разработаны алгоритмы дешифрирования признаков нарушений земельного законодательства и участков развития негативных процессов. Методика дешифрирования разрабатывалась с учётом возможности её применения для других территорий Российской Федерации.

Основными исходными данными при дешифрировании являлись:

1. Материалы спутниковой съёмки пространственного разрешения 0,5 м/пиксел с космического аппарата Pleiades и 1,5 м/пиксел с космического аппарата SPOT-6.
2. Данные государственного кадастра недвижимости (ГКН) и данные, содержащиеся в Едином государственном реестре прав на недвижимое имущество и сделок с ним (ЕГРП). Эти данные нужны для выявления признаков нарушений земельного законодательства.

Технико-методологическая схема при выполнении работ включает следующие этапы:

1. Подготовка исходных материалов для дешифрирования, включающая фотограмметрическую обработку данных спутниковой съёмки. Итоговым результатом работ на данном этапе является получение бесшовного ортотрансформированного покрытия территории материалами спутниковой съёмки в натуральных цветах и в синтезе с использованием инфракрасного канала.

2. Дешифрирование материалов спутниковой съёмки в аспекте выявления признаков нарушения земельного законодательства и участков развития негативных процессов. На данном этапе итоговым результатом является точечный векторный слой пунктов проведения полевых работ, используемый в устройствах навигации.

3. Проведение полевой верификации, во время которой эксперты выезжают на все отобранные для верификации точки и осуществляют заверку. Итогом этапа являются материалы, подтверждающие наличие признаков нарушений земельного законодательства и выявленных негативных процессов.

4. Контурное дешифрирование по данным спутниковой съёмки. Итогом этапа является создание полигональных контуров территорий с признаками нарушений земельного законодательства и участков развития негативных процессов.

5. Оформление результатов мониторинга в виде статистической отчётности и картографических материалов. Создание Геопортала, содержащего результаты мониторинга, полевой верификации и исходные данные ДЗЗ.

В ходе проведения полевых работ результаты дешифрирования спутниковой съёмки подтвердились при полевой верификации более чем в 90 % случаев при выявлении признаков нарушений земельного законодательства и более чем в 95 % случаев при выявлении участков развития негативных процессов.

По результатам совместного анализа спутниковой съёмки, данных ГКН и ЕГРП были выявлены следующие классы признаков нарушений земельного законодательства: использование земельных участков не по целевому назначению, невыполнение обязанностей по приведению земель в состояние, пригодное для использования по целевому назначению; ненадлежащее использование земельного участка; самовольное занятие земельного участка.

По результатам дешифрирования негативных процессов были выявлены следующие естественные природные процессы, приводящие к снижению качества земель: эрозионные процессы, переувлажнение земель, обвально-осыпные и абразионные процессы на берегах. Кроме того, были выявлены негативные процессы антропогенного происхождения: образование физически деградированных и переуплотнённых земель, захламление земель, разрушение почвенного покрова на склонах, наличие обвалов и осыпей, развитие подтопления и заболачивания. Дополнительно производилось выявление потенциально опасных объектов.

Полученные результаты могут найти применение при формировании единой технико-методологической основы для мониторинга состояния и использования земель на территории различных субъектов Российской Федерации, что позволяет осуществить переход к созданию типового картографо-аналитического продукта, базирующегося на материалах дистанционного зондирования Земли. Результаты работы могут быть использованы контрольно-надзорными органами для мониторинга нарушений землепользования и принятия мер по ликвидации развития негативных процессов.

УДК 528.88

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПАВОДКОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА РЕКЕ ОБЬ ПО СНИМКАМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

И. Н. Муратов, Г. А. Кочергин, М. А. Куприянов, Ю. М. Полищук, В. А. Хамедов
Автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»
e-mail: ildarmur@gmail.com
e-mail: KocherginGA@uriit.ru
e-mail: kupriyanovma@uriit.ru
e-mail: yupolishchuk@gmail.com
e-mail: XamedovVA@uriit.ru

Статья посвящена вопросам практического использования данных дистанционного зондирования Земли в задачах мониторинга паводковой обстановки на крупных реках применительно к участкам реки Обь в среднем течении в пределах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Приведены данные о площади затопления территории в пределах городской черты г. Нижневартовска, полученные на основе анализа космических снимков Landsat-8 и Ресурс-П.

Ключевые слова: результаты космической деятельности, данные дистанционного зондирования Земли, геоинформационные системы, ГИС-технологии, мониторинг водных объектов, космические снимки, паводковая обстановка, зоны затопления.

Введение

На территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) расположено более 250 тысяч озер и болотных комплексов. Речную сеть формируют реки Обь и Иртыш совместно с притоками и множеством мелких речек. В связи с этим задачи спутникового мониторинга состояния водоемов, одной из которых является мониторинг паводковой обстановки, стали одними из наиболее приоритетных для регионального Центра космических услуг (ЦКУ) ХМАО. Центр был создан распоряжением Правительства автономного округа 18 сентября 2013 г. на базе Автономного учреждения «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий» (ЮНИИ ИТ). Одной из главных целей создания ЦКУ явилось предоставление исполнительным органам государственной власти автономного округа комплексных услуг на основе использования результатов космической деятельности, современных геоинформационных и web-портальных технологий, высокоточной и актуализированной пространственной информации.

Основной предпосылкой создания ЦКУ в ХМАО стала необходимость проведения объективного дистанционного мониторинга чрезвычайных ситуаций, характерных для территории автономного округа, и экологического состояния окружающей среды в условиях негативного воздействия природных и антропогенных факторов при интенсивной разработке нефтяных месторождений на территории округа. По результатам анализа паводковой обстановки на территории Ханты-Мансийского округа за 2014–2015 гг. Комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности при Правительстве ХМАО был сформирован Реестр населенных пунктов округа, попадающих в зоны затопления (подтопления) при воздействии различных гидрологических и гидродинамических процессов и явлений, в который вошли 44 населенных пункта, расположенных в основном на реках Обь и Иртыш. Всего по округу в зону затопления (подтопления) попадают 2178 жилых зданий, 7 социально значимых объектов, 55 объектов экономики.

Количество пострадавшего населения оценивается в 5503 человек. В частности, одним из наиболее пострадавших от паводка на Оби в 2015 г. стал г. Нижневартовск, в котором количество пострадавшего населения составило 1864 человека, 1060 жилых зданий попали в зону затопления (подтопления).

В связи с изложенным основной целью настоящего сообщения явилось рассмотрение вопросов мониторинга паводковой обстановки на крупных реках с использованием космических снимков.

На рис. 1 представлен фрагмент космического снимка высокого разрешения «Ресурс-П», на котором изображена территория второго по численности населения в округе города Нижневартовска в период паводка 2015 г. Пунктиром на рис. 1, согласно данным Государственного земельного кадастра РФ, обозначены границы населенного пункта, штриховкой показаны зоны затопления в паводок 2015 г. в границах населенного пункта.

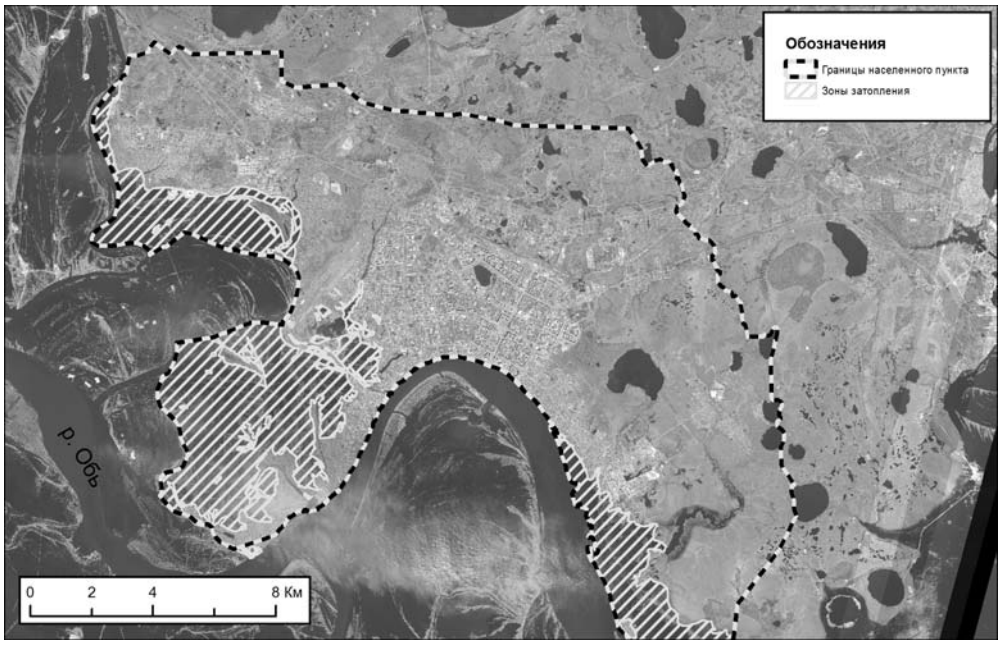


Рис. 1. Фрагмент космического снимка «Ресурс-П» (07.06.2015 г.) с обозначенными зонами затопления в границах населенного пункта

Как видно из рис. 1, затоплению подверглась значительная территория населенного пункта с находящимися на ней объектами инфраструктуры и жилыми домами. Общая площадь затопления, определенная средствами ArcGIS 10.3, равна 5155 га, что составляет около 22 % территории населенного пункта. Для сравнения, на рис. 2 представлен фрагмент космического снимка Landsat-8 на ту же территорию, полученный в меженный период осенью 2015 г. Как видно из рисунка, участки территории города, которые были затоплены в паводок (рис. 1), в межень практически полностью освободились от воды.

При проведении анализа паводковой обстановки на реке на основе спутникового мониторинга привлекаются оперативные данные об уровнях воды в реке. На рис. 3 приведен график изменения уровней воды, измеренных на гидропосте на реке Обь, расположенном вблизи Нижневартовска, за период с конца апреля до конца октября 2015 г. При превышении критического уровня воды в реке затапливаются значительные участки территории населенного пункта, что отчетливо видно на космическом снимке, полученном 7 июня 2015 г. (рис. 1).

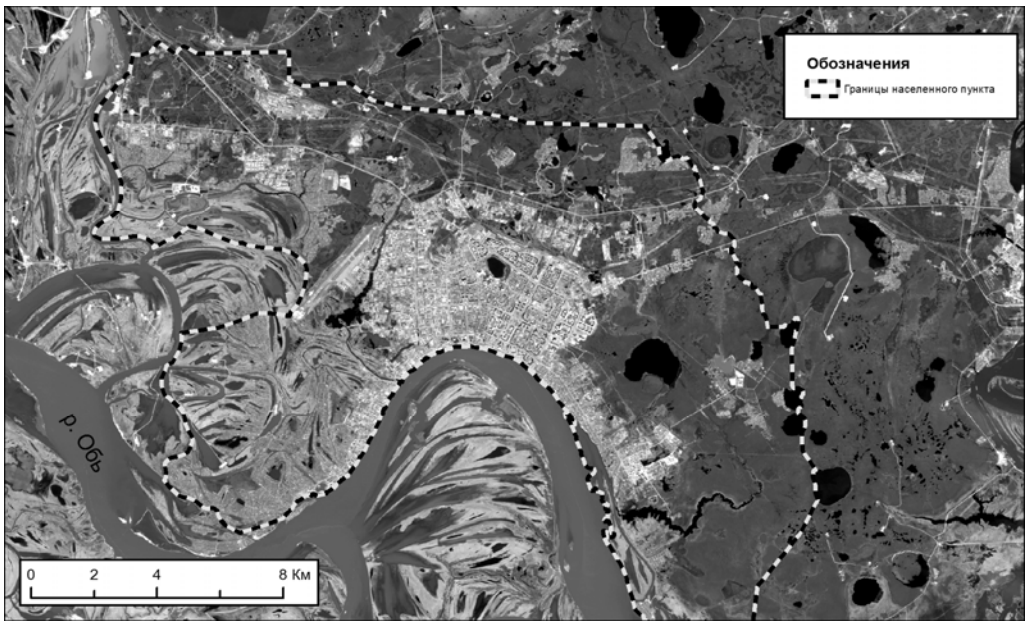


Рис. 2. Фрагмент космического снимка Landsat-8 (27.09.2015 г.)

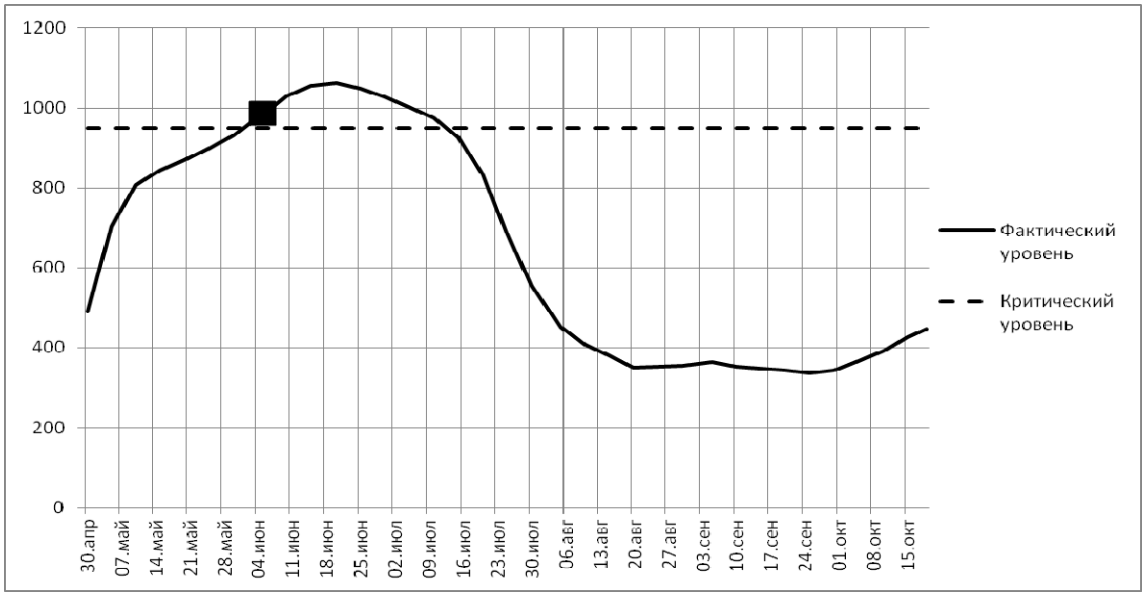


Рис. 3. График изменения уровня воды в реке Обь в районе Нижневартовска (2015 г.)

Результаты спутникового мониторинга паводковой обстановки на реках ХМАО, осуществляемые региональным ЦКУ, используются Главным управлением МЧС России по ХМАО-Югре при реализации плана противопаводковых мероприятий.

УДК 502.1: 502.568: 504.1:528.854:528.88

СОСТОЯНИЕ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ В РАЙОНАХ НЕФТЕДОБЫЧИ: ВЫЯВЛЕНИЕ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ФРАГМЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LANDSAT

К. В. Мячина
ФГБУ «Институт степи УрО РАН»
e-mail: mavicsen@list.ru

THE CONDITION OF STEPPE LANDSCAPES WITHIN OIL FIELDS: IDENTIFICATION OF DISTURBED LANDS AND FRAGMENTATION BASED ON LANDSAT SATELLITE IMAGES

K. V. Mjachina
Institute of Steppe Ural Branch Russian Academy of Sciences
e-mail: mavicsen@list.ru

На основе спектральных преобразований и анализа текстурных характеристик мультиспектральных разносезонных изображений Landsat предложен подход к выявлению нарушенных нефтедобычей степных территорий. Выполнена оценка фрагментации ландшафтов в границах нефтяных месторождений, вызванной развитием инфраструктуры недропользования. Показано, что в процессе нефтедобычи количество нарушенных земель и фрагментация ландшафтов значительно возрастают.

Ключевые слова: степной ландшафт, нефтедобыча, нарушенные территории, идентификация, фрагментация, Landsat, спектральные преобразования, текстурные признаки.

Разработки полезных ископаемых являются наиболее распространенным фактором трансформирующего воздействия на ландшафты степных территорий наряду с сельскохозяйственным производством. В западной части Оренбургской области, расположенной в подзоне типичной степи, ведется интенсивная разработка месторождений нефти, вызывающая прямые и отдаленные изменения экологического состояния территорий [1, 2]. Из прямых быстропроявляющихся последствий особое внимание необходимо заострить на значительном количестве поврежденных территорий, способствующих увеличению ландшафтной раздробленности, являющейся одним из доминирующих факторов снижения биоразнообразия в полузасушливых ландшафтах с низкоярусным растительным покровом. Определение количества поврежденных земель является необходимым инструментом, способствующим выявлению разницы между планируемым недропользователем и фактическим ущербом, а также корректированию модели оптимизации структуры степного землепользования.

Автором выполнялись поиски решения поставленной задачи на основе интерпретации общедоступных снимков спутников Landsat, что призвано повысить практическую ценность метода и максимально способствовать его внедрению в технологии регионального экологического мониторинга.

Анализировались разносезонные снимки Landsat TM, ETM, OLI, прошедшие предварительную обработку, заключающуюся в выполнении радиометрической калибровки и атмосферной коррекции. В качестве ключевых территорий выбраны участки Бобровского (разрабатывается с 1970 г.) и Боголюбовского (разрабатывается с 1994 г.) месторождений нефти. Изучаемые участки характеризуются значительным объемом накопленной техногенной нагрузки и высокой плотностью объектов нефтепромысловой инфраструктуры. Площадки объектов размещены в пределах

различных типов степных ландшафтов (холмисто-увалистые равнины, равнинные участки водоразделов, участки поймы); значительная их часть, как и по всей нефтегазоносной части области, находится в границах земель сельскохозяйственного назначения.

Задача исследования представляла собой поиск решений, позволяющих наиболее точно выделять участки деградированного почвенно-растительного покрова, являющегося отличительной особенностью ландшафтов, находящихся в процессе интенсивного недропользования. Для этих целей был испытан ряд спектральных преобразований, показавших в результате различную эффективность [3]. Основная трудность в нашем случае состояла в том, что исследуемая территория весьма сложна для автоматического дешифрирования, так как степные регионы, как правило, распаханы более чем на 50 %. Оренбургская область не является исключением: здесь более 70 % территории составляют пашни, вносящие значительные неточности в результаты дешифрирования.

На первом этапе исследований использовались снимки вегетационного периода. Испытывались следующие спектральные преобразования: Tasseled Cap, PDI (перпендикулярный индекс засухи), GSI (индекс размера почвенных частиц), NBI (нормализованный индекс гарей), IrOx (индекс, характеризующий содержание оксида железа), а также аналитический инструмент SMACC, доступный в ПО ENVI 5.1 и применяющийся для поиска и отображения конечных целей. Валидация результатов выполнялась с помощью векторного слоя площадок с объектами инфраструктуры месторождений, сформированного на основе GPS-фиксации координат в ходе полевых исследований и дополненного данными ручной оцифровки снимков высокого разрешения, предоставляемых ESRI посредством ArcGIS 10.2. Также выполнена оцифровка границ сельскохозяйственных угодий, слой которых затем наложен на цифровую модель рельефа для наглядного отображения структуры землепользования ключевой территории и визуализации особенностей размещения объектов нефтедобычи в границах агроландшафтов.

Точность полученных результатов анализировалась по двум критериям. Во-первых, учитывалось количество площадок объектов нефтепромыслов с контрольного слоя, охваченных значимым диапазоном спектрального индекса. Во-вторых, экспертным путем анализировалось превышение площади значимого класса индексного изображения за счет включения посторонних объектов. Показано, что наиболее достоверно выделить нарушенные участки на территории нефтепромысла позволяет инструмент SMACC, нацеленный на поиск конечных целей с однородными спектральными характеристиками. Точность охвата искомых объектов составляет 72 %, при этом степень «расползания» значительно ниже, чем при использовании других видов спектральных преобразований. Для снимков такого пространственного разрешения (30 м) результат можно считать удовлетворительным для поставленной задачи.

Однако для снимков периода вегетации отсутствует возможность анализа фрагментации, вызванной нарушенными недропользованием землями, по причине наличия значительного количества с/х угодий, вносящих путаницу в результаты. Было замечено, что на космических снимках, выполненных в зимний период и характеризующихся наличием устойчивого снежного покрова, визуально выделяются участки, находящиеся в активной эксплуатации в процессе нефтедобычи. Они частично очищаются от снега, вытаптываются и загрязняются, что способствует приобретению ими отличных от окружающего заснеженного ландшафта спектральных характеристик. Было принято решение использовать подобные снимки для выявления и анализа динамики нарушенных нефтедобычей земель. Для исключения осложнений в виде смешивания спектральных характеристик снежного и облачного покровов из всего

доступного архива снимков, предоставленных к бесплатному доступу Геологической службой США (USGS) и включающих ключевые участки, подбирались изображения с облачным покровом не более 3 %. Дополнительно для выбранного участка исследования изучались архивы метеоданных на предмет выпадения осадков в период, предшествующий дате снимка. Если осадки наблюдались за несколько дней или в день съемки, снимок считался непригодным для изучения, так как значительно снижалась разница в спектральных параметрах выявляемых объектов и окружающей территории. В связи со значительной разницей в значениях альбедо снежного покрова и открытой почвы ожидалось, что разделение объектов по спектральным признакам не представит значительных трудностей. Однако в отдельных каналах изображения выявлено смешивание пикселей объектов инфраструктуры с загрязненным снегом, образовавшимся в результате оседания сажи при горении факелов сжигания попутного газа. Подобное смешивание объясняется тем, что альбедо загрязненного снега может снижаться до 20 % [4], в этом случае бывает трудно отделить на снимке снег от других объектов поверхности.

Следующим шагом выполнялся поиск спектральных преобразований, позволяющих наиболее точно выделять эксплуатируемые в процессе нефтедобычи участки ландшафта. Анализировались результаты неконтролируемой классификации K-Means с целью выявления оптимальной спектральной разделимости объектов, а также результаты классификаций на основе применения индексов, способствующих распознаванию открытых участков земной поверхности, таких как Topsoil Grain Size Index (TGSI) и Soil Brightness (SB). Также испытывались индекс Normalized Differencial Snow Index (NDSnI), помогающий дешифрировать снежный покров, и спектральное преобразование Tasseled Cap (TC), с расчетом компонента Brightness. Ни один из вышеперечисленных методов либо не показал достаточно высокой эффективности выделения нарушенных земель, либо в результатах наблюдалось значительное расширение площади значимого класса за счет включения территорий с загрязненным снежным покровом [5]. В связи с этим было решено использовать преобразование, основанное на интерпретации такого дешифровочного признака, как текстуры объектов и образований. Использовался статистический подход Co-Occurrence Measures, представляющий анализ матрицы совместной встречаемости уровней серого тона пикселей. Выяснилось, что для выделения классов «нарушенные земли» и «окружающий ландшафт» наиболее целесообразно использовать текстурную характеристику «Дисперсия», рассчитываемую для синего канала изображения, показавшую достаточно высокий результат распознавания объектов класса «нарушенные земли» (74,6 %). Результаты анализа отображены в таблице.

При определении значимых границ класса нарушенных земель на зимнем снимке в искомый класс попадают как объекты инфраструктуры (площадки размещения объектов и линейные объекты дорожно-транспортной сети), так и образования, вызывающие искажения определяемого класса: населенные пункты, пойменные и овражно-балочные колки, а также лесозащитные полосы, обрамляющие сельскохозяйственные угодья. Для исключения расширения площади определяемого класса за счет территорий населенных пунктов использована маска их территории. Однако автоматизированно создать маску пойменных и овражно-балочных участков не представляется возможным, так как на зимних снимках указанные участки смешиваются с нарушенным землями, а на бесснежных изображениях наблюдается смешение пойменной и овражно-балочной растительности с сельскохозяйственными всходами. Принято решение о включении пойменных, овражно-балочных территорий и лесозащитных полос в класс «нарушенные земли». Основанием послужило то, что пойменные колки, овражно-балочная сеть и лесозащитные полосы существуют на всех изображениях временного ряда без кардинальных изменений, соответственно, взаимно

нивелируются при подсчете изменений площади нарушенных земель, в связи с чем не ожидается большой погрешности при оценке динамики нарушенных земель по временному ряду изображений. Более того, развитию овражно-балочной сети и, соответственно, увеличению площади класса нарушенных земель могут способствовать воздействия, оказываемые на ландшафты в процессе внедрения объектов нефтедобывающей инфраструктуры.

С использованием программы Fragstat 4.2 на основе классифицированных изображений временного ряда для участка Бобровского нефтяного месторождения были вычислены основные параметры фрагментации для 1988 и 2009 гг., характеризующие базовую структуру ландшафтов месторождения (см. таблицу). Как видно, фрагментированность ландшафтов, вызванная именно нефтедобычей, по ситуации на 2009 г. значительно увеличилась, существенно сократились как площадь, так и количество фрагментов не нарушенных нефтедобычей земель.

Таблица

Динамика структуры ландшафтов на исследуемом участке Бобровского нефтяного месторождения

Год	Класс объектов в структуре ландшафтов	Площадь		Фрагменты		
		Общая площадь, кв. км	Доля от общей площади, %	Число	Плотность	Сред. площадь
1988	Вся территория	15 694,38	100	720	4,58	21,81
	Нарушенные земли	18 47,16	11,77	495	3,15	3,73
	Окружающий ландшафт	13 847,22	88,23	225	1,43	61,54
2009	Вся территория	15 694,38	100	1029	6,56	15,25
	Нарушенные земли	2297,70	14,64	774	4,93	2,97
	Окружающий ландшафт	13 396,68	85,36	255	1,62	52,54

Список литературы

1. Baynard Chris, Mjachina Ksenya, Richardson Robert, Chibilyev Alexander. Assessing landscape disturbance and the ecological situation of energy development in the U.S. and Russia // International Environmental Technology. 2016. Volume 26, Issue 1. P. 44–46.

2. Mjachina Ksenya V., Baynard Chris W., Chibilyev Alexandr A. Oil and gas development in the Orenburg region of the Volga–Ural steppe zone: qualifying and quantifying disturbance regimes // International Journal of Sustainable Development and World Ecology. 2013. Volume 21, Issue 2. P. 111–126.

3. Мячина К.В., Чибилев А.А. Выявление земель, нарушенных нефтедобычей, по результатам спектральных преобразований спутниковых изображений (на примере Оренбургского Заволжья) // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 135–141.

4. Москвич Т.И. Способ обработки данных дистанционного зондирования спутников серии NOAA. Методика определения заснеженности речных бассейнов по спутниковым данным // Труды ГУ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. 2009. № 153. С. 55–57.

5. Мячина К.В. Исследование динамики ландшафтной структуры нефтедобывающих территорий степной зоны Предуралья с применением ГИС-технологий на основе спутниковых данных // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 2–13.

УДК 528.88, 528.854, 504.4, 004.932.2, 004.93'14

СЕГМЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И ПАВОДКОВ)

И. А. Пестунов[(1)], С. А. Рылов[(1)], О. А. Дубровская[(1)], Ю. Н. Синявский[(1)],
О. Г. Новикова[(2)], Д. Ю. Завьялова[(2)]
[(1)]Институт вычислительных технологий СО РАН
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru
e-mail: RylovS@mail.ru
e-mail: olga@ict.nsc.ru
e-mail: yorikmail@gmail.com
[(2)]СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета»
e-mail: novg-oksana@yandex.ru
e-mail: 28diana06@mail.ru

SATELLITE IMAGES SEGMENTATION FOR EMERGENCIES MONITORING (E.G. FOREST FIRES AND FLOOD SITUATION)

I. A. Pestunov[(1)], S. A. Rylov[(1)], O. A. Dubrovskaya[(1)], Yu. N. Sinyavskiy[(1)],
O. G. Novikova[(2)], D. Yu. Zavjalova[(2)]
[(1)]Institute of Computational Technologies SB RAS
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru
e-mail: RylovS@mail.ru
e-mail: olga@ict.nsc.ru
e-mail: yorikmail@gmail.com
[(2)]State Research Center «Planeta» – Novosibirsk
e-mail: novg-oksana@yandex.ru
e-mail: 28diana06@mail.ru

Рассматривается возможность применения алгоритмов сегментации для создания автоматизированных технологий анализа последствий ЧС по данным с российских и зарубежных спутников (на примере лесных пожаров и паводковой обстановки). Приведено сравнение результатов сегментации с результатами визуально-инструментального дешифрирования.

Ключевые слова: сегментация спутниковых изображений, мониторинг последствий ЧС, лесные пожары, паводковая обстановка.

Введение

На территории России наибольший ущерб наносят лесные пожары и паводки. Ежегодно в России регистрируется от 10 до 35 тысяч лесных пожаров, охватывающих площади от 500 до 2500 тыс. га. По данным Федеральной службы государственной статистики, всего с 1992 по 2014 г. в России произошло 589 768 лесных пожаров, а размер ущерба составил около 20 млрд руб. в год (из них от 3 до 7 млрд – ущерб лесному хозяйству за счёт потерь древесины) [1]. Паводковая обстановка также является одной из наиболее острых проблем и требует постоянного контроля. В период весеннего половодья и дождевых паводков уровень воды в бассейнах рек часто превышает расчетный уровень критических отметок подъема воды, что приводит к подтоплению не только пойменных и садовых участков, но и населенных пунктов. За 2015 г. только на территории Сибирского федерального округа обильный приток воды из рек, впадающих в Новосибирское водохранилище и выше него по течению, привёл к затоплению 6200 дачных участков в пойме реки Обь.

Оперативное обнаружение и оценка последствий ЧС позволяет принимать своевременные меры по их ликвидации, а также значительно уменьшить экологический и экономический ущерб и разработать план восстановительных работ. Данные дистанционного зондирования – важнейшая составляющая информационной поддержки для своевременного принятия решений при обнаружении чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и антропогенного характера, а также прогнозировании их возможных последствий. Особое значение эти данные приобретают при мониторинге обширных малонаселенных территорий, поскольку они зачастую являются единственным источником объективной и актуальной информации. Используемые в настоящее время «ручные» (визуально-инструментальные) методы анализа спутниковых данных требуют значительных трудозатрат.

В настоящей работе рассматривается возможность применения современных алгоритмов сегментации для оперативного мониторинга лесных пожаров и паводковой ситуации по данным с российских и зарубежных спутников.

Анализ последствий лесных пожаров

Наличие территорий со слаборазвитой инфраструктурой исключает возможность корректного и оперативного учета лесных пожаров и их последствий без использования данных дистанционного зондирования, которые позволяют решить целый ряд практических задач, в том числе [2]: регистрация крупных лесных пожаров и оценка пройденных ими площадей; оценка структуры пройденных огнем площадей и степени повреждения им лесной растительности; оценка последствий лесных пожаров и хода лесовосстановительного процесса на гарях.

В настоящей работе исследуются последствия лесного пожара, произошедшего в июле 2014 г. на территории Республики Саха (Якутия). Природные особенности региона – сочетание многолетней мерзлоты с недостатком атмосферного увлажнения и засушливым климатом [3].

Для анализа использовались снимки со спутника Landsat-8 (рис. 1), полученные 3 июля 2014 г. (до пожара), 14 сентября 2014 г. (через месяц после пожара) и 30 августа 2015 г. (через год после пожара). Исследуемый полигон (на рис. 1 выделен белым) ограничен прямоугольником: 63º31’55” – 64º20’53” с.ш.; 117º5’12” – 118º35’30” в.д.

Состояние растительного покрова обычно оценивается по значению нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI с использованием 4-го и 5-го каналов. Значения NDVI различны для разных типов растительности: для неповрежденной растительности на исследуемом полигоне оно попадает в интервал $[0,35;0,45]$, а для поврежденной – в интервал $[0;0,3]$, поэтому меньшее значение вегетационного индекса показывает степень поврежденности исследуемого участка [4]. Таким образом, его можно использовать для качественного анализа гарей и изучения восстановительного процесса внутри поврежденной территории. По значениям NDVI можно выделить четыре класса поражения растительности [5]: 1-й ($\mathrm{NDVI} \in [0,2;0,3]$); 2-й ($\mathrm{NDVI} \in [0,1;0,2]$); 3-й ($\mathrm{NDVI} \in [0;0,1]$) и 4-й ($\mathrm{NDVI} \in [-1;0]$).

Для обработки снимков использовались непараметричесие алгоритмы кластеризации HECA [6] и EMeanSC [7] (рис. 2). На основе анализа средних значений NDVI были определены кластеры, соответствующие повреждённой растительности ($\mathrm{NDVI} = -0,004$ – 4-й класс поражения и $\mathrm{NDVI} = 0,034$ – 3-й класс поражения), выделенные на рисунке красным и жёлтым цветом соответственно.

Анализ результатов сегментации показал, что площадь, занятая растительностью с сильной степенью повреждения, за год уменьшилась с 545,7 до 52,4 кв. км. Кроме того, среднее значение NDVI для повреждённой огнём растительности за год

увеличилось с $-0,004$ до 0,127 (что соответствует 2-му классу поражения). Согласно [8], это свидетельствует о начале восстановительного процесса.

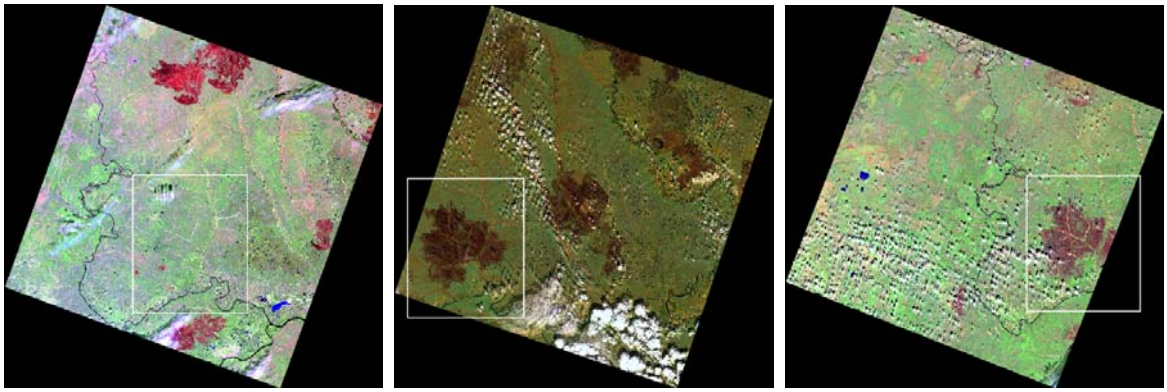


Рис. 1. RGB-композиты изображений Landsat-8 (каналы 6, 5, 3) до пожара (3 июля 2014 г., слева), через месяц (14 сентября 2014 г., в центре) и через год после пожара (30 августа 2015 г., справа). Белым прямоугольником выделен исследуемый полигон

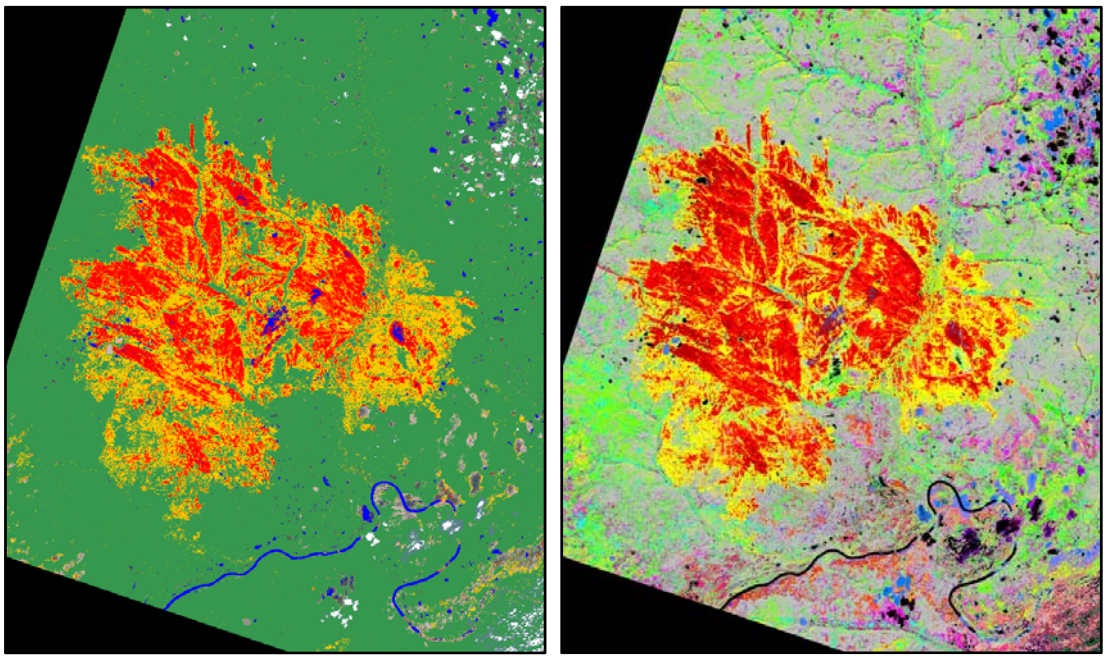


Рис. 2. Результаты сегментации изображения 2014 г. алгоритмами HECA (слева) и EMeanSC (справа). Красным и жёлтым цветом выделены территории с растительностью, повреждённой огнем

Результаты сегментации хорошо согласуются с результатами визуально-инструментального дешифрирования, выполненного сотрудниками Сибирского центра ФГБУ «НИЦ «Планета» (рис. 3).

Мониторинг паводковой обстановки

Карты паводковой обстановки являются одним из основных источников информации для региональных служб МЧС при принятии решений. Они содержат информацию о границах выхода воды на пойму. Однако определение границ и площадей подтоплений по ДДЗ «ручными» методами требует значительных трудозатрат. На основе алгоритма сегментации HECA была разработана

автоматизированная технология, позволяющая в оперативном режиме строить такие карты по данным с российских спутников «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Метеор-М» [9]. Технология применяется в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета» при создании карт паводковой ситуации для потребителей Росгидромета и региональных служб МЧС. Пример карты, построенной по данным со спутника «Канопус-В», приведен на рис. 4.

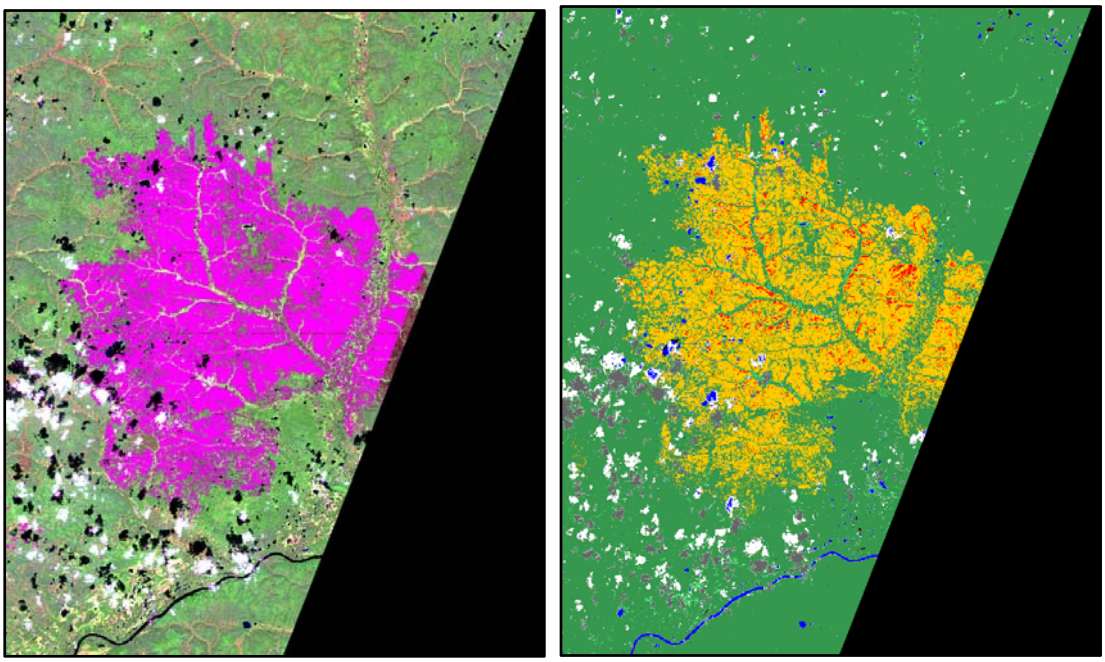


Рис. 3. Сравнение результатов визуально-инструментального дешифрирования изображения 2015 г. (слева) с результатами сегментации алгоритмом HECA (справа)

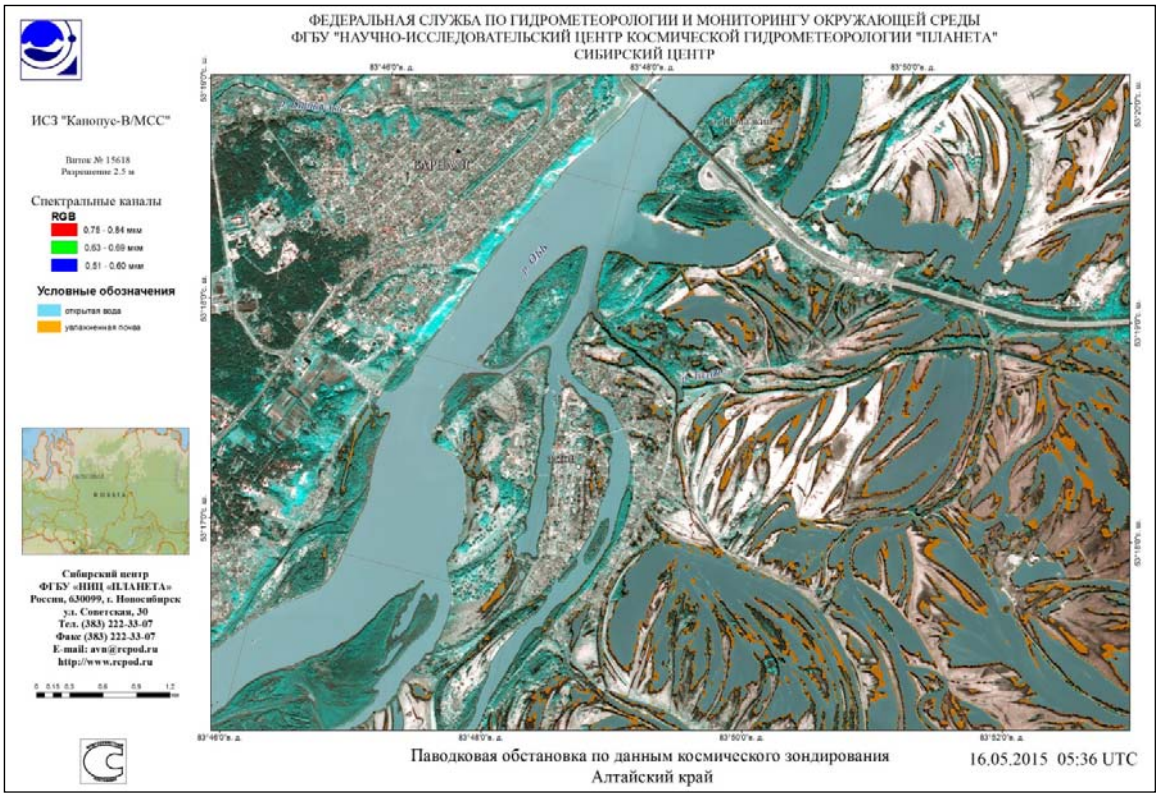


Рис. 4. Пример карты паводковой обстановки

Заключение

В настоящей работе продемонстрирована возможность применения современных алгоритмов сегментации для оперативного мониторинга лесных пожаров и паводковой ситуации по данным с российских и зарубежных спутников. Использование этих алгоритмов позволяет значительно ускорить процесс обнаружения и оценки последствий ЧС за счёт автоматизации наиболее трудоёмких этапов обработки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Президиума РАН (грант № 0316-2015-0006).

Список литературы

1. Корнеев В. Лесные пожары в России. Досье [Электронный ресурс] // Информационное агентство России. URL: 15.04.2015. http://tass.ru/info/1121375.

2. Панова О.В., Ершов Д.В. Использование данных спектрорадиометра MODIS для регистрации и учета лесных гарей // Сб. науч. статей Второй всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Полиграф Сервис, 2005. С. 388–392.

3. Габышева Л.П. Особенности послепожарного восстановления лиственницы в межаласных лесах Центральной Якутии // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2014. № 3 (174), т. 26. С. 48–52.

4. Юрикова Е.А., Сухинин А.И. Сравнительный анализ нарушения пожарами лесов Приангарья по данным спутников TERRA, DMCII // Вест. СибГАУ. 2007. Вып. 2. С. 4–8.

5. Юрикова Е.А., Кокутенко А.А., Сухинин А.И. Исследование возможностей применения данных SPOT-4 для дешифрирования изображений поврежденных пожарами участков растительности // Вест. СибГАУ. 2008. Вып. 4. С. 75–78.

6. Пестунов И.А., Рылов С.А., Бериков В.Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия. 2015. Т. 51, № 4. С. 12–22.

7. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации // Вест. СибГАУ. 2010. Вып. 5 (31). С. 56–64.

8. Петров В.В. Жизнь леса и человек. М.: Наука, 1985. 132 с.

9. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Песурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С.А. Рылов, О.Г. Новгородцева, И.А. Пестунов, О.А. Дубровская, Ю.Н. Синявский // Матер. II Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. С. 207–212.

УДК 517.977.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА КОНЕЧНОМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ

А. Н. Рогалев
ИВМ СО РАН
e-mail: rogalyov@icm.krasn.ru

RESEARCH OF PRACTICAL STABILITY FOR TECHNICAL SYSTEMS ON THE FINITE TIME INERVAL

A. N. Rogalev
ICM SB RAS
e-mail: rogalyov@icm.krasn.ru

Практическая устойчивость на конечном интервале времени означает равномерную ограниченность решений относительно множества начальных значений и совокупности возмущающих воздействий. В статье рассмотрены новые результаты вычисления гарантированных границ множеств решений и их применения для исследования практической устойчивости. Эти границы решений вычисляются при помощи методов, основанных на аппроксимации оператора сдвига вдоль траектории, и учитывают влияние на решения постоянно действующих возмущений.

Ключевые слова: практическая устойчивость, устойчивость на конечном интервале времени, метод сдвига вдоль траектории.

1. Введение

Постановки задач об устойчивости на конечном промежутке времени [1–3] сделаны Н.Г. Четаевым, Н.Д. Моисеевым, Г.В. Каменковым и дали начало развитию теории практической или технической устойчивости на конечном интервале времени. Практическая (техническая) устойчивость на конечном интервале времени означает равномерную ограниченность решений относительно множества начальных значений и совокупности возмущающих воздействий. Существует большой класс систем автоматического управления, для которых вопрос о поведении при $t > T$ не имеет смысла. К таким системам относятся главным образом нестационарные системы или системы (с переменными параметрами) с переменными коэффициентами уравнений. Или вопрос об устойчивости на конечном интервале времени возникает для систем, не имеющих установившегося режима – режима, теоретически реализуемого при $t \to \infty$.

Примером таких систем может служить ракета и ее система управления. В качестве второго примера можно указать на самолет, автоматически выходящий на аэродром посадки по радио-угломерной системе.

В статье предлагается вычислять границы решений методами, основанными на аппроксимации оператора сдвига вдоль траектории [4–7] и учитывающими влияние на решения постоянно действующих возмущений. Обеспечивается возможность формулировать математически строгие результаты, касающиеся практической устойчивости, для достаточно широких классов задач.

2. Гарантированный метод оценки множеств решений

Пусть имеется система

$$\begin{aligned} &\frac{dy}{dt} = f(t, y, v), \\ &y(t_0) = y_0 \in Y_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Требуется проверить выполнение условий $y(t) \in N$ для любого движения y(.), исходящего из точек области допустимых начальных позиций G_0 при переборе всех возмущений, удовлетворяющих ограничению

$$v(t) \in V. \qquad (2)$$

Правые части f системы (1) удовлетворяют условиям существования, единственности решений, продолжаются на всю вещественную ось и непрерывно зависят от начальных данных всех решений $y(t)$ задачи Коши (1).

Методы, строящие гарантированные границы множеств решений систем дифференциальных уравнений [1]–[6], основаны на символьном представлении формул, аппроксимирующих оператор сдвига вдоль траектории. Кратко опишем основные действия, при исполнении которых строятся гарантированные включения следующей задачи (1).

1. Реализуется запись символьных формул *S*-решений как векторных функций с символьными компонентами $S(t^k, Y^0)$, зависящими от символьных начальных данных $Y_1^0, Y_2^0, \ldots, Y_n^0$. Каждая компонента символьного вектора $S_i(t^k, Y^0), i = 1, \ldots, n$ определяется заново в каждой точке t^k как функция, зависящая от символьных стартовых значений $Y_1^0, \cdots, Y_n^0$. Построенная символьная формула является основой, по которой вычисляется область значений функций $Y_S(t, Y^0)$ по всем $y^0 \in Y^0$.

2. Последовательно исполняется метод хранения и переработки символьной информации. при продвижении вдоль траектории решений производится на основе статичного хранения этой информации, работы с адресацией памяти с помощью функций поточной обработки.

3. Символьная формула приближенного решения преобразуется к виду, который позволяет эффективно и быстро вычислять оценки областей значений приближенных решений (*S*-решения), соответствующие изменениям параметров задачи (1). Для этого используется кусочно-полиномиальное представление символьных формул и опорные функции для многозначных функций, описывающих области значений.

4. К границам *S*-решений добавляется оценка глобальной ошибки.

Символьный метод (аналитический метод) – запись численного метода как метода преобразования символьной информации (символьных формул) на языке математического анализа. В дальнейшем при записи символьных формул, аппроксимирующих оператор сдвига вдоль траектории, допускается включение в них числовых констант, с отложенным выполнением арифметических действий над ними.

Процесс вычислений (преобразований и вычислений) символьных формул осуществляется без явного выписывания суперпозиций компонент формулы, определяемых на каждом шаге. Связь между этими компонентами определяется посредством задания механизма адресации. Ссылки на адреса различных уровней хранятся в стековой памяти в виде дерева. Генерация кода вычислений по символьной формуле осуществляется в процессе обхода этого дерева, начиная с вершин.

Границы областей точных решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений строились для систем, у которых параметры исходной задачи были заданы неравенствами, как интервалы. Числовые значения параметров этих задач приведены в надписях к графикам множеств решений и границ этих множеств.

3. Примеры использования

Обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка Ван-дер-Поля, записанное в виде системы двух уравнений

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2,$$
$$\frac{dy_2}{dt} = y_1 - \mu(1 - y_1^2)y_2, \qquad (3)$$

где $\mu = 2$ параметр. Хорошо известно, что начало координат асимптотически устойчиво при $\mu > 0$ и область притяжения ограничена неустойчивым предельным циклом. На рис. 1 изображена проекция на оси t, y_2 гарантированной оценки множества решений возмущенного уравнения Ван-дер-Поля. Показаны верхняя и нижняя границы. График имеет вид области в полярной системе координат, где ось времени совпадает с угловой осью.

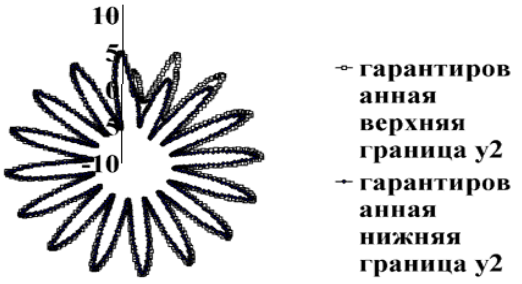


Рис. 1. Проекция на оси t, y_2 гарантированной оценки множества решений возмущенного уравнения Ван-дер-Поля

На рис. 2 представлена проекция на плоскость y_1, y_2 гарантированной оценки множества решений возмущенного уравнения Ван-дер-Поля. Показаны верхняя и нижняя границы. График имеет вид области в декартовой системе координат.

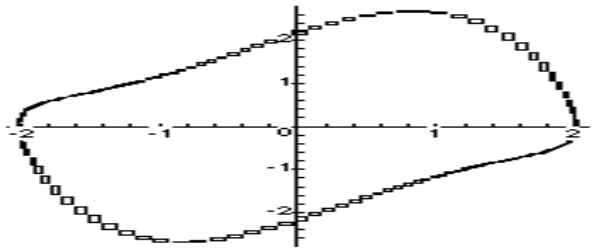


Рис. 2. Проекция на плоскость y_1, y_2 гарантированной оценки множества решений возмущенного уравнения Ван-дер-Поля

Система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_1}{dt} = -2y_1 + 4y_2y_3 + 4y_4y_5,$$
$$\frac{dy_2}{dt} = -9y_2 + 3y_1y_3,$$
$$\frac{dy_3}{dt} = -5y_3 - 7y_1y_2 + 25, \qquad (4)$$
$$\frac{dy_4}{dt} = -5y_4 - y_1y_4,$$
$$\frac{dy_5}{dt} = -y_5 - 3y_1y_4$$

получена при разложении системы уравнений Навье-Стокса в ряд по ортогональной системе базисных функций и удержании 5 членов этого разложения.

На рис. 3 изображена проекция гарантированных границ решений системы ОДУ (4) на плоскость y_1, y_2.

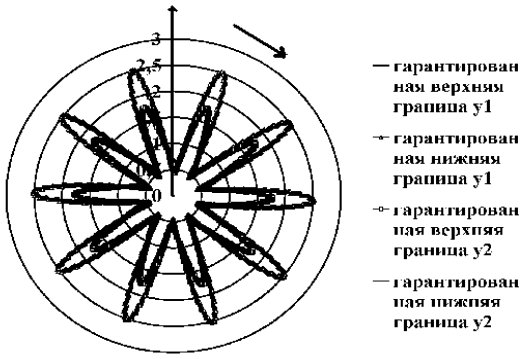


Рис. 3. Проекция гарантированных границ решений системы ОДУ (4) на плоскость y_1, y_2

4. Выводы

Результаты применения гарантированных методов вычисления границ областей устойчивости систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику многомашинных электроэнергетических систем и систем управления движением, показали эффективность этих методов.

Список литературы

1. Моисеев Н.Д. О некоторых методах теории технической устойчивости // Труды Военно-воздушной Академии им. Жуковского. 1945. Вып. 135. С. 3–17.

2. Каменков Г. В. Об устойчивости движения на конечном интервале времени. ПММ. Т. XVII, вып. 5. 1953. С. 529–540.

3. Абгарян К.А. Введение в теорию устойчивости движения на конечном интервале времени. М.: Наука, 1991.

4. Рогалев А.Н. Исследование практической устойчивости при постоянно действующих возмущениях // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7, ч. 5. С. 148–150.

5. Рогалев А.Н. Гарантированные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе преобразования символьных формул // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 5. С. 102–116.

6. Рогалев А.Н. Гарантированные оценки и построение множеств достижимости для нелинейных управляемых систем // Вестник СибГАУ. 2010. 5(31). С. 148–154.

7. Rogalev A.N. Calculation of Guaranteed Boundaries of Reachable Sets of Controlled Systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Allerton Press. 2011. V. 47, № 3. P. 287–296.

УДК 528.88::556

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗАСНЕЖЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

В. Ю. Ромасько
СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета»
e-mail: rom@g-service.ru

Для обеспечения данными гидролого-математических моделей прогноза стока рек создана автоматическая геоинформационная система мониторинга заснеженности речных бассейнов по данным КА Terra, в которой предпринята попытка достичь максимально возможного разрешения данных по времени.

Ключевые слова: снежный покров, TERRA, классификация изображений, речной бассейн.

Оценка площадей снегового покрытия является одним из важных направлений в гидрометеорологии, в котором использование данных дистанционного зондирования с космических аппаратов имеет неоспоримые преимущества перед другими источниками информации. Регулярное картографирование снежного покрова ведётся NOAA с 1966 г. [1]. В рамках программы EOS с 1998 г. выпускаются ежедневные и 8-дневные карты снежного и ледового покровов и температуры льда морей в NSIDC (National Snow and Ice Data Center) в Университете Колорадо [2]. В результате совершенствования автоматизированной системы оперативной оценки площади снегового покрытия речных бассейнов, разработанной в Красноярском НИЦ и Институте леса СО РАН в 1995–2003 гг. [3], создана новая, полностью автоматическая «Система мониторинга заснеженности», которая обеспечивает полный цикл обработки данных радиометра MODIS со спутников TERRA в оперативном режиме без участия оператора, а также реализует доступ к результатам обработки из сети интернет. Система рассчитана на функционирование в автоматическом режиме в пунктах приема данных КА TERRA и использование для бассейнов больших и средних рек (более 5 000–10 000 км^2). Конечным результатом работы программы является распределение снегового покрытия в относительном выражении по высотным зонам в пределах речного бассейна, а также средней высоты кромки снега. Эти результаты используются для коррекции параметров гидролого-математических моделей для прогнозов уровней и расходов воды в реках [4]. Кроме того, данные сопровождаются обзорными снимками и картосхемами снежного покрова территории бассейнов. Система развёрнута и функционирует в Сибирском центре «НИЦ «Планета».

Выделение снежного покрова ведётся с использованием алгоритма классификации, разработанного в NASA для глобального картографирования снежного покрова по данным с радиометра MODIS [5]. Данный алгоритм, основанный на дифференциальном нормализованном снежном индексе (NDSI), использует специфическое свойство снега к поглощению излучения в диапазоне 1,6 мкм. Для классификации снега на лесистых территориях дополнительно рассчитывается значение дифференциального нормализованного растительного индекса (NDVI), который дает возможность идентифицировать наличие лесного покрова [6]. В этом случае значения порогов по NDSI понижаются для возможности классификации снега при пониженном контрасте NDSI из-за экранирующего эффекта крон деревьев. Такая модификация алгоритма позволяет обнаруживать от 50 до 98 % снега на лесистых территориях, в зависимости от типа и состава леса [7].

Наилучшая точность определения относительной заснеженности достигается на безоблачных снимках, что очевидно. Однако таких снимков за сезон снеготаяния попадается не много, и тем меньше, чем больше бассейн. Иногда для бассейна за всю

весну с трудом можно выбрать один снимок. В существующих системах [2] для исключения влияния облачности используется миноритарная композиция данных за 8 суток в отношении снега – хотя бы один случай встречи снега за период даёт в результате снег. Однако для применения в гидрологических прогнозах, с одной стороны, шаг в 8 суток очень грубый, и, с другой стороны, важно именно изменение площади заснеженности. Поэтому для данной системы был разработан алгоритм мониторинга динамики заснеженности на основе метода обнаружения разладки, известного как метод кумулятивных сумм [8].

Разладкой случайного процесса называется существенное изменение его параметров. В данном случае случайный процесс – это классификация снежного покрова при наличии помех в виде облачности, а существенное изменение параметров – это смена результата классификации со «снег» на «не снег» или обратно. Метод кумулятивных сумм применительно к оценке заснеженности заключается в последовательном подсчёте фактов встречи классов до достижения некоторого порога. Факт встречи одного класса увеличивает счётчик одного класса и одновременно сбрасывает счётчик другого. Факты встречи облачности никак не учитываются и счёта не меняют. В момент достижения порога делается заключение о том, что в момент начала накопления суммы этого класса процесс уже имел тот класс, сумма которого и превысила порог. То есть решение принимается «задним числом».

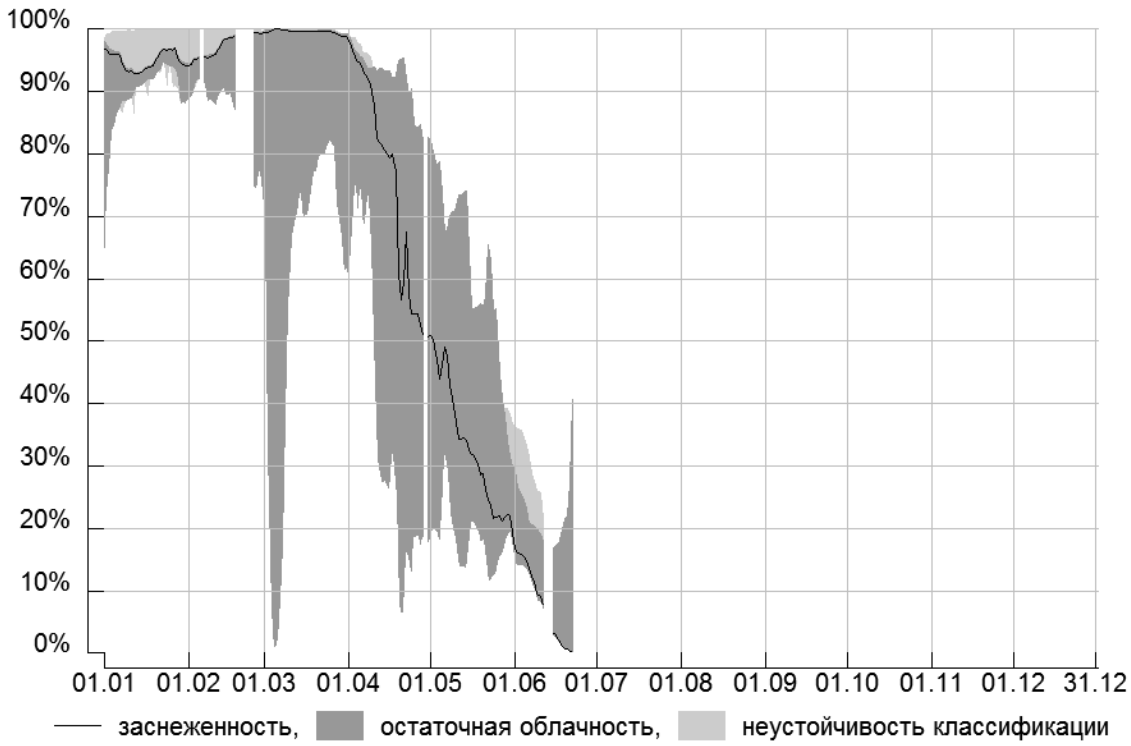


Рис. 1. Относительная заснеженность бассейна водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в 2016 г.

В описываемой системе подсчёт сумм идёт в скользящем окне длиной в 16 суток до текущей даты плюс 3 суток, а пороговое значение равно 3 случаям встречи одного класса. Каждый раз при обработке новых данных результаты прошлых дней (до 16 суток назад) пересчитываются с учётом новых данных и, возможно, получают новые значения в соответствии с решением по методу кумулятивных сумм. Помимо кумулятивных сумм также за 16 суток накапливаются миноритарные композиты обоих

классов, а также последнее значащее безоблачное значение. Результаты классификации снежного покрова и облачности хранятся в растровом виде в равноплощадной конической проекции Альберса на каждый бассейн отдельно. В системе используются специально подготовленные покрытия бассейнов рек. Каждый бассейн имеет свои собственные наиболее оптимальные параметры проекции. При их создании используются данные из различных источников:

– растровая цифровая модель рельефа ASTER GDEM2 [9];
– растровая гидрологическая модель водосборов HYDRO1K [10];
– гидрография векторной топографической карты масштаба 1:100 000.

На текущий момент в системе мониторинга заснеженности имеется 18 модельных бассейнов рек и водохранилищ, входящих в бассейны рек Енисея, Оби, Лены, Амура и Волги. В качестве примера на рис. 1 приведён график относительной заснеженности бассейна водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в 2016 г. На графике линией показана оценка заснеженности по методу обнаружения разладки, светлая область даёт предельные значения, а тёмная область даёт разброс из-за остаточной облачности. Остаточная облачность остаётся в тех пикселях, для которых за 16 суток в методе обнаружения разладки не набралось трёх последовательных одинаковых результатов классификации снежного покрова. Следует отметить, что из-за изменения условий освещённости территории в течение года, максимум регистрируемой заснеженности почти всегда смещён ближе к весне, что, впрочем, не мешает основной цели – использованию данных об относительной заснеженности для уточнения гидрологических прогнозов.

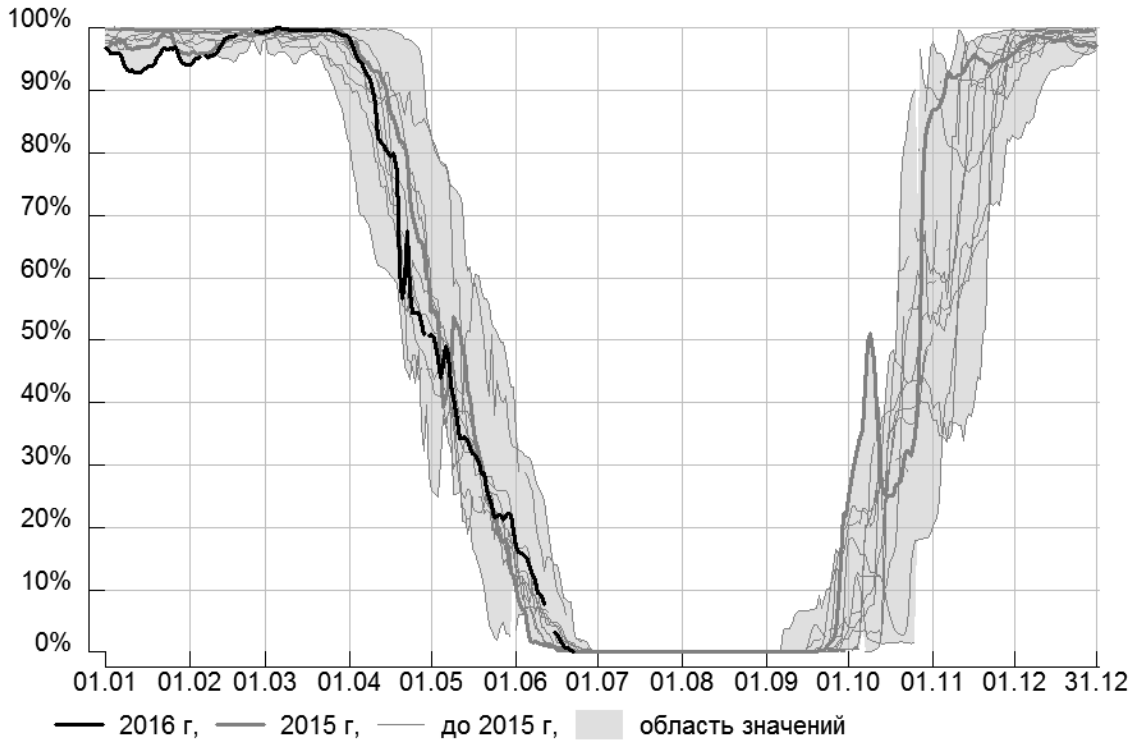


Рис. 2. Многолетняя динамика относительной заснеженности бассейна водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС за 2005–2013 гг.

Все результаты обработки данных доступны через информационный сайт по сети интернет. Сайт одновременно отображает данные одного выбранного бассейна, имеет сквозной календарь на весь период наблюдения (с 15 сентября 2004 г.), по которому

легко двигаться в обе стороны с выбранным шагом до 30 суток, и позволяет составить любой набор информации для отображения (снимки, картосхемы, таблицы). На рис. 2 приведён пример ещё одного графика с информационного сайта – многолетняя динамика заснеженности бассейна Саяно-Шушенской ГЭС за 2005–2016 гг. Из-за большого числа кривых отдельно выделены только графики последних двух лет, а вся область наблюдаемых значений закрашена для более лёгкой общей оценки текущего года. По этому графику для текущего года можно легко качественно оценить снегозапасы на начало и сроки начала и конца периода снеготаяния, сравнить текущий год с прошлым и всем периодом наблюдений с 2005 г. Так, например, легко заметить, что вариация сроков начала схода снега в бассейне Саяно-Шушенской ГЭС превышает 1 месяц – с последней декады марта до начала мая.

Результаты мониторинга в виде относительной заснеженности районов и высотных зон модельных бассейнов используются для коррекции параметров моделей в процессе весеннего снеготаяния, а именно – коррекции начальных снегозапасов по районам и высотным зонам [4]. При возникновении расхождений в расчётной и фактической наблюдаемой заснеженности в высотных зонах производится коррекция начальных снегозапасов, и расчёт повторяется. Данная итеративная процедура повторяется до достижения наименьших различий между моделью и наблюдениями. Коррекция начальных снегозапасов по этой методике в оперативной практике прогнозов всегда приводит улучшению критерия качества прогнозов, что служит наглядным подтверждением достоверности и данных о заснеженности и работоспособности всей методики в целом.

Список литературы

1. Matson M. NOAA satellite snow cover data // Paleogeography and Paleoecology, 90. 1995. P. 213–218.

2. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. 2001.

3. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока / Д.А. Бураков, В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин, В.Ю. Ромасько [и др.] // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 100–109.

4. 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. 2010. № 2. Т. 7. С. 113–121.

5. 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, 54. 1995. P. 127–140.

6. 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, 12. 1998. P. 1723–1744.

7. Hall D.K., Foster J.L., Verbyla D.L., Klein A.G., Benson C.S. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska // Remote Sensing of Environment, 66. 1998. P. 129–137.

8. Жиглявский А.А., Красовский А.Е. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.

9. Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A. The characteristics of ASTER GDEM version 2, IGARSS, July 2011.

10. Verdin K.L. A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks // In: Proceedings, 17th Annual ESRI Users Conference, San Diego, California, July 1997.

УДК 551.510.42

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВЫНОСОВ НА АЭРОЗОЛЬНУЮ ОПТИЧЕСКУЮ ТОЛЩУ АТМОСФЕРЫ НАД ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКОЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

С. М. Сакерин, Д. М. Кабанов
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН
e-mail: sms@iao.ru
e-mail: dkab@iao.ru

ESTIMATES OF THE EFFECT OF CONTINENTAL OUTFLOWS ON ATMOSPHERIC AEROSOL OPTICAL DEPTH OVER THE EASTERN ATLANTIC ACCORDING TO MULTIYEAR DATA OF SATELLITE OBSERVATIONS

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov
V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Экспедиционные исследования атмосферного аэрозоля над океаном показали высокую изменчивость его характеристик, обусловленную выносами континентального аэрозоля. С использованием многолетних спутниковых данных (MODIS/AQUA) анализируется среднее пространственное распределение аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы над Восточной Атлантикой. Приводятся оценки градиентов долготного уменьшения АОТ по мере удаления от континентов в умеренных широтах, северной и южной тропических зонах.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толща, Восточная Атлантика.

Введение

Несомненное преимущество космического зондирования атмосферы и земной поверхности состоит в регулярности многолетних наблюдений и возможности получения пространственной информации. Результаты наземных (экспедиционных или сетевых) измерений, в сравнении со спутниковыми, выигрывают по точности и многообразию определяемых параметров природной среды – в частности, атмосферного аэрозоля. Поэтому наиболее эффективным в исследованиях характеристик аэрозоля является сочетание двух источников информации.

Нами ведутся многолетние исследования [1–3] оптических и микрофизических характеристик аэрозоля с борта научных судов в различных районах Мирового океана. Самое большое число данных в последнее десятилетие получено в Российских антарктических экспедициях (РАЭ) на трансатлантическом маршруте от Ла-Манша, через Кейптаун, до Антарктиды (рис. 1). Отмечалось, что пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля в значительной степени обусловлена выносами континентального аэрозоля [3]. В связи с этим было важно оценить, на каком удалении от континентов прослеживается влияние выносов антропогенного, пылевого и дымового аэрозоля. Решение такой задачи наиболее просто получить на основе спутниковых измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы.

Ещё одна задача связана с разработкой региональных моделей аэрозоля над океаном и нахождением границ «аэрозольных» районов, в пределах которых АОТ отклоняется от среднего на величину СКО. Широтные границы районов можно определить по многолетним данным корабельных измерений на маршруте РАЭ, а для оценки долготных границ необходим анализ результатов спутниковых наблюдений.

Для анализа пространственного (долготного) распределения АОТ в Восточной Атлантике использовались данные многолетних (2002–2015) измерений спутникового спектрометра MODIS/Aqua&Terra (коллекция 6 [4, 5]). Расчеты среднего распределения

АОТ (0,55 мкм) выполнялись с шагом 1° по долготе для трех широтных зон (10–15° с.ш., 15–20° ю.ш. и 45–50° с.ш.) и двух месяцев (апрель, ноябрь). Районы выбирались с учетом различия типов аэрозоля и циркуляций: первая из широтных зон (пассатная) известна мощными пылевыми выносами из Сахары; во второй наблюдаются менее интенсивные выносы почвенного аэрозоля из тропической Африки, иногда в сочетании с дымами горения биомассы; третья зона подвержена выносам мелкодисперсного антропогенного аэрозоля со стороны Европы под влиянием циклонической деятельности.

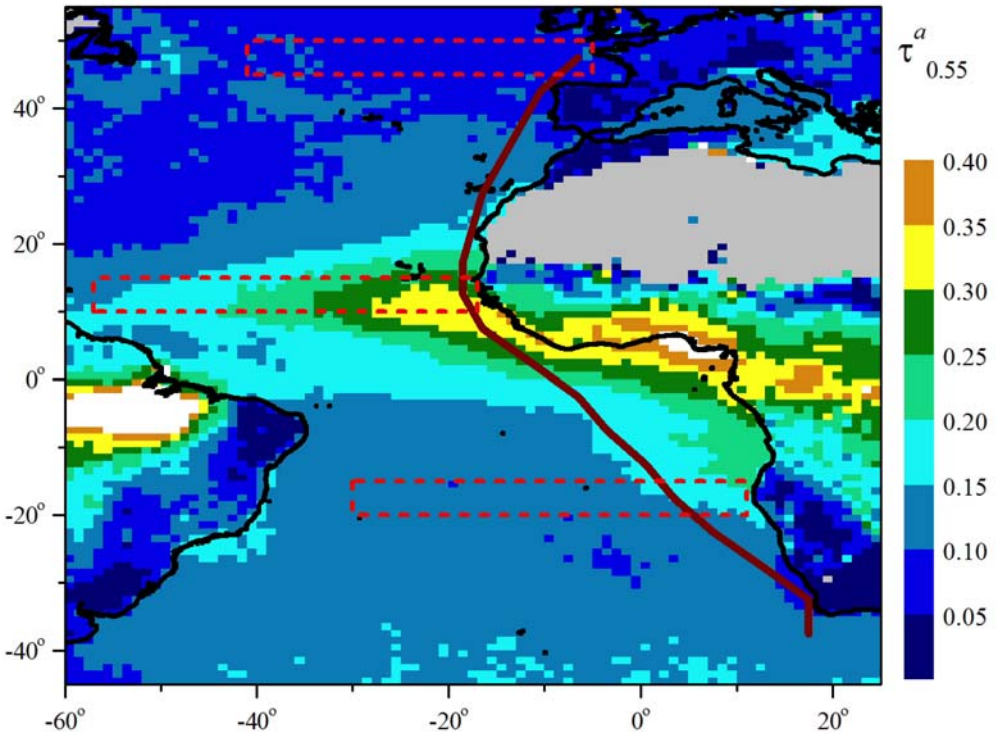


Рис. 1. Маршрут РАЭ на фоне пространственного распределения АОТ (MODIS/AQUA, ноябрь 2002–2015) в Восточной Атлантике (пунктиром показаны три широтные зоны, выделенные для анализа долготного распределения АОТ)

Обсуждение результатов

Из рис. 1 видно, что АОТ атмосферы над Атлантическим океаном отличается значительной пространственной изменчивостью в широтном и долготном направлении. Самые большие неоднородности АОТ наблюдаются в зоне северного пассата. На рис. 2–4 представлены зависимости АОТ от долготы λ для двух месяцев и трех широтных зон Атлантики. Количественная информация о средних градиентах (пространственные производные) изменения АОТ в зависимости от долготы ($\Delta\tau/\Delta\lambda$) приведена в таблице.

Из приведенных данных следует, что с удалением от континентов, как правило, наблюдается практически линейный спад АОТ. Величина градиента ($\Delta\tau/\Delta\lambda$) для разных широт и месяцев различается: максимальный градиент характерен для зоны северного пассата в апреле, минимальный (или отсутствие) – в умеренных широтах вблизи Европы. Расстояние от континента L*, где среднее долготное значение АОТ уменьшается на величину СКО (см. 5-й столбец таблицы), составляет примерно 1–2 тыс. км. Отсутствие градиента ($\Delta\tau/\Delta\lambda$) в умеренных широтах вблизи Европы требует дополнительного изучения. Отсутствие различий АОТ при удалении от Европы, по-видимому, обусловлено сопоставимым содержанием аэрозоля над Европой и Северной Атлантикой и преобладанием западного переноса, который препятствует поступлению аэрозоля с континента.

Таблица

Оценки долготных градиентов АОТ и границ «аэрозольных» районов

Широтные зоны	Месяц	Градиент изменения АОТ ($\Delta\tau/\Delta\lambda$), град$^{-1}$	L*, км	Границы «аэрозольных» районов в град. и км относительно маршрута РАЭ ($\lambda_{РАЭ}$)	
				западная	восточная
10–15° с.ш.	ноябрь апрель	0,004 0,0185	1847 1195	33° з.д. (1597) 28° з.д. (1054)	17° з.д. (141)
15–20° ю.ш.	ноябрь апрель	0,004 0,003	1698 1062	7° з.д. (1081) 1° з.д. (444)	10° в.д. (724)
45–50° с.ш.	ноябрь апрель	–0,0001 0,0005	>2000	> 40° з.д. (>2500)	5° з.д. (81)

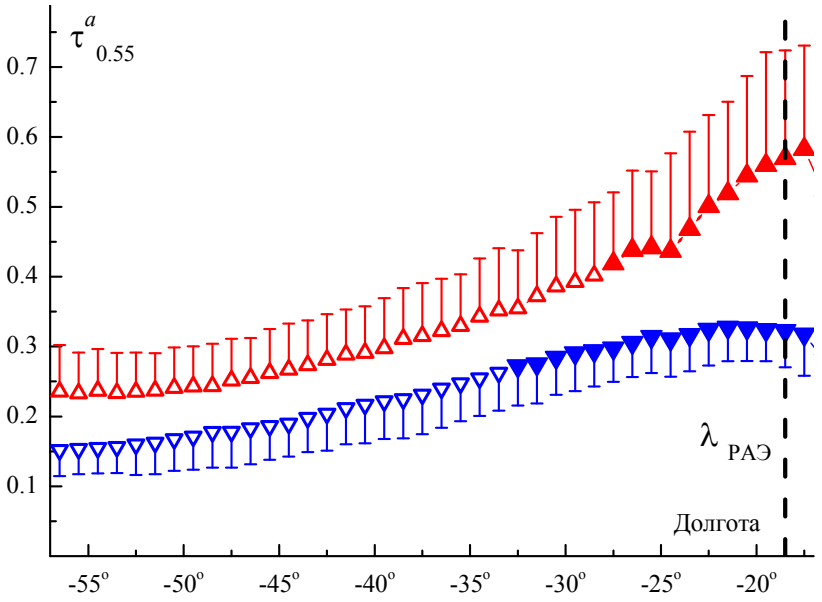


Рис. 2. Долготное распределение АОТ в широтной зоне 10–15° с.ш. (пунктир – долгота маршрута РАЭ, $\lambda_{РАЭ}$)

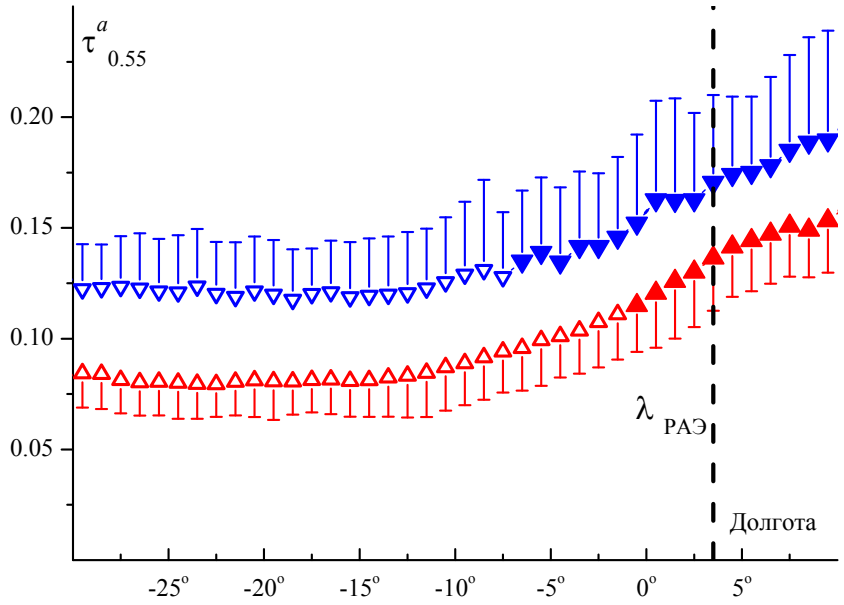


Рис. 3. Долготное распределение АОТ в широтной зоне 15–20° ю.ш.

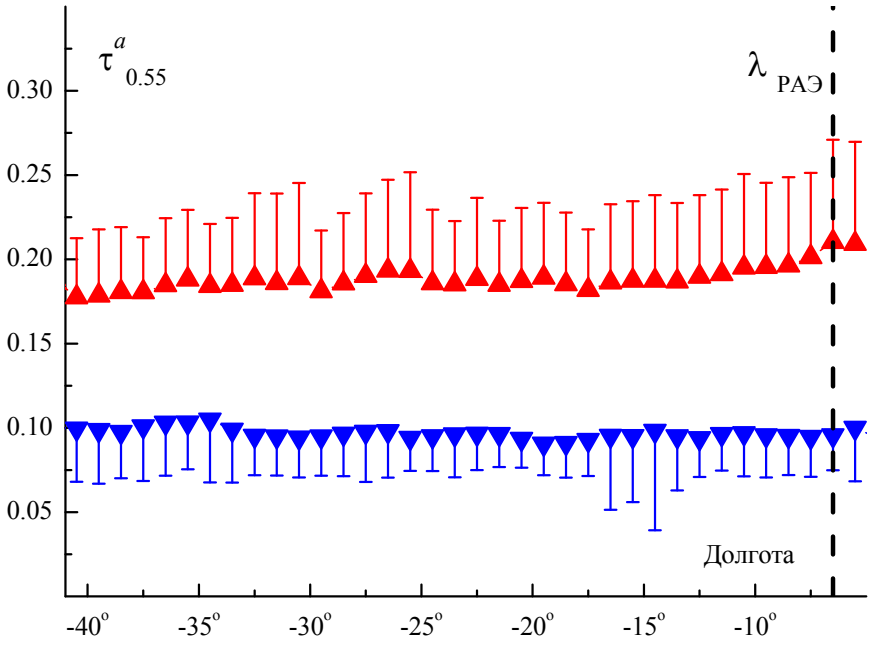


Рис. 4. Долготное распределение АОТ в широтной зоне 45–50° с.ш.

Приведенная информация (рис. 2–4) позволяет также найти ориентировочные границы «аэрозольных» районов. Западные границы районов относительно долготы маршрута РАЭ ($\lambda_{РАЭ}$) оценивались по спаду среднего долготного значения АОТ на величину СКО. Из-за близости маршрута РАЭ к континенту в качестве восточной границы бралась долгота ближайшего континента. Долготный диапазон выделенных таким образом «аэрозольных» районов обозначен на рисунках жирными значками.

Расчеты показали (см. последние столбцы таблицы), что долготная протяженность «аэрозольных» районов от континента до западной границы находится в диапазоне от 1200 км (апрель) до 1800 км (ноябрь). В умеренных широтах (45–50° с.ш.), из-за отсутствия градиента АОТ ($\Delta\tau/\Delta\lambda \rightarrow 0$) долготная протяженность «аэрозольного» района превышает 2500 км.

Авторы выражают благодарность коллегам NASA GES-DISC, обслуживающих систему Giovanni [5], за возможность использования спутниковых данных.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН, проект № II.2П/IX.133-3.

Список литературы

1. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Smirnov A.V., Holben B.N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37-4 μm // International J. Remote Sensing, 2008. Vol. 29, Issue 9. P. 2519–2547. doi: 10.1080/01431160701767492.

2. Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы солнечными фотометрами в 58 Российской антарктической экспедиции / С.М. Сакерин, Н.И. Власов, Д.М. Кабанов, К.Е. Лубо-Лесниченко, А.Н. Прахов, В.Ф. Радионов, Ю.С. Турчинович, B.N. Holben, A. Smirnov // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 27. № 12. С. 1059–1067.

3. Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, В.В. Полькин, В.Ф. Радионов, B.N. Holben, A. Smirnov // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29 (в печати).

4. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Trans. AGU, V. 88, No. 2 (9 January 2007). P. 14–17.

5. http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov

УДК 551.510.42

ВЛИЯНИЕ ЗИМНЕГО МУССОНА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ НАД АРАВИЙСКИМ МОРЕМ (СПУТНИКОВЫЕ И КОРАБЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ)

С. М. Сакерин, Д. М. Кабанов, Ю. С. Турчинович
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН
e-mail: sms@iao.ru

EFFECT OF THE WINTER MONSOON ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC AEROSOL OPTICAL DEPTH OVER THE ARABIAN SEA (SATELLITE AND SHIP-BASED MEASUREMENTS)

S. M. Sakerin, D. M. Kabanov, Yu. S. Turchinovich
V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Обсуждается пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы над океаном по результатам корабельных измерений (зима 2015/2016) на маршруте от Коломбо до Калининграда (через Суэцкий канал) и многолетним данным спутниковых наблюдений. Основное внимание уделяется анализу влияния муссонных выносов континентального аэрозоля на замутнение атмосферы над Аравийским морем.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толща, Индийский океан, муссон.

Введение

Аэрозоль, наряду с облачностью и водяным паром, относится к числу наиболее вариабельных компонентов атмосферы. Знание его оптических и микрофизических характеристик необходимо для решения многих задач по проблемам климата, экологии и дистанционного зондирования. С этой целью ведется мониторинг характеристик аэрозоля в континентальных районах и более редкие измерения в морских экспедициях. Из-за малочисленности экспедиционных данных к анализу привлекаются результаты спутниковых наблюдений. Исследования показали, что на спектральную прозрачность и аэрозольную оптическую толщу (АОТ) атмосферы над океаном значительное влияние оказывают выносы аэрозоля с континентов. Наиболее известными являются пассатные выносы сахарской пыли в Атлантику и муссонные выносы аэрозолей различного типа в Аравийское и Японское море.

В данной работе обсуждаются результаты измерений АОТ и влагосодержания атмосферы, выполненных зимой 2015/2016 с борта НИС «Академик Николай Страхов» на маршруте Коломбо – Аравийское, Красное, Средиземное море – Атлантический океан – Ла-Манш – Калининград (рис. 1). Основное внимание уделяется анализу аэрозольного замутнения атмосферы над Аравийским морем в период муссонных выносов аэрозоля со стороны полуострова Индостан. Результаты корабельных измерений АОТ в этом районе сравниваются с данными многолетних (2002–2015) наблюдений спутникового сканера MODIS/Aqua&Terra (коллекция 6 [1, 2]).

Характеристика экспедиционных измерений

Измерения характеристик прозрачности атмосферы на борту судна проводились с помощью портативного солнечного фотометра SPM, работающего в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм [3]. По результатам измерений рассчитывались спектральные АОТ, влагосодержание атмосферы W, параметры α и β формулы Ангстрема:

$$\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

а также мелко- (τ^f) и грубодисперсная (τ^c) компоненты АОТ [4, 5]:

$$\tau^a(\lambda) = \tau^c + \tau^f(\lambda) \approx \tau^c + m \cdot \lambda^{-n}, \quad (2)$$

где m и n – параметры спектральной зависимости мелкодисперсной компоненты АОТ. Районы и дни (порядковый номер) фотометрических наблюдений обозначены на рис. 1 квадратиками. Количество данных (часов/дней измерений), полученных в отдельных морских районах, приведено в табл. 1.

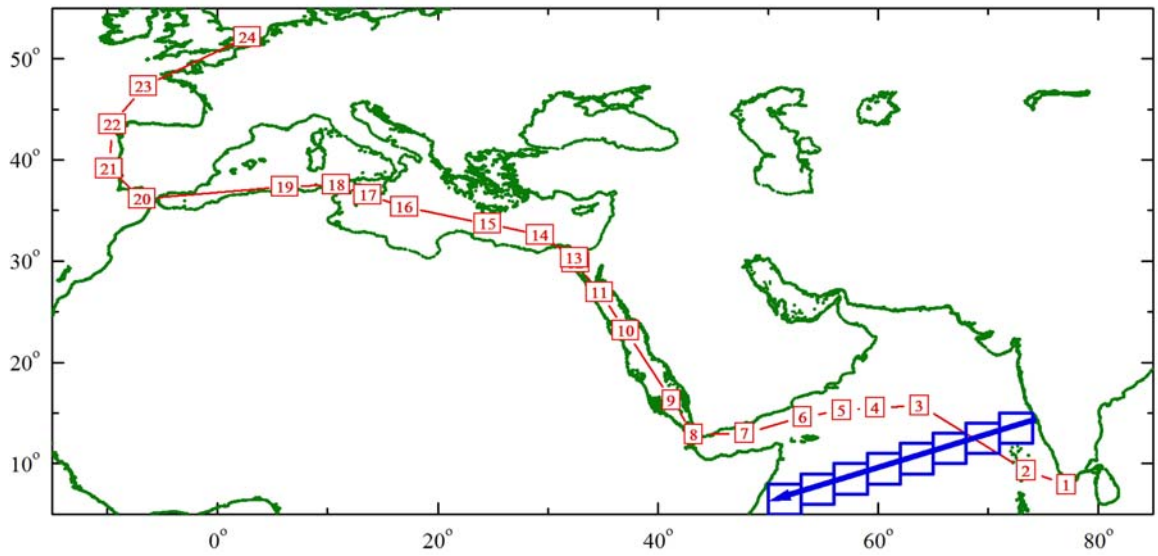


Рис. 1. Маршрут экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» (стрелкой обозначено направление выносов аэрозоля из Индии, квасные квадратики – номера дней измерений)

Таблица 1

Количество данных, полученных в рейсе НИС «Академик Николай Страхов»

	Аравийское море	Красное море	Средиземное море	Атлантика	Всего
Период	16–24.12.2015	25–31.12.2015	02–09.01.2016	12–17.01.2016	
Кол-во данных	36/7	35/6	27/6	15/5	113/24
№ дня на рис. 1, 2	1–7	8–13	14–19	20–24	

Кроме результатов судовых измерений, рассмотрено среднее пространственное распределение АОТ над Аравийским морем по многолетним (2002–2015 гг.) данным спутниковых наблюдений MODIS/Aqua&Terra (декабрь, длина волны 0,55 мкм). Пространственная изменчивость АОТ проанализирована в двух вариантах: (а) вдоль маршрута судна с разрешением 3°×2°; (б) в направлении основного потока выносов континентального аэрозоля – от середины западного побережья п-ва Индостан до середины восточного побережья п-ва Сомали с разрешением 3°×3° (шаг около 350 км).

Обсуждение результатов

На рис. 2, *а* иллюстрируется пространственно-временная изменчивость АОТ (0,5 мкм) и влагосодержания атмосферы на маршруте экспедиции. (Цифрами на графиках обозначены номера дней измерений.) Самые большие замутнения атмосферы были зарегистрированы в южной части Красного моря (9-й день, $\tau_{0.5} = 0{,}38$) и в центральной части Аравийского моря (3-й день, $\tau_{0,5} = 0{,}31$), минимальные (20-й день, $\tau_{0,5} = 0{,}03$) – в Гибралтаре. Влагосодержание атмосферы уменьшалось в соответствии с широтной зависимостью – от 5 г/см^2 южнее Индии до 0,05 г/см^2 над Северным морем.

Учитывая различие природных условий (источников аэрозоля, циркуляций) на маршруте экспедиции, статистические характеристики рассчитывались отдельно для

четырех районов (см. табл. 2): Аравийское море, Красное море (включая Суэцкий канал), Средиземное море и Атлантика (вдоль берегов Западной Европы). Средние спектральные зависимости АОТ для выделенных морских акваторий показаны на рис. 2, *б*. Из приведенных данных следует, что АОТ атмосферы во всем диапазоне спектра распределились по районам в следующей последовательности: Красное, Аравийское, Средиземное море и Атлантика. По степени замутнения атмосферы проявилось также разделение на две группы: высокие замутнения над морями Индийского бассейна и чистая атмосфера над морями Атлантики.

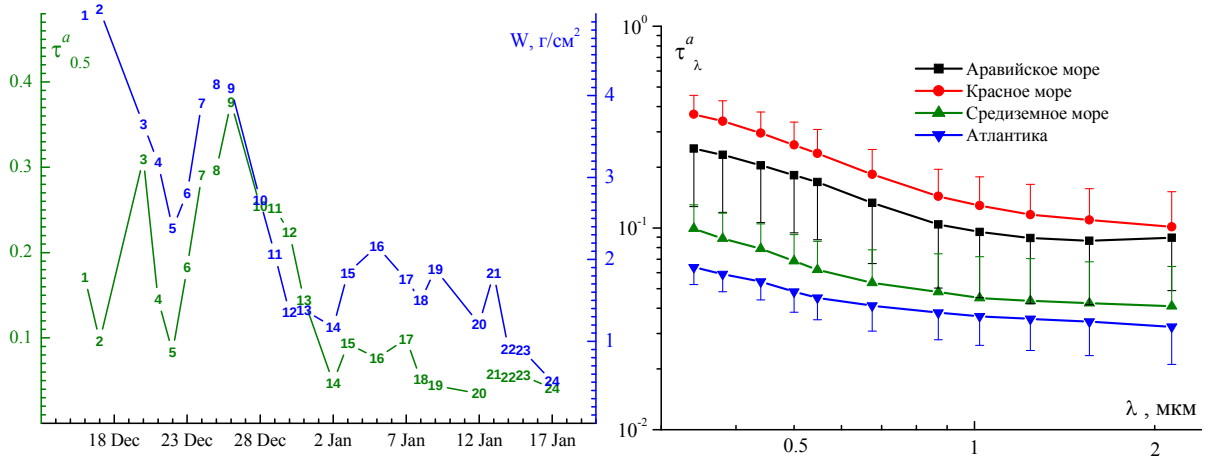


Рис. 2. Изменение АОТ и влагосодержания атмосферы W в период рейса (а) и средние спектральные зависимости АОТ в четырех районах (б)

Таблица 2

Средние (±СКО) значения характеристик АОТ в различных районах на маршруте НИС «Академик Николай Страхов»

Характеристики	Аравийское море	Красное море	Средиземное море	Атлантика
τ^a (0,34 мкм)	0,230±0,111	0,339±0,088	0,089±0,030	0,059±0,011
τ^a (0,5 мкм)	0,183±0,088	0,258±0,077	0,069±0,024	0,048±0,01
τ^a (0,87 мкм)	0,104±0,054	0,143±0,052	0,048±0,026	0,038±0,01
τ^a (2,14 мкм)	0,089±0,041	0,101±0,050	0,041±0,024	0,032±0,011
α	1,026±0,235	1,103±0,230	0,813±0,559	0,520±0,222
β	0,091±0,048	0,123±0,048	0,043±0,027	0,035±0,01
τ^c	0,085±0,044	0,101±0,05	0,041±0,024	0,032±0,011
τ^f (0,5 мкм)	0,098±0,058	0,156±0,049	0,028±0,021	0,016±0,005
n	2,62±0,25	2,29±0,19	2,45±1,09	1,95±0,73
m	0,079±0,037	0,107±0,035	0,020±0,015	0,012±0,002
W	3,71±1,03	2,62±1,26	1,72±0,34	1,07±0,49

Различие между районами более детально можно проследить по величине мелко- и грубодисперсной компонент АОТ. Атмосфера над Аравийским и Красным морями характеризуется очень высокими значениями τ^f, которые сопоставимы с данными над Японским морем и континентом (Томск) [5]. Кроме того, над морями Индийского океана $\tau^f > \tau^c$, а над морями Атлантики соотношение противоположное: τ^c в 1,5–2 раза больше, чем τ^f. Эти факты свидетельствуют о существенном влиянии выносов именно мелких частиц континентального аэрозоля – дымового и/или антропогенного.

Результаты судовых измерений АОТ (SPM) были сопоставлены с многолетними спутниковыми данными (MODIS) на том же маршруте (рис. 3, *а*). Видно, что совпадение наблюдается только в центральной части Аравийского моря (3-й день)

и в Аденском заливе (6–7 день), так как судовые измерения отражают не среднюю закономерность, а специфику распределения АОТ в условиях короткого периода экспедиции. Кроме того, анализ спутниковой карты АОТ показал, что измерения были проведены на южной и северной периферии основного потока муссонного выноса аэрозоля из Индокитая.

Ось наиболее интенсивных выносов в период зимнего (декабрь) муссона проходит от середины западного побережья п-ва Индостан до середины восточного побережья п-ва Сомали. АОТ вдоль указанного направления (рис. 3, *б*) в среднем изменяется от 0,32 до 0,23 – средний градиент спада составляет 0,037 на тысячу км.

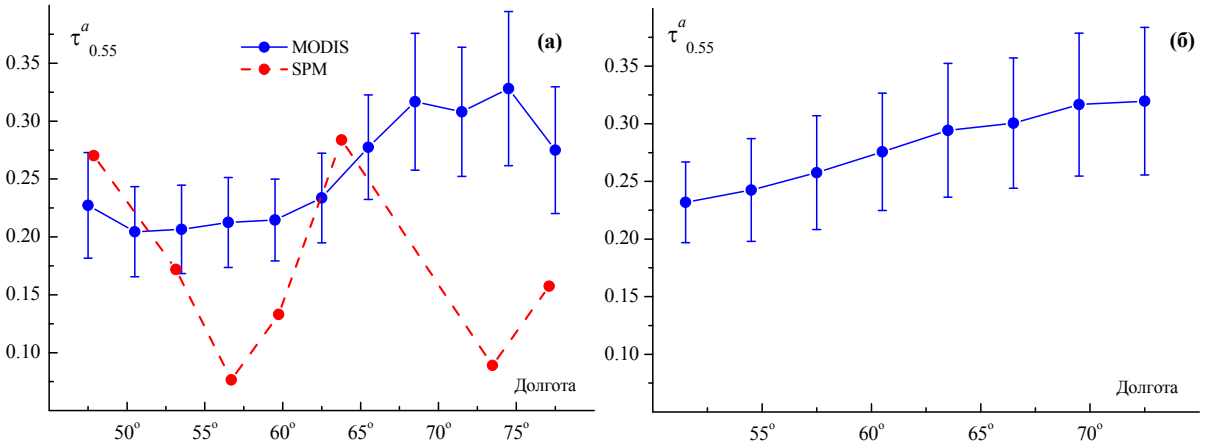


Рис. 3. Пространственное распределение АОТ над Аравийским морем по спутниковым и судовым измерениям: (а) вдоль маршрута НИС; (б) в направлении «Индостан – Сомали»

Заключение

Статистические характеристики АОТ, полученные в экспедиции НИС «Академик Николай Страхов», показали большой диапазон пространственной изменчивости: минимальные замутнения ($\tau_{0,5} = 0{,}03$) наблюдаются в Гибралтаре, максимальные (под влиянием выносов континентального аэрозоля) – в акваториях Аравийского и Красного моря ($\tau_{0,5} > 0{,}3$). Из анализа многолетних спутниковых данных (MODIS) следует, что вынос аэрозоля из Индии в период зимнего (декабрь) муссона происходит в юго-западном направлении – в сторону восточного побережья п-ва Сомали. АОТ над Аравийским морем вдоль этого направления в среднем уменьшается от 0,32 до 0,23.

Авторы выражают благодарность коллегам NASA GES-DISC, обслуживающим систему Giovanni [5], за возможность использования спутниковых данных.

Работа выполнялась при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН, проект № II.2П/IX.133-3, а в части анализа данных над Аравийским морем – при поддержке гранта РНФ-DST, проект № 16-47-02002.

Список литературы

1. Acker J.G. and Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Trans. AGU, V. 88, No. 2 (9 January 2007). P. 14–17.

2. http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov

3. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, А.П. Ростов, С.А. Турчинович, В.В. Князев // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1112–1117.

4. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // под общей ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.

5. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 8. С. 690–697.

УДК 528.854.4, 528.88

МОНИТОРИНГ РАЗВИТИЯ ВНОВЬ ОСВАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ НОВОЙ МОСКВЫ С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДЗЗ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

М. А. Сакиркина
МГУ им. М. В. Ломоносова
e-mail: masakirkina@gmail.com

MONITORING THE DEVELOPMENT OF NEW AREAS ATTACHED TO MOSCOW USING REMOTE SENSING DATA AND GIS-TECHNOLOGIES

M. A. Sakirkina
Lomonosov MSU
e-mail: masakirkina@gmail.com

В работе рассматривается возможность использования открытых данных ДЗЗ (космических снимков со спутников Landsat 5,8) и ГИС-технологий для обеспечения мониторинга развития и использования земель в период с 2007 по 2015 г. на присоединенных территориях Новой Москвы. Проведен анализ изменения использования земель за эти годы, включая выявление нарушений установок законодательства.

Ключевые слова: разновременные космические снимки Landsat, NDVI, Новая Москва, использование земель.

Введение

Предложенный Проект расширения территории Москвы, основанный на включении участков, входящих в состав Московской области, требовал решения градостроительных, административных, транспортных и иных проблем интенсивного развития территории. Его принятие в 2012 г. определило изменение статуса обширной территории, расположенной к юго-западу от прежней границы Москвы до Калужской области. В период 2012–2015 гг. параллельно с процессом формирования градостроительной документации началось интенсивное освоение выделяемых земель, в т.ч. промышленное и жилищное строительство.

В настоящее время существует актуальная проблема оценки фактического использования земель и связанных с ним нарушений природных и антропогенных ограничений. Важной задачей является также регулярный мониторинг изменения использования территорий с целью предотвращения опасных природных процессов и выявления территории с вероятным возникновением конфликтов при освоении.

Существующий в разных странах накопленный опыт оценки изменения использования земель по индексу NDVI, определяемому по разновременным снимкам, свидетельствует о возможности успешного решения такой задачи. Такие исследования могут быть дополнены материалами цифровых моделей рельефа при работе с горными районами для повышения точности классификации [1].

В статье представлены методика и результаты исследования территории водосборного бассейна р. Десны и её притоков, относящейся к присоединенной территории Новой Москвы. Картографирование в пределах водосборных бассейнов позволяет учесть естественные границы распространения и переноса вещества и энергии, такие границы используются для проведения эколого-географических исследований территории и оценки устойчивости ее состояния. Выбор именно этого участка обусловлен размерами бассейна, близостью к предшествующей границе

Москвы и интенсивным его освоением. Целью исследования является мониторинг освоения территории и выявления возможных нарушений на основе открытых материалов дистанционного зондирования Земли и ведения специализированной картографической базы данных для апробирования методики и дальнейшего использования на всей территории Новой Москвы.

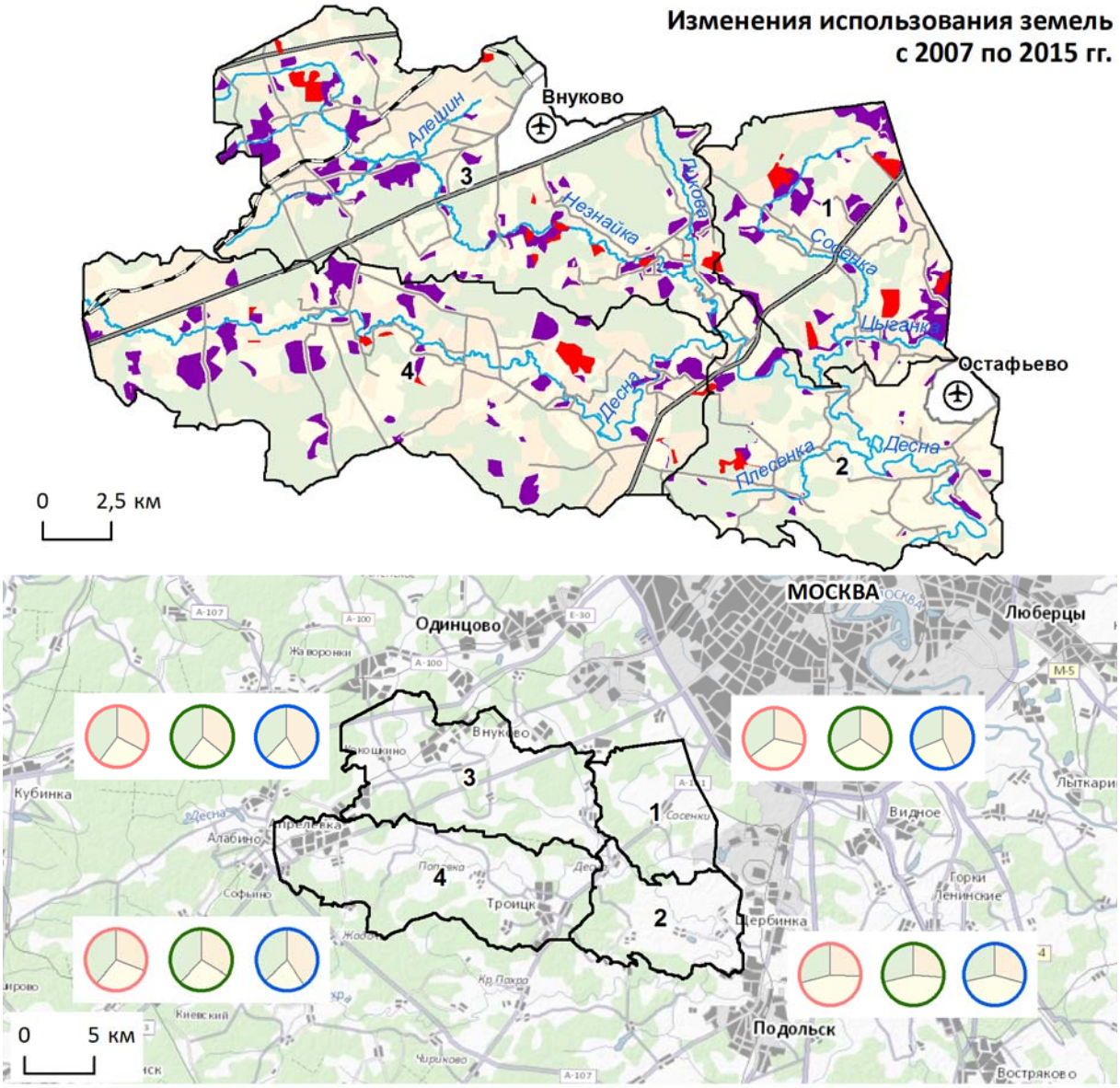
Материалы и методика

В исследовании использованы данные космической съемки со спутника Landsat 8 от 20 мая 2007 г., 28 мая 2011 г., 26 мая 2015 г. Выбор этих снимков обусловлен отсутствием облачности на исследуемую территорию и схожими датами съемки в летний период для достоверного сопоставления. Выбор снимков именно за эти года определяется временем включения территории в Новую Москву и последними доступными снимками во время активных сельскохозяйственных мероприятий. Границы территории выделены по расчетным границам водосборных бассейнов, полученным с помощью данных топографических карт и расчёта морфометрических характеристик.

В результате работы с данными дистанционного зондирования и расчета нормализованного вегетационного индекса NDVI выделены четыре основных класса: водные объекты, застройка, сельскохозяйственные территории, лесные массивы. Полученные за три временных среза сведения проанализированы и с помощью использования существующих классов объектов базы геоданных и пространственного анализа выявлены территории с изменением использования земель, определены тенденции развития территории в каждом водосборном бассейне. В пределах выявленных измененных территорий на основе применения базы геоданных и картографической базы данных возможно определение ландшафтных характеристик территории для оценки воздействия. Помимо инвентаризации и оценки использования земель также выявлены нарушения в пределах водоохранных зон, определенных на основе ст. 65 Главы 6 Водного кодекса РФ [2].

Результаты

Проведенные исследования позволили определить, что с 2007 по 2015 г. в развитии земель на тестовом участке проявляется тенденция увеличения доли застройки за счёт сокращения лесных массивов и сельскохозяйственных территорий. При сравнении динамики застройки с 2007 по 2011 г. и с 2011 по 2015 г. выявлено, что включение земель в состав Новой Москвы положительно повлияло на развитие и увеличение площади застройки (рисунок). При визуальном сопоставлении контуров застройки и данных космической съемки высокого разрешения (SPOT 6, сервис Яндекс.Карты) определено, что в жилой застройке преобладает малоэтажное строительство. Появление новых строений происходит равномерно на всей территории, выявляется преобладание расположения строений в местах с привлекательным местоположением (близость к рекам, к существующим населённым пунктам и их инфраструктуре). Также определено преобладание застройки на территориях с бывшими сельскохозяйственными угодьями, случаев застройки в лесных массивах меньше, что может быть связано с разными процедурами перевода земель из одной категории земель в другую, позволяющую проводить строительство. В то же время выявлены местоположения, в которых имеют место нарушения использования земель в пределах водоохранных зон; определено, что на застроенных в исследуемое время территориях 9,8 % строений построены с нарушением границ водоохранных зон. Развитие рассматриваемой территории также связано с созданием административно-деловых точек роста Коммунарка, Мосрентген-Румянцево, Троицк [3].



	Бассейны рек	Порядок
1	р. Сосенка	4
2	р. Десна *(после впадения р.Незнайка)*	5
3	р. Незнайка	4
4	р. Десна	4

Рис. Увеличение площади застройки Новой Москвы

Выводы

Ведение базы пространственных данных и картографической базы данных и сопоставление результатов пространственного анализа картографических данных и открытых данных ДЗЗ позволяет существенно оптимизировать мониторинг развития территории и повысить качество оценки фактического использования территории, выявить конфликты, связанные с природными и правовыми ограничениями, получать информацию о возможном развитии опасных процессов.

Работа выполнена при поддержке грантов: Президента РФ – НШ-2248.2014.5, РФФИ №13-05-41233_рго.

Список литературы

1. Yacouba D., Guangdao H., Xingping W. Assessment of land use cover changes using NDVI and DEM in Puer and Simao Counties, Yunnan Province, China // Report and Opinion. 2010. Vol. 2, No. 9. P. 7–16.

2. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ. Собрание законодательства РФ, 2006, № 23, ст. 2380; 2006, № 50, ст. 5279; 2007, № 26, ст. 3075.

3. Двенадцать центров развития ТиНАО [Электронный ресурс]. URL: http://stroi.mos.ru/new-moscow/12-tochek-rosta-novoi-moskvy

УДК 528.88

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Е. Ю. Сахарова[1,2], Л. А. Сладких[3], Е. Н. Кулик[4]
[1]Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»
[2]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
e-mail: elena.saharova27@gmail.com
[3]Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»
e-mail: sla@rcpod.siberia.net
[4]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

IDENTIFICATION OF AGRICULTURAL CROPS BASED ON MULTISPECTRAL SATELLITE DATA

E. Yu. Sakharova[1,2], L. A. Sladkikh[3], E. N. Kulik[4]
[1]Siberian Center FGBU "SRC "Planeta"
[2]Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: elena.saharova27@gmail.com
[3]Siberian Center FGBU "SRC "Planeta"
e-mail: sla@rcpod.siberia.net
[4]Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Проведение достоверного и качественного спутникового мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур невозможно без знания информации о составе возделываемых культур и их расположении на исследуемой территории. В статье представлены результаты выполнения идентификации сельскохозяйственных культур по многозональным космическим снимкам Landsat-8 с использованием способа максимального правдоподобия.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг растительности, классификация с обучением, области интереса.

Введение

На долю посевных площадей Новосибирской области приходится около 3 % (2,4 млн га) от всех посевных площадей нашей страны. Из года в год происходят различные изменения структуры посевных площадей, такие как изменение площадей земель сельскохозяйственного назначения, смена возделываемых на этих землях культур и т. д. Для осуществления спутникового мониторинга каких-либо объектов или явлений необходимо обладать определенной априорной информацией об объекте исследования (изучить их характеристики, особенности развития и прочее). Так, для выполнения полноценного мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур необходимо знать расположение культур на исследуемой территории, изучить динамику развития различных культур со временем, изучить влияние внешних факторов на рост и развитие и т. д.

Структура посевных площадей Новосибирской области 2015 г.

В 2015 г. на территории Новосибирской области преобладали посевы зерновых и зернобобовых культур – около 65 % всех возделываемых культур, из них общее количество посевов зернобобовых культур составило 1,5 %. На долю посевов яровой пшеницы приходилось около 44 %, овса – чуть менее 9 %, ярового ячменя – чуть менее 8 %, озимые зерновые культуры (такие как пшеница, рожь, тритикале) занимали чуть

менее 3 %. Техническими культурами было засеяно порядка 3 % (подсолнечник на зерно, рапс яровой, горчица и т. д.), картофелем и овощебахчевыми культурами (огурцы, томаты, тыква, кабачки и прочее) – менее 2 %, кормовыми культурами (бахчевые кормовые культуры, культуры кормовые на силос, однолетние и многолетние травы) – порядка 30 % [1, 2].

Результаты идентификации культур

В ряде работ по распознаванию сельскохозяйственных культур по многозональным спутниковым данным описано применение способа классификации с обучением (правило максимального правдоподобия) по материалам спутниковой съемки с космического аппарата (КА) Landsat [3, 4]. Стоит учитывать, что при выполнении классификации с обучением способом максимального правдоподобия обязательным условием является наличие информации о расположении культур на исследуемой территории. Это обеспечит возможность создания достоверных обучающих выборок (для каждого класса культур достаточно знать его расположение на нескольких полях). Также важным фактором является отсутствие облачности на снимке.

По материалам оперативного мониторинга состояния посевов зерновых культур 2015 г., на основе информации о расположении сельскохозяйственных культур на полях ряда хозяйств, была выполнена работа по идентификации сельскохозяйственных культур. На подготовительном этапе была изучена динамика развития культур в течение периода вегетации на территории Тогучинского района Новосибирской области. На рис. 1 представлены усредненные для каждой культуры графики изменения значений индекса вегетации различных культур.

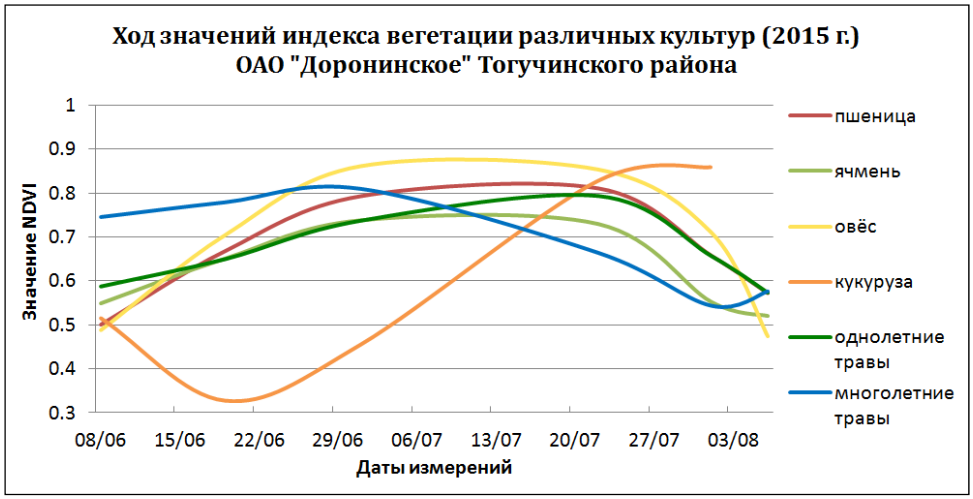


Рис. 1. Динамика развития культур, ОАО «Доронинское» Тогучинского района

Следует отметить, что для одних и тех же культур характерны различные стадии развития и разная густота покрытия. Этот факт находит отражение как в значениях вегетационных индексов, так и в результатах прогнозируемой для этих культур урожайности. В соответствии с этими параметрами для каждой культуры было создано несколько обучающих выборок, отвечающих разному состоянию. В качестве обучающих выборок классов применялись области интереса (Regions of Interest, ROI), которые использовались в том числе и для извлечения статистической информации. Было создано 28 ROI по 11 типам объектов: пшеница яровая, овёс, ячмень, горох, кукуруза, озимая пшеница, многолетние и однолетние травы, паровые поля, поля с неизвестными культурами и облачность.

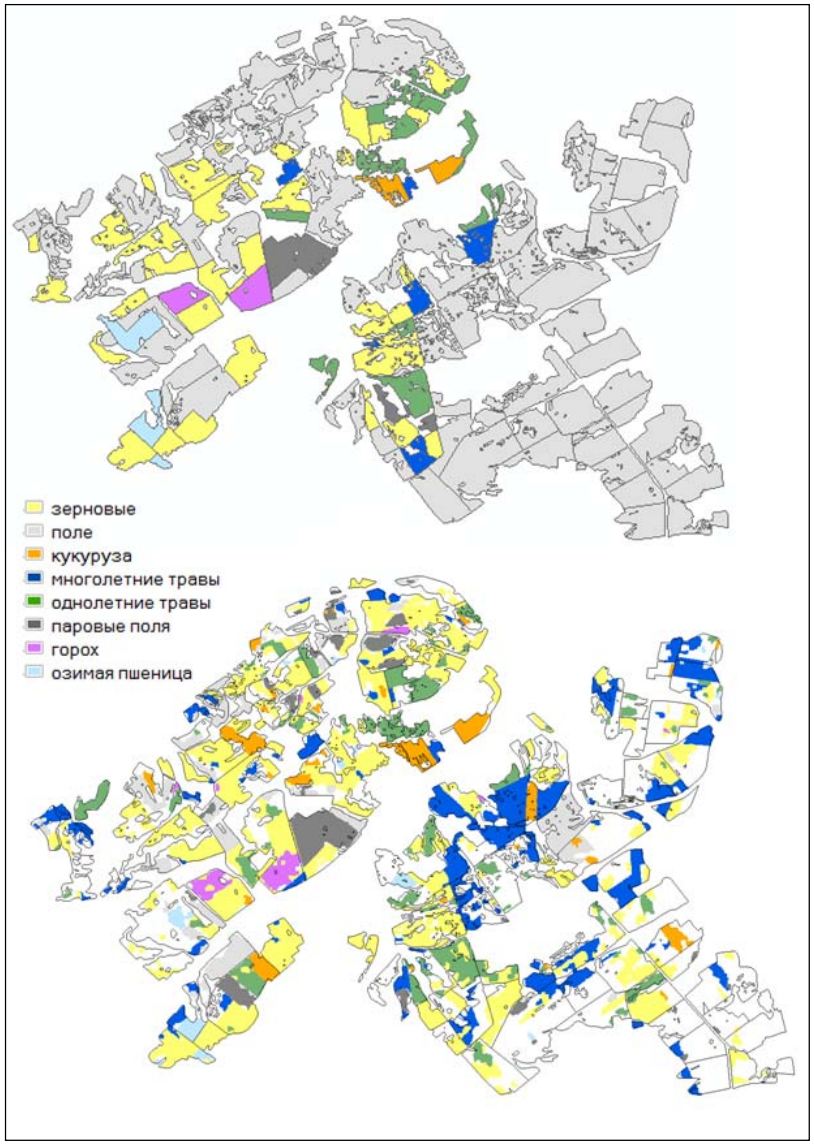


Рис. 2. Схема расположения культур и результаты классификации (Тогучинский район, 20.07.2015 г.)

На исследуемую территорию был подготовлен векторный слой с границами полей, который использовался в качестве маски для повышения качества классификации. По многозональным космическим снимкам Landsat-8 выполнялась классификация с обучением способом максимального правдоподобия. Изначально была проведена классификация снимка за 18 июня на основе использования созданных обучающих выборок и выполнено сравнение с исходной схемой расположения культур. Постклассификационная обработка заключалась в объединении классов по типам культур (так как каждая культура была представлена несколькими обучающими выборками), выполнении процедуры обобщения классификации – удаления изолированных одиночных пикселей и объединения смежных аналогичных классифицированных областей, что позволило получить более однородное изображение. Полученные результаты оказались неудовлетворительными, так как в классе зерновых культур наблюдалось явное преобладание овса, что не соответствует реальному соотношению культур. Было принято решение проанализировать корректность построения каждой обучающей выборки. По каждому ROI был построен график распределения яркостей и выполнен анализ соответствия каждого ROI своему типу

культуры. На данном вегетационном этапе своего развития в классе «овёс» наблюдалось значительное отличие одной из обучающих выборок от других. После исключения ее из процесса классификации была выполнена повторная классификация, которая показала более удовлетворительные результаты.

Окончательная классификация была выполнена по снимку за 20 июля 2015 г. Были использованы те же ROI, что и в первом случае, однако в силу наличия незначительной облачности обучающие выборки были откорректированы (из существующих областей интереса были удалены области, попадающие на облачные участки). На рис. 2 представлена схема расположения культур на исследуемой территории (построенная по информации, полученной из хозяйств) и результат идентификации культур по спутниковым данным с КА Landsat-8 (за 20 июля 2015 г.). На отклассифицированном изображении посевы пшеницы яровой, овса и ячменя объединены в класс «зерновые». К классу «поле» (изображенном на схеме серым цветом) относятся поля, про которые нет информации о возделываемых на них сельскохозяйственных культурах. Из-за наличия облачности часть полей была отнесена к неотклассифицированной области (белый цвет на схеме), что несколько осложнило оценку правильности распознавания культур.

Заключение

По результатам классификации снимка за 20 июля 2015 г. был рассчитан процент правильно распознанных культур на полях в сравнении с исходными данными (полученными из хозяйств). Для этого было подсчитано число полей, занимаемых отдельными культурами на схеме расположения, и число полей, на которых по результатам классификации были выявлены эти же культуры. Среднее значение процента правильно распознанных культур составило 80,9 %. При этом наименьшая достоверность распознавания характерна для класса паровых полей и однолетних трав (33 и 50 % соответственно), далее по достоверности следуют зерновые культуры (83 %). Достоверность распознавания остальных культур составила 100 %.

Список литературы

1. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://www.mcx.ru

2. Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в 2015 году (предварительные данные) [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2015/bul_dr/sx/posev-2015.rar

3. Терехин Э.А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. № 4. С. 243–248.

4. Казяк Е.В., Лещенко А.В. Спектральные преобразования космических снимков Landsat 8 для картографирования растительности агроэкосистем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. Новосибирск: Изд. СГУГиТ, 2015. С. 79–83.

УДК 528.88, 556.551

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ ОЗ. БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА AVHRR

Е. Н. Сутырина
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
e-mail: ensut78@gmail.com

A STUDY OF SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF LAKE BAIKAL SURFACE WATER LAYER TRANSPARENCY USING AVHRR DATA

E. N. Sutyrina
Irkutsk State University
e-mail: ensut78@gmail.com

В рамках настоящего исследования разработана региональная методика определения условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR, составлены серии карт распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в безледоставный период в различные годы, изучен ход средних значений прозрачности воды в поверхностном слое в отдельных районах озера и на всей акватории в целом.

Ключевые слова: озеро Байкал, прозрачность воды, данные радиометра AVHRR, пространственно-временное распределение, региональная методика.

Введение

Связь прозрачности воды с содержанием в ней взвесей и растворенных веществ органического и неорганического происхождения относит прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды и позволяет использовать её измерения для идентификации водных масс различного генезиса, исследования фронтальных разделов, для косвенного метода анализа динамики вод и т. д. [1–3]. Прозрачность, играющую значительную роль в жизни водоёмов, часто выделяют в число основных признаков, характерных для типизации озёр [4].

Для изучения особенностей распределения прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал, имеющего значительные размеры акватории в 31,7 тыс. км², привлечение данных дистанционного зондирования дает возможность наблюдать за состоянием всего водоёма и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, которую невозможно получить с использованием только судовых наблюдений.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования была разработана региональная методика оценки условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации с различием по времени спутниковых данных с соответствующими судовыми измерениями не более 200 минут. Для учёта существенного вклада в величину спектрального альбедо высоты солнца в работе для сопоставления с измерениями условной прозрачности использовались значения нормализованного альбедо 1 канала AVHRR. Влияние облачности минимизировано отбором малооблачных снимков, фильтрацией облачности и расчётом минимальных значений альбедо по всем доступным снимкам, попадающим в 200-минутный интервал

времени между спутниковыми и судовыми съёмками. Помимо уменьшения помех от полупрозрачной облачности расчёт минимального альбедо позволяет снизить влияние волнения на величину альбедо. Также необходимо отметить, что при волнении изменяется не только альбедо поверхности, но и сама величина условной прозрачности, что уменьшает помехи от влияния данного фактора на точность оценки прозрачности по величине спектрального альбедо.

В результате были получены зависимости величины условной прозрачности D_s, м, от нормализованного альбедо 1 канала AVHRR A_1, %: линейная зависимость вида $D_s = -a_s A_1 + b_s$ для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября со среднеквадратической ошибкой, равной 1,9 м, и коэффициентом детерминации, равным 0,82, а также зависимость вида $D_s = c_s - d_s \left(f_s - A_1\right)^k$ для периода с середины июля по середину сентября со значением среднеквадратической ошибки, равным 0,9 м, и коэффициентом детерминации 0,66, где a_s, b_s, c_s, d_s, f_s и k – региональные регрессионные коэффициенты.

Результаты исследования

С использованием данных зависимостей были составлены карты распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в период с июня по октябрь 1998–2015 гг. Примеры карт за отдельные годы приведены на рис. 1.

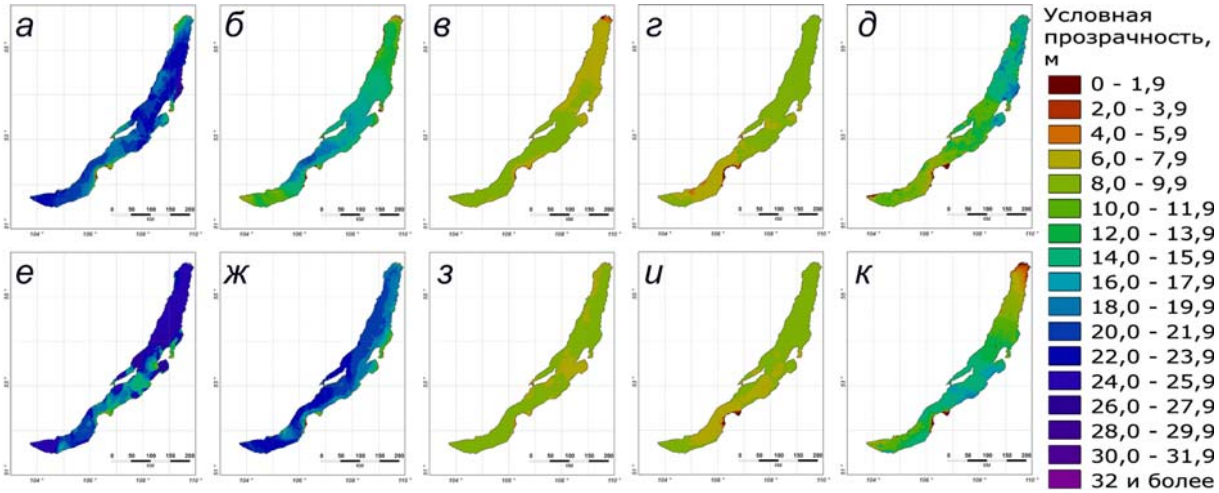


Рис. 1. Распределение условной прозрачности воды на поверхности оз. Байкал по данным AVHRR в 2012 г.: а – 13 июня; б – 1 июля; в – 28 июля; г – 1 сентября; д – 6 октября и 2013 г.: е – 10 июня; ж – 26 июня; з – 26 июля; и – 31 августа; к – 14 октября

Результаты спутниковых наблюдений показали, что прозрачность верхнего слоя воды в оз. Байкал имеет ярко выраженную пространственно-временную изменчивость. В ходе прозрачности за период с июня по октябрь в глубоководных районах озера наблюдается ярко выраженный максимум в июне – начале июля и минимум в конце июля – начале сентября, что хорошо согласуется с данными точечных полевых исследований [1, 5], при этом считается, что указанный максимум прозрачности связан с интенсивным вертикальным перемешиванием поверхностных вод с прозрачными глубинными в период весенней гомотермии, а указанный минимум объясняется «цветением» фитопланктона.

Согласно спутниковым данным, за период с июня по октябрь в 1998–2015 гг. прозрачность воды в поверхностном слое оз. Байкал в целом изменялась от менее чем

0,1 м – в непосредственной близости от дельты р. Селенги, в заливах Провал и Посольский сор, что обусловлено выносом продуктов размыва берегов и ложа р. Селенгой, до 27,5 м – в глубоководных районах озера.

Изучен ход среднего значения условной прозрачности воды в поверхностном слое в некоторых лимнических районах и на всей акватории оз. Байкал в целом (рис. 2). Ход прозрачности в указанных акваториях при наличии ярко выраженной внутригодовой изменчивости в общих чертах изменяется от года к году не столь существенно, и наибольшие отличия наблюдаются в конце июня – июле, что связано с более ранним или более поздним прогревом озера и, соответственно, с более ранним или более поздним началом «цветения» воды. В отдельных районах озера ход прозрачности может существенно отличается за счет их морфометрических особенностей, термического и динамического режима, характера пород, слагающих дно, перераспределения вод притоков и в зависимости от условий развития в различных районах планктона.

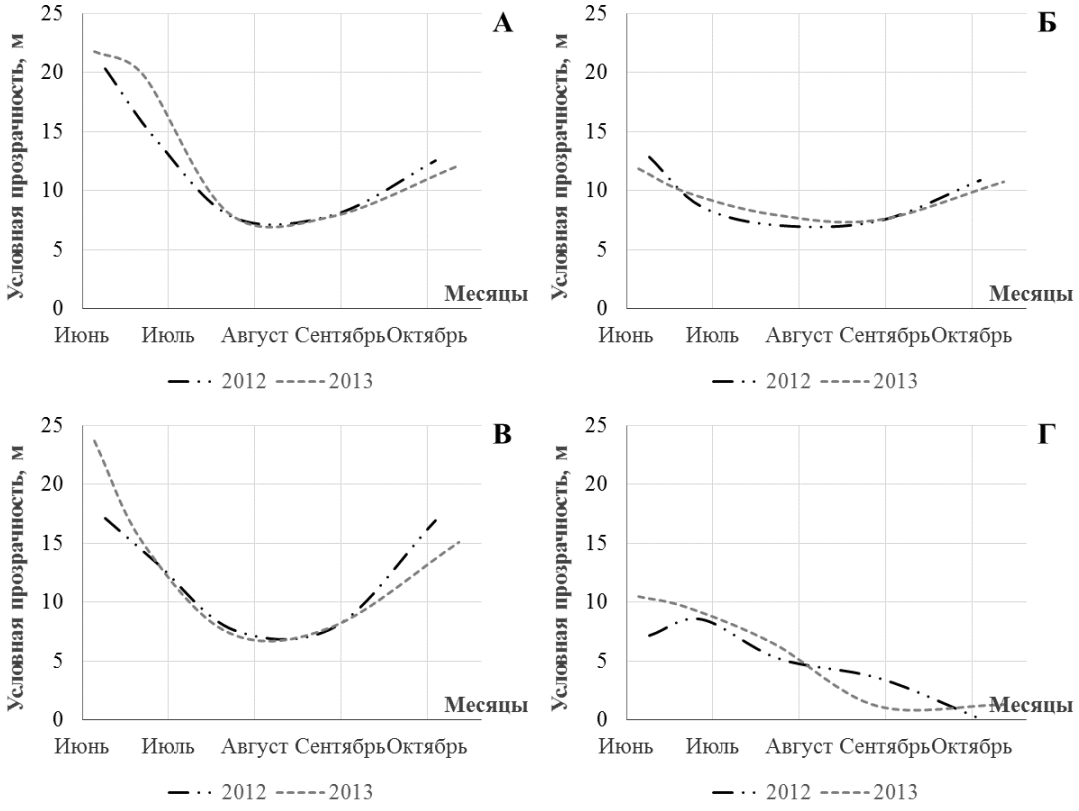


Рис. 2. Ход средних значений условной прозрачности воды на поверхности всей акватории озера Байкал (А), в Чивыркуйском заливе (Б), в Баргузинском заливе (В) и в заливе Провал (Г)

Так в мелководных заливах ход прозрачности характеризуется смещением её минимума на сентябрь-октябрь (например, в заливе Провал), что, вероятно, происходит из-за дополнительного взмучивания воды в результате действия штормовых ветров в данное время года. По средним значениям условной прозрачности, определенным в ходе настоящего исследования, вода в поверхностном слое озера может быть классифицирована по классификации, приведённой Китаевым [4]. В целом за период исследования воду в поверхностном слое озера Байкал отличает очень высокая прозрачность и только во время осенне-летнего минимума, с конца июля по середину сентября, воду в поверхностном слое озера в среднем характеризует высокая

прозрачность. Аналогичная ситуация наблюдается отдельно в Южной, Центральной, Северной котловинах озера, в Чивыркуйском и Баргузинском заливах и проливе Малое Море. В заливе Провал, согласно указанной классификации, вода в поверхностном слое имеет высокую или очень высокую прозрачность в период с начала июня по конец июля, затем прозрачность падает до малой или очень малой.

По соотношению степени загрязнения воды с условной прозрачностью [2] вода в поверхностном слое оз. Байкал в целом относится к очень чистой в течение всего анализируемого периода с июня по октябрь, однако в мелководных заливах, таких как залив Провал, в сентябре-октябре в отдельные годы позволяет по величине условной прозрачности отнести воду в поверхностном слое к умеренно загрязненной, загрязненной или даже к грязной.

Кроме этого, по спутниковым картам температуры [7] и прозрачности [8] определено наличие степенной зависимости с отрицательным показателем степени между прозрачностью и температурой поверхности воды в безледоставный период в открытой части озера с коэффициентом детерминации, равным 0,6, объясняющейся ростом фитопланктона с повышением температуры и в соответствующем снижении за счёт этого прозрачности.

Заключение

Разработанная в ходе исследования региональная методика позволяет с удовлетворительной точностью давать оценку прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR. Полученные в ходе исследования данные о пространственно-временном распределении прозрачности хорошо согласуются с материалами судовых исследований [1, 5, 6] и позволяют, в свою очередь, дополнять и уточнять имеющуюся информацию о прозрачности воды в озере, а также изучать внутригодовую и межгодовую изменчивость этой характеристики. В дальнейшем возможно применение данных о распределении условной прозрачности для изучения фронтов и динамических образований на поверхности озера Байкал, различимых в поле прозрачности.

Список литературы

1. Шерстянкин П.П. Пространственное распределение прозрачности в Малом море и его связь с динамикой вод // Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1974. С. 54–62.

2. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

3. Науменко М.А. Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности воды Ладожского озера // Ладога. СПб.: Институт озероведения РАН, 2013. С. 217–223.

4. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

5. Kozhov M. Lake Baikal and its life // Monographiae biologicae. 1963. Vol. XI. 344 p.

6. Оценка состояния весеннего фитопланктона озера Байкал в 2007 году / Г.И. Поповская, М.В. Усольцева, А.Д. Фирсова, Е.В. Лихошвай // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.

7. Сутырина Е.Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.

8. Сутырина Е.Н. Распределение прозрачности воды в озере Байкал по данным радиометра AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 95–103.

УДК 630*43+630*583

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ СЦЕН

А. А. Ткачева[(1)], И.М. Данилин[(2)]
[(1)]Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М. Ф. Решетнёва
e-mail: tkacheva@sibsau.ru
[(2)]Институт леса им В. Н. Сукачева СО РАН
e-mail: danilin@ksc.krasn.ru

THE USE OF LASER SCANNING DATA FOR MODELLING FOREST LANDSCAPE SCENES

A. A. Tkacheva[(1)], I. M. Danilin[(2)]
[(1)]Academician M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University
e-mail: tkacheva@sibsau.ru
[(2)]V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
e-mail: danilin@ksc.krasn.ru

Обсуждаются вопросы моделирования лесных ландшафтных сцен с использованием данных лазерного сканирования. Описание предложенного метода подразделяется на четыре этапа: получение исходного облака точек, включая стандартную предобработку данных – фильтрацию от шумов и совмещение данных в единую систему координат; построение трехмерной карты высот по исходным данным; отображение полученных результатов; оптимизация и визуализация конечной модели ландшафта.

Ключевые слова: лазерное сканирование, облако точек, трехмерное моделирование лесных ландшафтов.

Необходимость мониторинга обширных лесных территорий побуждает рассматривать дистанционные методы наблюдения в качестве приоритетных источников информации о состоянии и динамике лесов, что определяет актуальность развития соответствующих методов обработки получаемых данных. Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает достаточный уровень достоверности данных о состоянии лесного покрова, в т. ч. – для измерения ключевых характеристик биомассы. Находят применение следующие основные методы ДЗЗ: наземное (TLiDAR), воздушное лазерное сканирование (LiDAR), цифровая аэрофотосъемка и снимки со спутников [1–5, 11–14, 17–19].

Трехмерное моделирование лесной растительности – первоочередная задача при построении ландшафтных сцен, так как именно качественные модели растительности отвечают за реалистичную визуализацию трехмерных сцен участков леса. Кроме того, достаточно точное моделирование растительности по данным лазерного сканирования позволяет рассчитывать статистические характеристики биомассы и морфометрические показатели. Существует несколько алгоритмов моделирования растительности. Наиболее часто применяемые на практике – это использование грамматик *L*-систем и алгоритма *Space Colonization* [5, 10, 15, 16].

Моделирование растительности в трехмерном пространстве (3D) включает в себя как процесс создания трехмерной модели отдельно стоящего дерева, так и моделирование лесной сцены, в которой необходимо учитывать взаимовлияние объектов – деревьев друг на друга. Дерево является основным объектом изучения в силу присущей ему сложной структуры ветвления (моноподиальный, симподиальный

и тернарный) у различных пород деревьев. Кустарники рассматриваются как частный случай дерева с тернарным типом ветвления без выраженного ствола.

При рассмотрении существующих подходов к моделированию отдельно стоящих деревьев можно выделить 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*) [3, 7, 8].

В последнее время все большую популярность начинают приобретать методы построения трехмерных объектов с помощью вокселей. По сути, воксель является полным аналогом пикселя в 3D. Пиксель (*pixel* – англ. *picture element*) – элемент изображения, воксель (*voxel* – англ. *volume element*) – элемент объёма. Практически все характеристики пикселя переносятся на воксель, учитывая размерность. Воксель – это элемент объёмного изображения, содержащего значение элемента в трёхмерном пространстве. Как и в случае с пикселями, сами по себе воксели не содержат информации о координатах в пространстве. Координаты вычисляются из их позиции в трёхмерной матрице – структуре, моделирующей объёмный объект или поле значений параметра в трёхмерном пространстве.

Воксельные модели имеют определённое разрешение. Для хранения воксельной модели применяют массив размерами $X \times Y \times Z$. Несжатые воксельные модели (по сравнению с векторными) требуют гораздо больший объем машинной памяти при обработке, поэтому распространение получили сжатые воксельные модели, принцип которых основан на использовании разреженного воксельного октодерева.

В качестве значения вокселя в общем случае может выступать любой параметр, включая цвет. В нашем случае в качестве значения вокселя выступает плотность точек лазерного сканирования. Что касается формы вокселя, то в общем случае воксели могут быть в виде куба или шара, чаще всего встречается кубическое представление как частный случай параллелепипеда.

Широкое применение воксели нашли в медицине, в частности в компьютерной томографии. Изображения большого количества рентгеновских или ультразвуковых снимков под разными углами (порядка 100–200 снимков) обрабатываются, и создается трехмерный массив плотностей различных участков тканей исследуемого органа. Этот массив представляет собой «объемную картину», элементом которой является воксель. Второе, более наглядное применение вокселей – компьютерные игры. Схема предложенного метода восстановления ландшафтных сцен в общем виде состоит из четырех этапов:

– получение исходного облака точек, включая стандартную предобработку данных;

– построение трехмерной карты высот по исходным данным;

– отображение полученных результатов;

– визуализация и сохранение конечной модели ландшафта.

1 этап. Получение исходного облака точек, включая стандартную предобработку данных – фильтрацию от шумов и совмещение данных в единую систему координат – данные задачи решаются аппаратной частью большинства лазерных систем.

2 этап. Построение трехмерной карты высот по исходным данным. Существует несколько наиболее распространенных способов цифрового представления рельефа в виде:

− векторных линий (горизонталей или иных изолиний с равным или неравным шагом);

− регулярной матрицы (регулярная или матричная модель) высот земной поверхности (представление на регулярной сетке квадратов, прямоугольников или

треугольников, когда в ее узлах заданы значения высоты); далее по тексту для этого вида используются наименования «регулярная матрица высот» или «регулярная модель» (GRID).

По способу вычисления значения уровней поля между узлами сетки различают решеточные и ячеистые сетки. В первой из них такие значения интерполируются по значениям высот в соседних точках, вторая модель рассматривает точки как центры ячеек с постоянным значением отметки высоты. В программной реализации карта высот чаще всего представляется в виде двумерного массива переменных с плавающей точкой – набора значений высот для каждого значения в определенном интервале x, z на плоскости, лежащей горизонтально.

3 этап. Отображение полученных результатов. Для воксельных моделей существует множество способов визуализации: *Splatting*, *Marching cubes*, *Ray tracing*, *Maximum intensity projection*. Один из быстрейших способов называется «бросанием снежков» (англ. *splatting*). Воксели «бросаются» на поверхность просмотра в порядке удалённости от неё, от дальних к близким. Получившиеся «следы от снежков» отображаются как диски, цвет и прозрачность которых изменяются в зависимости от диаметра, в соответствии с нормальным (гауссовым) распределением. В различных реализациях могут использоваться другие элементы или же другие распределения.

Для улучшения качества изображения используются более сложные алгоритмы построения геометрии сцены: алгоритм *Marching cubes* и другие. Алгоритм *Marching cubes* (бегущие кубики) строит изоповерхность, опираясь на данные вокселей. Обычная реализация алгоритма использует значения 8 соседних вокселей, чтобы отрисовать полигон внутри куба, образованного их координатами. Так как существует всего 256 возможных комбинаций, можно заранее их подготовить и использовать типовые «кирпичики» (уже в экранных координатах) для отрисовки больших объёмов данных в хорошем качестве визуализации.

Ray tracing – технология построения изображения, при которой отслеживается обратная траектория распространения луча (от экрана к источнику). Вероятность попадания луча в какой-нибудь сегмент сцены пропорциональна площади этого сегмента. Чем больше примитивов содержится в участке сцены – тем больше пересечений нужно будет просчитывать при попадании луча в этот сегмент.

Существуют и другие алгоритмы, например, проекция максимальной интенсивности, которая хорошо отображает положение в трёхмерном пространстве наиболее ярких участков трёхмерного объекта. В целом аналогично *Ray tracing* луч проходит сквозь объект и выбирается воксель с максимальным значением.

Результатом воздушного лазерного сканирования является трехмерное облако точек в единой системе координат. Все регистрируемые лазером точки переводятся в новую воксельную систему координат по следующим формулам:

$$r = Int(\frac{x - x_{\min}}{\Delta i}) + 1$$

$$c = Int(\frac{y - y_{\min}}{\Delta j}) + 1$$

$$l = Int(\frac{z - z_{\min}}{\Delta k}) + 1,$$

где i, j, k – координаты вокселя; функция Int – функция округления до ближайшего целого числа; Δi, Δj, Δk – размерность вокселя. Так как используется кубическое представление вокселей, то $\Delta i = \Delta j = \Delta k = p$. Матрица перехода M от координат (x, y, z) к воксельному пространству (r, c, l):

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{p} & 0 & 0 & -\frac{x_0}{p} \\ 0 & -\frac{1}{p} & 0 & \frac{y_0}{p} \\ 0 & 0 & \frac{1}{p} & 0 \end{bmatrix},$$

где x_0, y_0 – координаты верхнего левого угла пространства точек лазерного сканирования.

Построение карты высот выполняется с наложением сетки G на исходное облако точек. Существует два вид сеток: регулярная сетка (триангулярная, квадратная и др. сетки) и адаптивная сетка. В случае адаптации необходимо учитывать, что применение высоких уровней адаптации приводит к ухудшению масштабируемости задачи. При подборе размера ячеек следует принимать во внимание, что на характерные размеры в задаче (диаметр ствола и диаметр кроны дерева) должно приходиться минимум 4 ячейки, а лучше 8–10.

Решение реализуется на регулярной разностной сетке, т. е. расчетная область разбивается на ячейки с шагом h_r вдоль оси r на K частей, с шагом h_l вдоль оси l на M частей и с шагом h_c вдоль оси c на N частей. Ячейки сетки имеют вид прямоугольных параллелепипедов и определяются тремя индексами (k, m, n). В каждой ячейке вычисляется центр масс (k_c, m_c, n_c), координаты которого записываются в отдельный массив данных, который визуализируется, остальные точки ячейки отбрасываются при построении исходного облака точек.

Для визуализации ландшафта используется алгоритм *Ray tracing*, по которому выполняется перемещение по лучу с некоторым шагом и находится пересечение с вокселем, при этом на каждом шаге проводится трехлинейная интерполяция, где 8 вершин представляют середины соседних вокселей. На *CPU* используется окто-дерево в качестве оптимальной структуры для быстрого пропуска прозрачных вокселей. На *GPU* для 3*D*-текстуры трехлинейная интерполяция выполняется автоматически средствами видеокарты. На *GPU* не используется окто-дерево для пропуска прозрачных пикселей, поскольку в случае 3*D*-текстуры иногда оказывается, что быстрее учитывать все воксели, чем тратить время на поиск и пропуск прозрачных. В качестве модели освещения используется затенение по Фонгу.

Данный алгоритм предоставляет возможность изменения яркости и цвета поверхностных вокселей, позволяет визуализировать различные природные эффекты – туман, дождь, снег, путем изменения цвета и яркости поверхностных вокселей, полученных при отражении луча. Значение расстояния от камеры до точки пересечения луча с объектом сцены используется для моделирования тумана: чем дальше объект находится от камеры, тем меньше интенсивность его цвета (для расчетов используется экспоненциальная функция убывания интенсивности).

Дальнейшим шагом при создании реалистичной лесной сцены является наполнение этой сцены моделями растительности – деревьями и кустарниками.

Для индивидуального моделирования каждого из объектов массива растительности следует выделить подмножество точек отдельного объекта дерева из исходного облака точек. Наиболее сложной задачей является отделение соседних объектов при их близком расположении друг с другом (перекрытии крон соседних деревьев). Решается данный вопрос путем определения слоя (значение по оси c является постоянной величиной и принадлежит некоторому интервалу, равному 5–6 размерам высоты вокселя, принятого в сцене) с максимальным количеством точек.

Для каждой области вычисляется центр масс, проекция которого на поверхность смоделированного ранее ландшафта является корнем дерева.

В последующем, имея облако точек, относящееся к одному объекту, выполняется моделирование структуры ветвления на основе алгоритма *Space Colonization*. Данный алгоритм изначально был предложен А. Рунионом с соавторами [15] для предсказания движения человека в толпе и позже стал использоваться для визуализации различных ветвящихся структур.

Основная идея заключается в итеративном добавлении новых элементов (ветвей) к существующей геометрической структуре объекта (дерева), сформированного на предыдущих шагах. Данный алгоритм является адаптивным, т. е. процесс роста зависит от следующих параметров: близлежащее присутствие объектов окружающего мира, соседство с другими деревьями.

Допустим, имеется некоторая «корневая» точка v из этой точки может выходить несколько ветвей, т. е. в окрестности данной точки имеется множество точек S (v), находящихся на расстоянии меньшем, чем di – параметр, задаваемый пользователем (параметр управления). Если множество S (v) не пустое, то новая точка v', присоединяется к общей структуре дерева путем построения сегмента (v, v'). Причем новая точка v' находится на расстоянии D от исходной точки v в направлении средненормированного вектора по отношению ко всем источникам $S \in S\,(v)$.

Данный алгоритм использовался для детальной прорисовки кроны дерева. Конечные позиции работы правил ветвления *L*-систем являются стартовыми точками работы алгоритма *Space Colonization*. Каждая последующая ветвь вычисляется следующим образом:

$$v' = v + D\tilde{n},$$

где D – расстояние между точками v и v', v (x, y, z) – точка начала новой ветви, v' (x', y', z') – конечная точка новой ветви, $\tilde{n}$ – средненормированный вектор направления роста ветви:

$$\tilde{n} = \frac{\bar{n}}{\|\bar{n}\|}$$
$$\sum_{s \in S(v)} \frac{s-v}{\|s-v\|}.$$

Данный процесс завершается при прохождении всех точек кроны дерева или при выполнении заданного пользователем количества итераций. Некоторые узловые точки удаляются. Это называется «прореживанием», иными словами при построении нового сегмента происходит проверка: все точки, находящиеся на расстоянии *dk* (*dk – kill distance*, входной параметр) от точки *v*', удаляются.

Основным результатом является трехмерная модель участка леса, представленная на рисунке.

На рисунке, *а* представлена визуализация данных лазерного сканирования в виде исходного облака точек трехмерных данных, на рисунке, *б* отображены результаты процесса локализации и диаметра крон деревьев, на рисунке, *в* представлена трехмерная модель лесной ландшафтной сцены с использованием графических примитивов в качестве представления крон деревьев.

Использование воксельного трехмерного представления дает возможность моделировать лесные ландшафтные сцены по точкам лазерного сканирования с необходимой точностью для каждого типа возникающих задач. Одним из достоинств воксельного представления графики является снятие ограничений на геометрическую сложность сцены – единственным и универсальным фактором, влияющим на сложность моделируемых объектов, является воксельное разрешение.

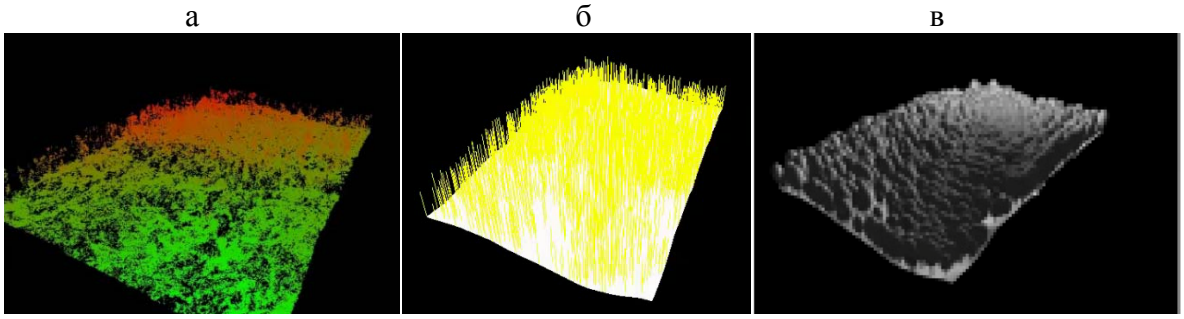


Рис. 1. Результаты трехмерного моделирования лесной ландшафтной сцены: а – исходное облако лазерных точек; б – локализация крон деревьев; в – интегрированная трехмерная модель лесной ландшафтной сцены

Использование алгоритма *Ray Tracing* позволяет получать реалистичные модели лесных ландшафтных сцен. Вместе с тем, следует отметить недостаток данного алгоритма – необходимость в просчете пересечения луча со всеми примитивами в сцене, что является довольно ресурсоемкой процедурой. Преимуществом данного подхода является возможность добавления различных природных эффектов в сцену путем изменения яркости и цвета «поверхностных» вокселей без дополнительных перерасчетов в сцене. Для построения залесенного участка земной поверхности размерностью 8096 × 8096 × 256 вокселей требуется не более 10 Мб машинной памяти. При этом для прорисовки геометрии крон и стволов отдельных деревьев рекомендуется использовать алгоритм *Space Colonization*.

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., Медведев Е.М. Технология мониторинга и инвентаризации лесных ресурсов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового геопозиционирования // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. «Техника и технологии». 2011. Т. 4. № 3. С. 326–336.

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

4. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 229 с.

5. Ткачева А.А. Использование данных дистанционного зондирования Земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен // Вестн. СибГАУ. 2014а. № 5 (57). С. 136–144.

6. Ткачева А.А. Применение алгоритма Space colonization при трехмерном моделировании сложных природных объектов // Вестн. СибГАУ. 2014б. № 1 (53). С. 85–91.

7. Favorskaya M.N., Tkacheva A.A. Wind rendering in 3D landscape scenes In Intelligent Decision Technology Support in Practice. SIST 42 / J.W. Tweedale, R. Neves-Silva, L.C. Jain, G. Phillips-Wren, J. Watada, and R.J. Howlett (Eds.). Springer Int. Publ., Switzerland, 2016. P. 169–183.

8. Favorskaya M.N., Tkacheva A.A., Danilin I.M., Medvedev E.M. Fusion of airborne LiDAR and digital photography data for tree crowns segmentation and measurement In Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. Smart Innovation, Systems & Technologies. V. 40 / E. Damiani, R.J. Howlett, L.C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro (Eds.). Springer Int. Publ., Switzerland, 2015. P. 191–201.

9. Favorskaya M.N., Zotin A.G., Chunina A.A. Procedural modeling of broad-leaved trees under weather conditions in 3D virtual reality In Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services / G.A. Tsihrintzis, M. Virvou, L.C. Jain, R.J. Howlett (Eds.). V. 11. Springer, Heidelberg, 2011. P. 51–59.

10. Favorskaya M.N., Zotin A.G., Danilin I.M., Smolentcseva S.N. Realistic 3D-modelling of forest growth with natural effect In Advances in Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems & Technologies. V. 4 / G.P. Wren, L.C. Jain, K. Nakamatsu, R. J. Howlett (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 191–199.

11. Gatziolis D., Fried S.J., Monleon V.S. Challenges to estimating tree height via LiDAR in closed-canopy forests: a parable from Western Oregon // For. Sci. 2010. V. 56. N. 2. P. 139–155.

12. Hollaus M., Wagner W., Schadauer K., Maier B., Gabler K. Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach // Can. J. For. Res. 2009. V. 39. P. 1387–1400.

13. Hudak A.T., Haren A.T., Crookston N.L., Lieberman R.J., Ohmann J.L. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in Western Oregon, USA // For. Sci. 2014. V. 60. N 2. P. 253–269.

14. Hüttich C., Stelmaszczuk-Górska M.A., Eberle J., Kotzerke P., Schmullius C. Operational forest monitoring in Siberia using multi-source Earth observation data // Sibirskij Lesnoj Zurnal. (Sib. J. For. Sci.). 2014. N 5. P. 38–52.

15. Runions A., Lane B., Prusinkiewicz P. Modeling tree with a Space colonization algorithm // Eurographics Workshop on Natural Phenomena. The Eurographics Ass., 2007. P. 63–70.

16. Smelik R.M., Tutenel T., Biddara R., Benes B. A survey on procedural modeling for virtual words // Proc. Workshop on 3D Advanced Media in Gaming and Simulation, 2014. P. 25–34.

17. Straub C., Dees M., Weinacker H., Koch B. Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands // Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. 2009. N. 3. P. 277–287.

18. Suvanto A., Maltamo M. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas // Silva Fennica. 2010. V. 44. N. 1. P. 91–107.

19. Wulder M.A., Han T., White C.J., Sweda T., Tsuzuki H. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization // Rem. Sens. Environ. 2007. V. 110. P. 123–137.

УДК 528.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ АРХИВНЫХ ДАННЫХ AVHRR (1986–2015 гг.) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОГЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

О. А. Томшин, В. С. Соловьев
ФГБУН «Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю. Г. Шафера СО РАН»
e-mail: otomshin@ikfia.sbras.ru

USING LONG-TERM AVHRR RECORD (1986–2015) TO STUDY WILDFIRES IN EASTERN SIBERIA

O. A. Tomshin, V. S. Solovyev
Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS
e-mail: otomshin@ikfia.sbras.ru, solo@ikfia.ysn.ru

Проведена оценка качества архивных данных AVHRR (непрерывность ряда данных, пространственное покрытие, наличие помех) для решения задач по исследованию пирогенной активности на территории Восточной Сибири.

Ключевые слова: AVHRR, лесные пожары, дистанционное зондирование.

Введение

Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим огромное влияние на биоразнообразие лесных экосистем и ресурсный потенциал лесов, температурный и газовый баланс атмосферы. Исследованиям лесопожарной активности посвящён ряд публикаций [1–4]. Для мониторинга лесных пожаров, особенно на обширных и малонаселенных территориях, широко используются методы дистанционного зондирования Земли. Наиболее часто используемыми для этих целей являются спутники NOAA (радиометр AVHRR) и пришедшие им на смену в начале 2000-х годов спутники Terra и Aqua (радиометр MODIS). В силу технического преимущества радиометра и высокого уровня верификации данных продукты MODIS более предпочтительны по сравнению с AVHRR. Однако данные MODIS доступны только со времени запуска спутников Terra и Aqua (конец 2000 г.), тогда как данные радиометра AVHRR охватывают период, начиная с 1978 г. и до настоящего времени.

Целью работы является оценка качества многолетнего архива данных NOAA/AVHRR (1978–2015 гг.) для исследования пирогенной активности в Восточной Сибири.

Данные и методика

В работе использован многолетний ряд данных радиометров AVHRR/2-3, установленных на полярно-орбитальных спутниках NOAA (6, 9-12, 14-19), полученный из архива NOAA CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System) [URL: http://www.nsof.class.noaa.gov/]. Первый спутник серии NOAA (TIROS N) был запущен в 1978 г. В период с 1978 по 2015 г. было запущено 15 спутников, из которых в настоящее время используются NOAA-18 и -19.

В соответствии с целью работы из архива NOAA были выбраны данные спутниковых пролётов, попадающих в область (55–75°N, 103–150°E) во время пожароопасного сезона (май-сентябрь). Выбранная область (область интереса) охватывает Восточную Сибирь, частично Западную Сибирь и Приморье. В результате были отобраны данные ~72 000 пролётов, начинающихся с 1986 г. и общим объёмом ~1,6 Тб.

В архиве имеется несколько типов представления данных AVHRR:

– Global Area Coverage (GAC) – данные, покрывающие весь земной шар, пространственное разрешение 4 км;

– Local Area Coverage (LAC) – данные, покрывающие 12-минутные участки орбиты, записанные и переданные с бортового накопителя, пространственное разрешение 1,1 км в надире;

– High Resolution Picture Transmission (HRPT) – данные, принимаемые наземными станциями в режиме реального времени, разрешение 1,1 км в надире.

В данной работе использованы данные с бортовых накопителей (LAC) и данные (HRPT), полученные на приемной станции Фэрбанкс, Аляска.

Данные AVHRR поставляются в формате L1B и содержат в себе геопривязанные данные об отражательной способности и энергетической яркости, а также калибровочные коэффициенты. Для перевода данных в формат L1C (яркостная температура и альбедо) использовался программный пакет AAPP 7.12 (ATOVS and AVHRR Processing Package) [URL: http://nwpsaf.eu/site/software/aapp/], свободно распространяемый в виде исходного кода метеорологической службой Великобритании.

Процедура обработки данных выглядит следующим образом. Исходные данные в формате L1B подаются на вход пакету AAPP, который осуществляет извлечение калибровочных коэффициентов. Затем выполняется преобразование в значения яркостной температуры и альбедо (уровень L1C), с учётом угла сканирования и высоты Солнца, а также расчёт геолокации для каждого пикселя. Формат выходных данных – hdf5, который помимо основных данных содержит дополнительные сведения о качестве отдельных сканов, качестве проведённой калибровки и ряд других параметров.

Оценка качества полученных данных осуществлялась в два этапа. На первом этапе производился отсев данных по 8 индикаторам качества, выдаваемых AAPP. На втором этапе проводилась дополнительная визуальная оценка на наличие сбойных пикселей/сканов в данных.

Для автоматического детектирования очагов пожаров (хотспотов) на языке программирования Python был реализован многопороговый алгоритм [5]. Поскольку большая часть исследуемой области находится в зоне сплошной вечной мерзлоты, оказывающей существенное влияние на режим горения лесного массива, была произведена адаптация указанного алгоритма к условиям Восточной Сибири. Также была осуществлена дополнительная коррекция пороговых коэффициентов на основе сопоставления результатов детектирования с данными MODIS.

Обсуждение результатов

Был проведён анализ качества покрытия данными AVHRR исследуемой области. Для каждого пожароопасного сезона были построены карты покрытия разными типами данных отдельных спутников. Для примера, на рис. 1, *а*, *б* представлены карты покрытия данными AVHRR: а) LAC-данные бортового накопителя (июль 1986 г.); б) HRPT-данные, принятые на станции Фэрбанкс, Аляска (июнь 1986 г.). Цветовая шкала отображает количество пролётов. Прямоугольником отмечена исследуемая область.

Из рисунков видны характерные особенности покрытия области интереса рассматриваемыми типами данных. Так, на рис. 1, *а* показано покрытие данными с бортового накопителя, которое имеет достаточно однородный вид, так как данные не привязаны к зоне видимости отдельной приёмной станции и поэтому полностью покрывают исследуемую область. В среднем наблюдается ~20–30 пролётов за месяц. На рис. 1, *б* данными охвачена только северо-восточная часть выделенной области,

попадающая в зону видимости станции Фэрбанкс. В этом случае частота пролетов спутников выше и составляет ~70 пролётов за месяц.

В таблице представлены результаты анализа качества покрытия данными (непрерывность ряда данных, пространственный охват, наличие помех) области интереса. Зелёными полями отмечены сезоны с хорошим покрытием (охвачен весь сезон, в среднем 2–3 пролёта в день, пространственное покрытие территории Якутии > 80 %), синими – с удовлетворительным покрытием (охвачена часть сезона, пространственное покрытие территории Якутии < 80 %). Пустые поля таблицы означают отсутствие данных в архиве.

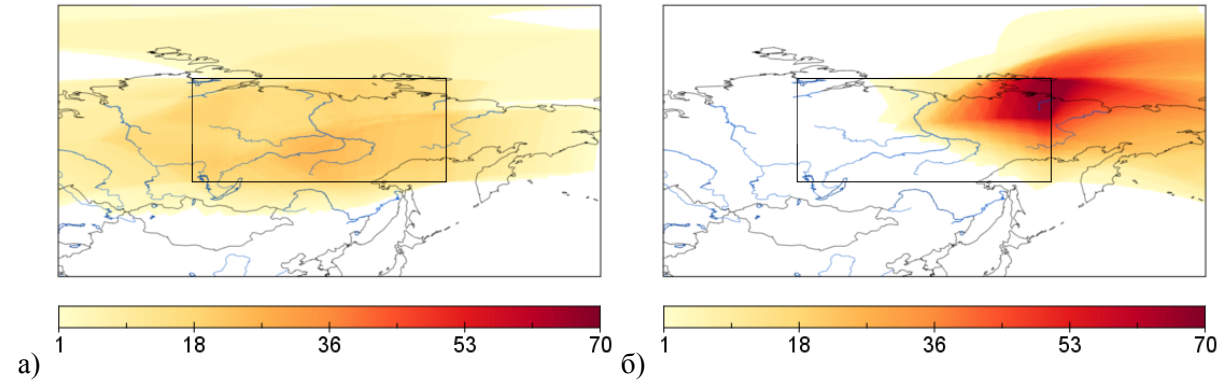


Рис. 1. Карты покрытия выделенной территории пролётами ИСЗ NOAA-9 в 1986 г.: а) «LAC» данные с бортового накопителя (июль 1986 г.); б) «HRPT» данные, принятые на станции Фэрбанкс, Аляска (июнь 1986 г.)

Как видно из таблицы, данные архива NOAA в целом достаточно хорошо покрывают исследуемую область за рассматриваемый период.

Таблица

Наличие данных AVHRR на исследуемую область в период 1986–2015 гг. (май-сентябрь). Зелёными прямоугольниками отмечены сезоны с хорошим покрытием, синими – с удовлетворительным

	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
NOAA 6																														
NOAA 9																														
NOAA 10																														
NOAA 11																														
NOAA 12																														
NOAA 14																														
NOAA 15																														
NOAA 16																														
NOAA 17																														
NOAA 18																														
NOAA 19																														

На рис. 2 представлен пример детектирования очагов ЛП за 10 июля 1986 г. (рис. 2, *а*) и среднесуточное распределение аэрозольного индекса (рис. 2, *б*), полученного по данным TOMS. Красными (рис. 2, *а*) и чёрными (рис. 2, *б*) пикселями

показаны очаги пожаров, детектированных по данным AVHRR/NOAA-9. Как видно из рис. 2, *а*, на территории южной Якутии наблюдалось большое количество очагов пожаров. Как результат, это привело к формированию огромной неоднородности в распределении аэрозольного индекса (рис. 2, *б*). Область неоднородности протянулась от южных регионов Восточной Сибири до Обской губы на севере Сибири, заняв площадь ~1,7 млн кв. км.

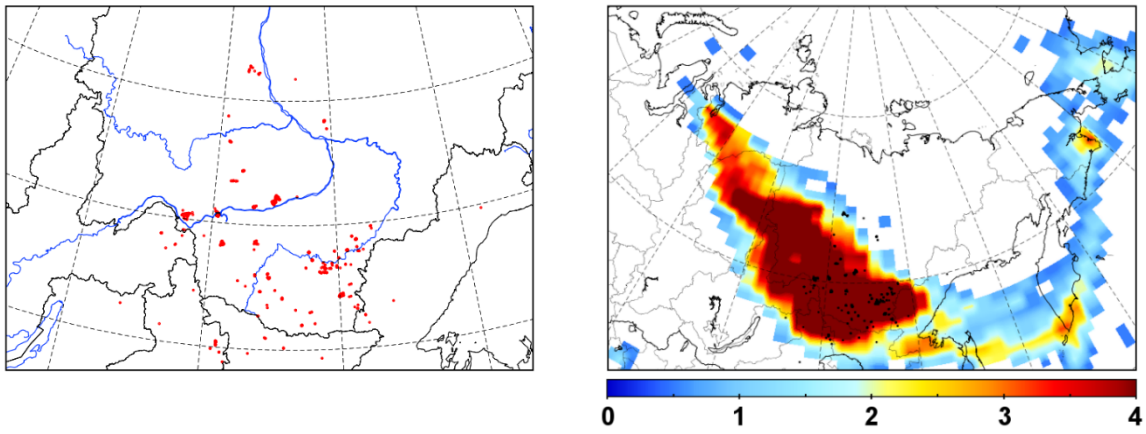


Рис. 2. Карта а) очагов горения (чёрные точки) и б) распределения среднесуточных значений аэрозольного индекса за 10 июля 1986 г.

Заключение

Анализ архива данных NOAA CLASS показал, что территория (55–75°N, 103–150°E) имеет хорошее комбинированное (LAC, HRPT) покрытие данными приборов AVHRR за период май–сентябрь 1986–2015 гг. Данные имеют низкую зашумленность (сбойные пиксели/сканы), особенно это относится к данным типа LAC; отмечается небольшое число пробелов в данных и высокая частота обновления покрытия 2–3 раза/день. Можно предположить, что результаты анализа данных архива NOAA, в части LAC-данных, могут быть распространены на остальную часть территории России.

Список литературы

1. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепащенко, Е.А. Ваганов, А.И. Сухинин, Ш.Ш. Максютов, И. МкКаллум, И.П. Лакида // Доклады академии наук. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.

2. Tomshin O.A., Solovyev V.S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35, № 15. P. 5742–5749.

3. Томшин О.А., Соловьев В.С. Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии (2002 г.). // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 07. С. 634–639.

4. 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.

5. Li Z., Kaufman Y.J., Ichoku C., Fraser R., Trishchenko A., Giglio L., Jin J., Yu X. A Review of AVHRR-based Active Fire Detection Algorithms: Principles, Limitations, and Recommendations / Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort. – Hague: SPB Academic Publishing BV, 2000. P. 199–225.

УДК 528.8.04, 528.88

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РЕСУРС-П

Е. В. Федотова[1,2], А. И. Заречнева[1]
[1]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
e-mail: elfed@ksc.krasn.ru

Данные дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения РЕСУРС-П в четырех спектральных диапазонах (видимом и ближнем инфракрасном) использовались для выделения лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом. Была проведена классификация с обучением, метод максимального правдоподобия. Оценена информативность спектральных каналов. Были рассчитаны текстурные характеристики. Поврежденные леса выделяются по спектральным и не выделяются по текстурным признакам.

Ключевые слова: классификация, Ресурс-П, текстурные признаки, сибирский шелкопряд, Алтай.

Введение

В формировании современного облика тайги сибирскому шелкопряду принадлежит одна из ключевых ролей. Это насекомое в Сибири является одним из наиболее опасных вредителей хвойных лесов. Периодические подъёмы его численности на значительных площадях приводят к существенным изменениям структуры бореальных лесов, усыханию древостоев. Являясь постоянно действующим фактором в хвойных формациях Сибири, этот вредитель относится к основным причинам наблюдаемых в тайге сукцессий. Насекомое повреждает древостой пихты, сосны, ели и лиственницы. Вспышки массового размножения сибирского шелкопряда индуцируются сочетанием благоприятных погодных условий (оптимальная температура, низкий уровень осадков и влажности). Старые очаги размножения сибирского шелкопряда являются потенциальными очагами крупных лесных пожаров, что обусловлено увеличением запасов лесных горючих материалов [1].

Материалы космической съемки различного пространственного разрешения позволяют детализировать динамику повреждения древостоев. Мониторинг таежных лесов требует сочетания как обзорной съемки, позволяющей контролировать обширные регионы, так и съемки высокого пространственного разрешения очагов повреждения древостоев [2–6].

Цель работы – оценить информативность данных разных спектральных каналов для выделения повреждённых лесов по снимкам Landsat8 OLI и Ресурс-П.

Классификация снимков для выделения повреждённых древостоев

Классификация снимка Landsat 8 OLI

С геопортала http://earthexplorer.usgs.gov/ [7] были импортированы снимки Landsat 8 OLI в формате GeoTIFF. Дата съемки – 12 июля 2014 г. Собрано многоспектральное изображение с 6 слоями в видимой, ближней и средней инфракрасной (ИК) области (со второго по седьмой каналы). Выделен фрагмент снимка, охватывающий территорию поврежденных сибирским шелкопрядом древостоев (рис. 1).

На начальном этапе классификации с обучением снимка Landsat 8 OLI необходимо выделить все классы подстилающей поверхности, которые присутствуют на данной территории. Задачей классификации являлось разделить здоровый

и поврежденный лес. Были построены обучающие выборки шести типов подстилающей поверхности.

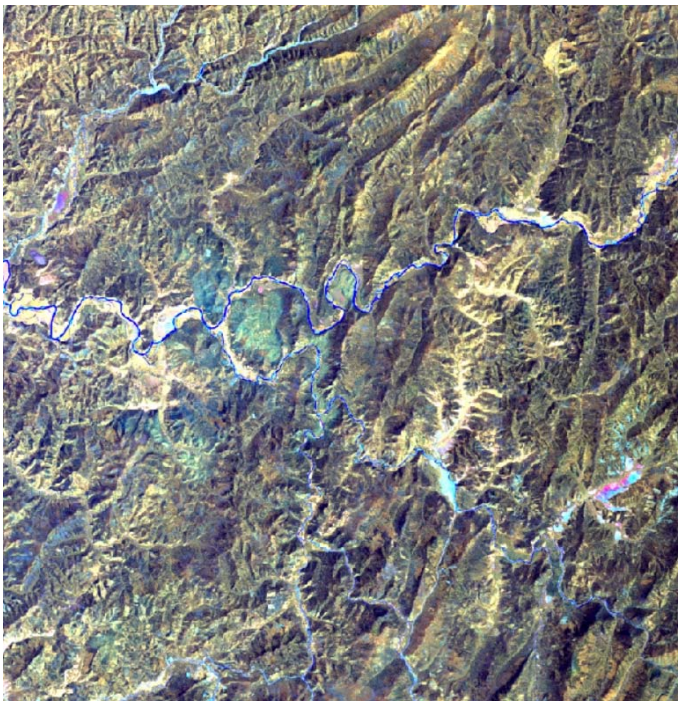
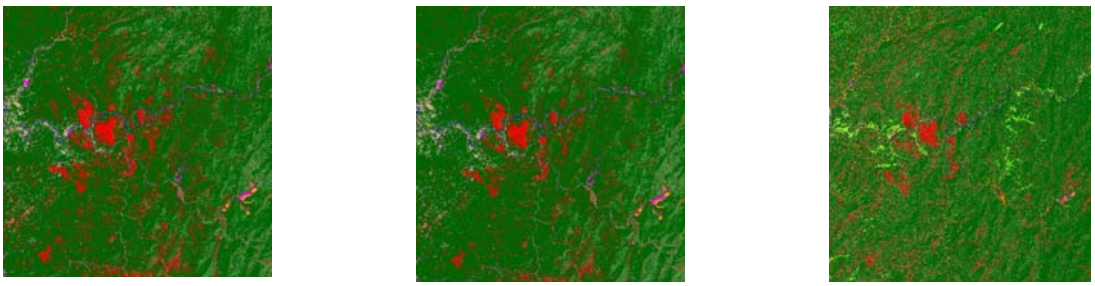


Рис. 1. Мультиспектральное изображение Landsat. RGB: 4–5–3

С помощью расстояния Джеффриса-Матусита оценено качество сформированного набора обучающих выборок. Удалены выборки, дублирующие друг друга, а выборки, которые близки по значению расстояния и соответствуют одному типу подстилающей поверхности, были объединены.

Проведена классификация тремя методами: методом максимального правдоподобия, методом расстояния Махаланобиса и методом минимального расстояния. Результаты классификаций представлены на рис. 2. Здоровый лес отмечен зеленым цветом, класс № 5. Поврежденные древостои отмечены красным цветом, класс № 6.

Наиболее информативным является метод максимального правдоподобия. Матрица ошибок классификации представлена в таблице. Общая точность классификации составила 87 %.



а) б) в)

Рис. 2. Результат классификации снимка Landsat 8 OLI методами: а) максимального правдоподобия; б) расстояния Махаланобиса; в) минимального расстояния

Таблица

Матрица ошибок

		Классы по ссылочным данным		Итого
		фон	поврежденный лес	
Классы по классификации	фон	73	16	89
	поврежденный лес	1	76	77
Количество ссылочных пикселей		74	92	166

Классификация снимка РЕСУРС-П

На начальном этапе классификации снимка Ресурс-П [8] необходимо выделить все классы подстилающей поверхности, которые присутствуют на данной территории. Задачей классификации являлось разделить здоровый и поврежденный лес.

Построены обучающие выборки семи типов подстилающей поверхности. В отличие от снимка Landsat, объектами на снимках высокого пространственного разрешения являются кроны деревьев, кустарников.

Классификация проведена методом максимального правдоподобия (рис. 3). Проведен расчет текстурных признаков: дисперсии, асимметрии, эксцесса и среднего эвклидова расстояния с разными размерами окна (рис. 4).

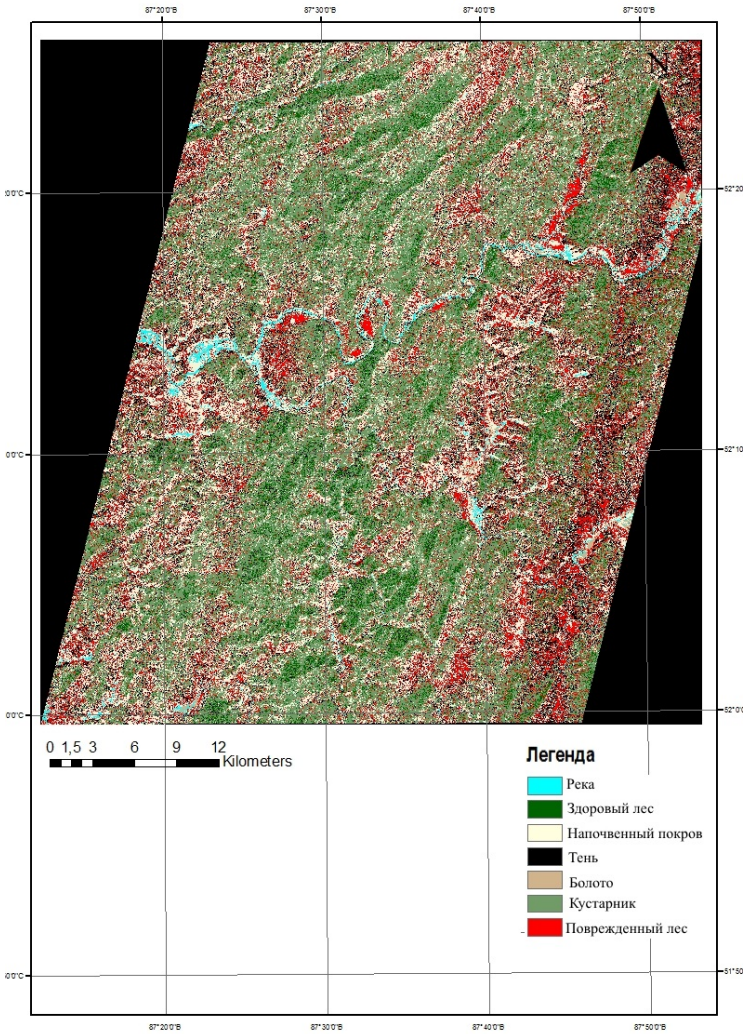
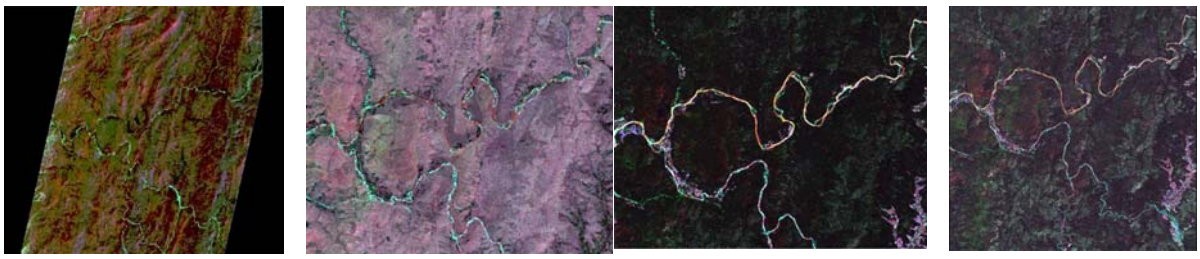


Рис. 3. Результат классификации снимка РЕСУРС-П



Дисперсия. Окно 3х3 | Асимметрия. Окно 15х15 | Среднее эвклидово расстояние. Окно 15х15 | Эксцесс. Окно 15х15

Рис. 4. Текстурные признаки снимка РЕСУРС-П. RGB – 4:3:2

На результатах расчета текстурных признаков можно увидеть полосы, которые являются техническими недостатками данных. В результате работы можно сделать вывод, что по спектральным признакам кроны здоровых и повреждённых деревьев различаются. По текстурным признакам повреждённые и здоровые деревья не различаются.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №14-024-00112.

Список литературы

1. Съемка spot-yegetation в анализе динамики повреждения горно-таежных лесов сибирским шелкопрядом / С.Т. Им, В.И. Харук, К.Дж. Рэнсон, В.В. Солдатов // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 74–80.

2. Dottavio C.L., Williams D.L. Satellite technology and improved means for monitoring forest insect defoliation // J. Forestry. 1983. Т. 81, № 1. С. 30–34.

3. Nelson R.F. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS // Photogram. Eng. and Rem. Sens. 1983. № 49. С. 1303–1314.

4. Radeloff V.C., Mladenoff D.J., Boyce M.S. Detecting Jack Pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: Separating effects from determinants // Rem. Sens. Environ. 1999. Т. 69, № 2. С. 156–169.

5. Съемка NOAA/AVHRR в мониторинге вспышек сибирского шелкопряда / В.И. Харук, А.Г. Кожуховская, И.А. Пестуно и др. // Исследование Земли из космоса. 2001. № 1. С. 1–7.

6. Буренина Т.А., Кузьмичев В.В., Харук В.И. Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири // Первый экологический журнал. 2005. № 1. С. 153–162.

7. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс]: USGS. Landsat Missions. Landsat8. Режим доступа: http://landsat.usgs.gov/landsat8.php

8. Космический аппарат «Ресурс-П» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов, А.И. Бакланов, В.М. Федоров, М.В. Новиков // Геоматика. 2010. № 4. С. 23–26.

УДК 528.88

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ЗОНЫ ПО ДИНАМИКЕ ТРЕНДОВ NDVI – МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР РАСТИТЕЛЬНОСТИ СУШИ

А. П. Шевырногов, А. А. Ларько
Институт биофизики Сибирского отделения РАН
e-mail: ap_42@mail.ru
e-mail: lantar@inbox.ru

QUASISTATIONARY AREAS OF NDVI TREND DYNAMICS – A POWERFUL TOOL FOR STUDY OF LAND VEGETATION SPATIAL STRUCTURE

A. P. Shevyrnogov, A. A. Larko
Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
e-mail: ap_42@mail.ru
e-mail: lantar@inbox.ru

В работе показана возможность мониторинга динамики растительности Земли на основе анализа временных рядов спутниковых данных. Развитый авторами подход с применением метода декомпозиции STL и скользящей дисперсии позволил выявить границы различных природных зон и неоднородностей внутри их по изменчивости трендов NDVI.

Ключевые слова: NDVI, тренды, нелинейные тренды, спутниковые данные, ДЗЗ, растительность.

Введение

Изучение и понимание глобальных процессов, протекающих на планете Земля, является важнейшей задачей. В последние десятилетия на основе использования спутниковой информации накоплен большой фактологический материал по динамике оптических спектральных характеристик поверхности суши.

Развитие спутниковых измерительных технологий и новых методов обработки и интерпретации информации обеспечивает проведение адекватных масштабам Земли исследований земной поверхности. Эта адекватность включает в себя адекватность масштабов земных объектов масштабам проводимых спутниковых измерений, не ограниченных ни широтой, ни долготой изучаемых объектов. Вторым важнейшим качеством является адекватность применяемых технологий скоростям процессов на Земле. Эту сторону изучения Земли обеспечивает многолетняя непрерывность спутниковых измерений на практически всех широтах.

Эффективность такого подхода к изучению природных комплексов была показана авторами в публикациях Advances in Space Research по применению методов выявления квазистационарных зон на поверхности Мирового океана [1]. Такой подход позволил с помощью спутниковых измерений выявить различные типы динамики фитопигментов и гидрологической структуры океана.

Предлагаемый подход для изучения растительности суши обладает некоторыми сходными с опубликованными ранее методами, несмотря на различную природу наземных и водных экосистем.

Приводимые в работе результаты основаны на обработке спутниковой информации с 1981 по 2006 г. Так как одним из наиболее интересных и важных параметров экосистем является их динамика, и в особенности – тренды, то именно они были выбраны для анализа пространственных структур растительности.

Методы и данные

В качестве показателя развития наземных экосистем был выбран нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI). Данные AVHRR/NOAA GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) представляют собой улучшенную версию данных AVHRR, с корректировкой воздействия геометрии, аэрозолей и других эффектов, не связанных с изменениями вегетации. Данные доступны в виде 16-дневных композитных изображений с разрешением 8-км (на линии экватора), масштаб глобальный.

Методом для декомпозиции временных рядов был выбран STL (Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess) – процедура сезонно трендовой декомпозиции, основанная на Loess. Метод STL основан на фильтрации исходных данных для разложения сезонных временных рядов на три компоненты: сезонную, трендовую и остаточную (шум): Di = Ti + Si + Ni, где D – значения временного ряда; T – Трендовая составляющая ряда; S – сезонная составляющая ряда; N – остаточная составляющая ряда; i – шаг по времени.

Сущность метода состоит в последовательном применении к данным временного ряда Loess-сглаживаний (Loesssmoother) [2–6].

Для выявления квазистационарных зон использовался метод скользящего окна дисперсии (по пространству и времени). Для каждой точки изображения строились окна (различной ширины), внутри которых рассчитывалась дисперсия по пространству и по времени (рис. 1) [1].

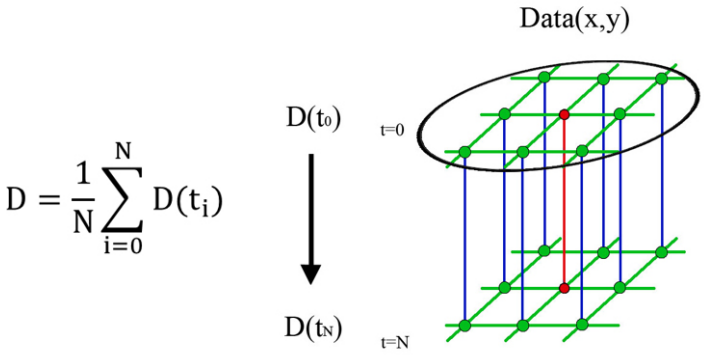


Рис. 1. Метод построения квазистационарных зон.
D – дисперсия; x, y – координаты точки; t – время

Результаты и обсуждение

Первые же результаты показали ярко выраженную неоднородность дисперсий нелинейных трендов выбранных участков земной поверхности, соответствующих различным природным комплексам (рис. 2). Различные масштабы временного и пространственного окна выделяют различные особенности наземной растительности.

Также эффективным средством выделения особенностей пространственной структуры растительности являются методы нормировки исходной информации (рис. 3). На рисунке выделяются зоны с большими отклонениями в динамике (внутри природных комплексов, показанных на рис. 2).

Таким образом, имея одни и те же исходные спутниковые данные, мы получили мощный инструмент анализа пространственного распределения и динамики наземной растительности. Такой подход дает большие возможности для получения фундаментальных знаний о функционировании биосферы – глобальное потепление, движение границ вечной мерзлоты, глобальный газообмен и т. д. Он может использоваться для практического применения в различных областях деятельности человека: лесное хозяйство, экология, сельское хозяйство и т. д.

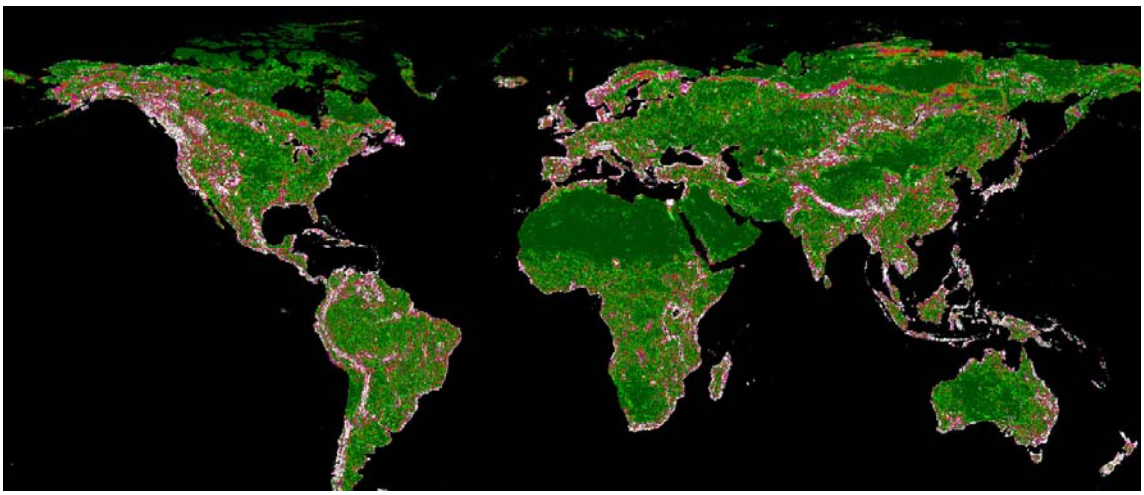


Рис. 2. Неоднородность дисперсий нелинейных трендов растительности суши, отражающая границы различных природных комплексов

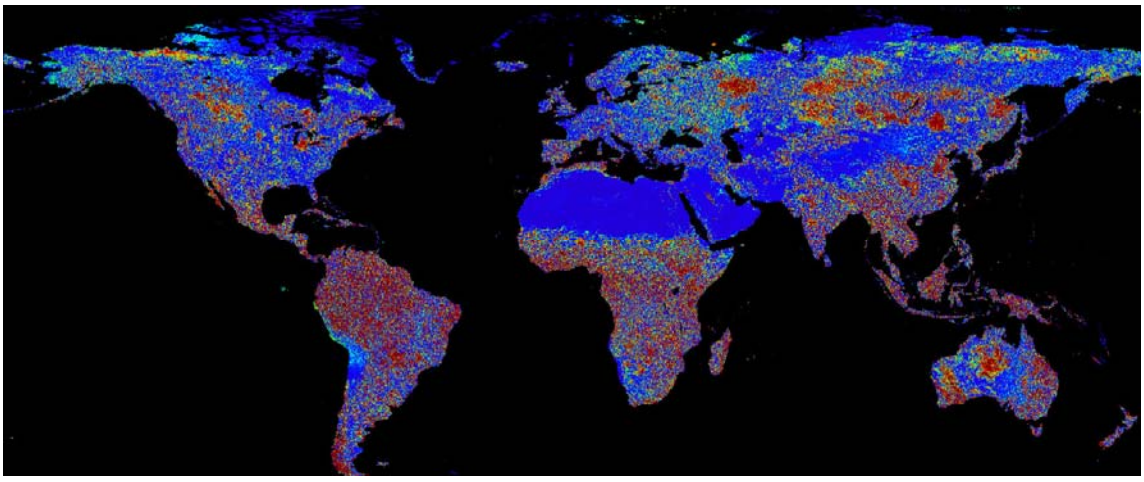


Рис. 3. Неоднородность дисперсий нелинейных трендов растительности суши, нормированных относительно начальных значений

Список литературы

1. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentra-tion in the world ocean as observed satellite data // Advances in Space Research. 1996. Volume 18. Issue 7. P. 129–132.

2. Cao M., Prince S.D., Small J., Goetz S.J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000 // Ecosystems. 2004. Vol. 7. P. 233–242.

3. Hüttich C., Herold M., Schmullius C., Egorov V., Bartalev S.A. SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998-2005 as indicators of recent land cover change processes in northern Eurasia // Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover. 2006. P. 336–344.

4. Zhao M., Heinsch F.A., Nemani R.R., Running S.W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 95. P. 164–176.

5. Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // Journal of Official Statistics. 1990. Vol. 6. P. 3–73.

6. Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П. Нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности юга Красноярского края по спутниковым данным: методы и подходы // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 106–110.

7. Шевырногов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С. Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // Исследование Земли из космоса. 2012. № 6. С. 77–87.

УДК 528.88

АНАЛИЗ СЛУЧАЕВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СМЕРЧЕЙ В ЛЕСНОЙ ЗОНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. Н. Шихов, А. В. Тарасов
ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
e-mail: and3131@inbox.ru

Предложена методика картографирования случаев смерчей в лесной зоне по спутниковым снимкам LANDSAT и карте изменений лесного покрова Земли Global Forest Change Map. Методика основана на выявлении узких и протяженных сплошных ветровалов, с последующей их верификацией по снимкам высокого разрешения, полученным с открытых картографических сервисов. С применением данной методики выявлено 93 случая смерчей, прошедших на Европейской территории России в период с 2001 по 2015 г.

Ключевые слова: смерчи, ветровалы, данные дистанционного зондирования Земли, снимки LANDSAT, Global Forest Change Map.

Введение

На фоне происходящих климатических изменений представляет большой интерес возможность роста повторяемости такого редкого и опасного природного явления, как воздушные смерчи (торнадо). По причине своего локального характера, смерчи крайне редко фиксируются метеостанциями. Информация о факте прохождения смерча чаще поступает от очевидцев явления, а также на основе анализа нанесенного ущерба. Репрезентативных оценок повторяемости смерчей в России не существует, поскольку частота их наблюдения напрямую зависит от плотности населения.

Первая систематизация сведений о случаях смерчей на территории бывшего СССР была выполнена А.И. Снитковским в 1987 г. [1]. Им были проанализированы данные о 248 случаях смерчей (начиная с XIX века) и определена вероятность появления смерча в расчете на 1000 км^2 территории. База данных, созданная А.И. Снитковским, была дополнена при разработке рекомендаций по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии [2]. В данном документе приведен каталог случаев смерчей на территории России за период 1987–2001 гг. (всего 103 случая). На основе обобщения данных многолетних наблюдений было проведено зонирование территории бывшего СССР по вероятности возникновения смерча и создана карта-схема районирования в масштабе 1:50 000 000 [3]. Однако работы по ее уточнению с учетом актуальных данных не проводились.

Одним из видов ущерба от смерчей являются ветровалы в лесных массивах, мониторинг и ретроспективный анализ которых проводится на основе снимков со спутников серии LANDSAT [4, 5]. В регионах с высокой лесистостью и низкой плотностью населения данные о ветровальных нарушениях лесного покрова являются единственным доступным источником получения информации о случаях смерчей. По данным о ветровалах может быть определена траектория смерча, ширина воронки, направление вращения, сделаны предположения об интенсивности смерча. Основными преимуществами такого подхода является объективность и независимость получаемых оценок от плотности населения. Смерчевые ветровалы в большинстве случаев имеют явные отличительные признаки, позволяющие отделить их от ветровалов, вызванных шквалами [4, 6]. Однако задача выделения ветровалов, вызванных именно смерчами, ранее не ставилась.

В Северной Америке смерчи ежегодно уничтожают тысячи гектаров леса, по этой причине изучение вызванных ими нарушений лесного покрова весьма актуально [6]. Национальная служба погоды США (National weather service) ведет систематический сбор данных обо всех случаях смерчей и документирование нанесенного ими ущерба, в том числе и ущерба для лесного хозяйства. Это позволяет получить объективные оценки повторяемости смерчей. С середины 2000-х гг. для оперативного определения траекторий смерчей в США используются также снимки прибора MODIS [7]. Таким образом, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляют ценный информационный ресурс для изучения случаев смерчей в лесной зоне. Для территории России это особенно актуально, в связи с низкой плотностью населения и отсутствием систематизированной информации о частоте возникновения смерчей.

Анализ случаев смерчей в лесной зоне Европейской части России

В настоящей статье представлены результаты ретроспективного анализа случаев возникновения смерчей в лесной зоне на основе анализа многолетних рядов данных ДЗЗ LANDSAT и Terra/Aqua MODIS, а также карты изменений лесного покрова Земли Global Forest Change на территории лесной зоны Европейской части России.

Проект Global Forest Change был реализован группой специалистов Мэрилендского университета. На основе анализа временного ряда снимков LANDSAT (всего было обработано 654 178 сцен) были получены данные о лесопокрытой площади по состоянию на 2000 и 2014 гг., участках нарушений лесного покрова (forest loss) и лесовосстановления (forest gain) в глобальном масштабе, с пространственным разрешением 30 м [8].

Данные Global Forest Change находятся в свободном доступе в Интернете. Данные о нарушениях лесного покрова, классифицированные по годам (Forest Loss Year), предоставляются в виде целочисленных растров в формате GeoTIFF. В ряде случаев год появления нарушения определен неверно, что обусловлено влиянием облачности, а также тем, что в проекте использованы только сцены LANDSAT, полученные в течение вегетационного периода.

В проекте Global Forest Change не проводилось определение причин нарушений лесного покрова. Однако использование геометрических признаков и дополнительных данных (включая исходные снимки LANDSAT, а также снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов) позволяет достаточно надежно выделить ветровалы, вызванные прохождением смерчей, среди других типов нарушений. Такими характерными признаками смерчевых ветровалов являются значительная протяженность (длина, как правило, превышает ширину более чем в 10 раз), сплошное повреждение древостоя и вихревой характер повала деревьев. Характер повала деревьев и направление вращения смерча определялись по высокодетальным спутниковым снимкам, полученным с открытых картографических сервисов. Участки ветровальных нарушений, удовлетворяющие всем перечисленным критериям, были классифицированы как смерчевые ветровалы.

Методика идентификации смерчевых ветровалов была реализована для территории лесной зоны Европейской части России. Всего на данной территории выявлено 93 смерчевых ветровала, произошедших в период 2001–2015 гг. Их пространственное распределение показано на рис. 1. В двух случаях значительная ширина ветровала (более 1000 м) не позволяет утверждать, что причиной ветровала был именно смерч, а не сильный шквал (но остальные признаки указывают на смерчевую природу ветровала).

Определение дат прохождения смерчей производилось на основе совместного анализа спутниковых снимков MODIS, LANDSAT, данных реанализа, а также сведений из Европейской базы данных опасных явлений погоды ESWD [9]. Наибольшее число

случаев смерчей зафиксировано в 2007 и 2009 гг. (рис. 2, *а*). В эти годы наблюдалась активная циклоническая деятельность над Европейской частью России в теплый период. В то же время в наиболее жаркое лето 2010 г., когда над Европейской частью России господствовал блокирующий антициклон, зафиксировано только 6 случаев смерчей (из них 4 – в течение одного дня 12.06.2010 г.).

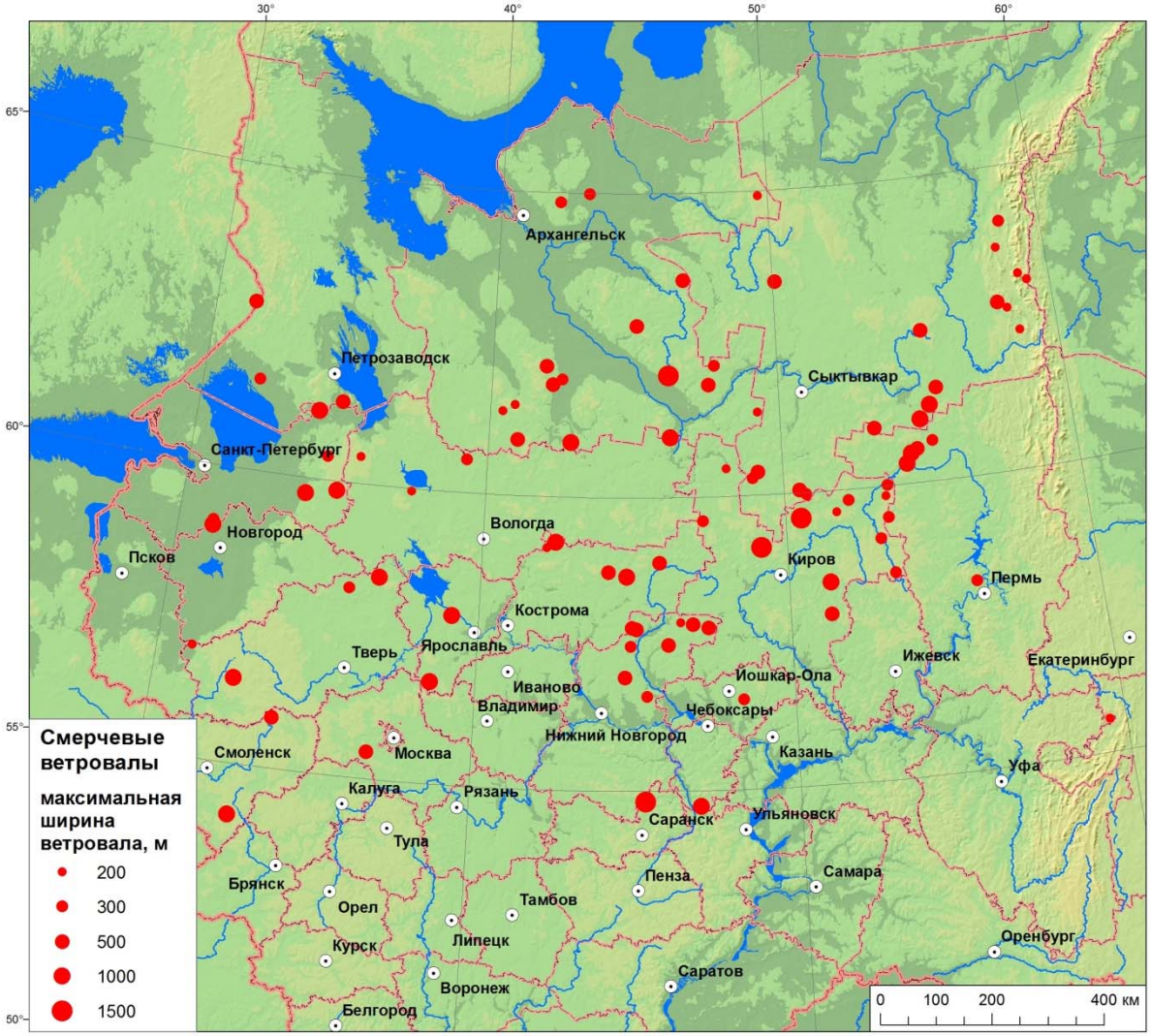


Рис. 1. Пространственное распределение смерчевых ветровалов в лесной зоне Европейской части России

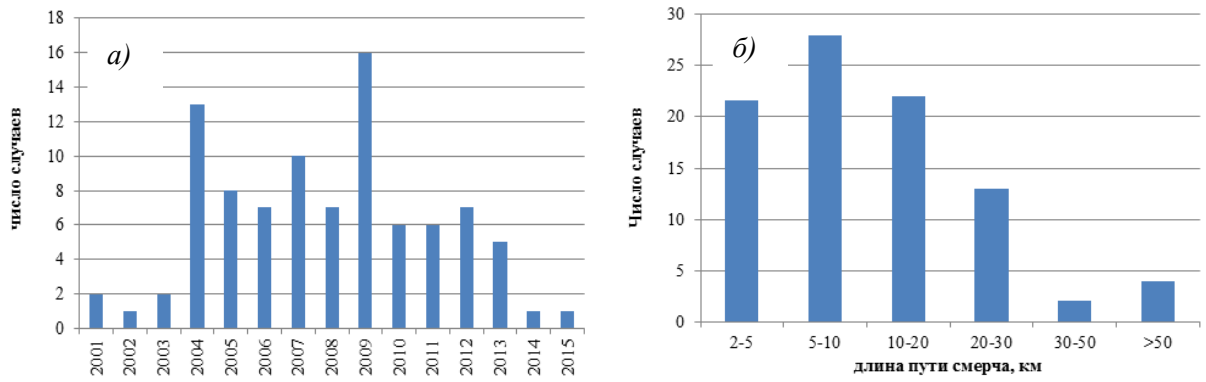


Рис. 2. Распределение выявленных случаев смерчей по годам (а) и по длине пути (б)

Большинство выявленных смерчевых ветровалов характеризуются протяженностью от 5 до 10 км (рис. 2, *б*) и максимальной шириной 100–200 м. У наиболее сильных смерчей длина пути превышала 50 км, а максимальная ширина смерчевых ветровалов достигала 1000 м и более. Наибольшую длину пути (80 км) имел смерч, прошедший в ночь с 7 на 8 августа 2012 г. через территорию Ленинградской и Вологодской областей. Наибольшей шириной полосы разрушений (до 1600 м) отличался смерч, прошедший 26.06.2008 г. через южные территории Архангельской области.

Заключение

Результаты идентификации смерчевых ветровалов в лесной зоне Европейской части России по данным Global Forest Change и многолетним рядам снимков LANDSAT показывают, что на их основе возможно получение объективной оценки пространственно-временного распределения случаев смерчей (в пределах лесной зоны). С применением предлагаемой методики планируется изучить пространственно-временное распределение смерчевых ветровалов в пределах всей лесной зоны Европейской части России и выполнить районирование изучаемой территории по повторяемости и возможной интенсивности смерчей. Кроме того, использование данных ДЗЗ позволит выявить приуроченность возникновения смерчей к элементам рельефа, ландшафтной структуры территории и типам землепользования.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00245-а).

Список литературы

1. Снитковский А.И. Смерчи над территорией СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.

2. Руководство по безопасности РБ-022-01. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. М.: Госатомнадзор РФ, 2001. 29 с.

3. Брюхань Ф.Ф., Ляхов М.Е., Погребняк В.Н. Смерчеопасные зоны в СССР и размещение атомных станций // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 1. С. 40–48.

4. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // Лесоведение. 2014. № 6. С. 16–24.

5. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–30.

6. Peterson C.J. Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change // Science of the Total Environment. 2000. Vol. 262. P. 287–311.

7. Jedlovec G.J., Nair U. and Haines S.L. Detection of storm damage tracks with EOS data // Weather and Forecasting. 2006. Vol. 21. P. 249–267.

8. Hansen M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova,1.A. Tyukavina, D. Thau, S.V. Stehman, S.J. Goetz, T.R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C.O. Justice and J.R.G. Townshend. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // SCIENCE. 2013. Vol. 342. P. 850–853.

9. European severe weather database. URL: http://www.eswd.eu/

УДК 528.8:574

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДОВ КУЗБАССА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО И СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Т. В. Ярославцева[(1)], В. Ф. Рапута[(2)]
[(1)]ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека»
e-mail: tani-ta@list.ru
[(2)]Институт вычислительной математики математической геофизики СО РАН
e-mail: raputa@sscc.ru

EVALUATION OF POLLUTION OF KUZBASS CITIES ACCORDING TO DATA OF TERRESTRIAL AND SATELLITE SNOW COVER MONITORING

T. V. Yaroslavtseva[(1)], V. F. Raputa[(2)]
[(1)]FBIS Institute of Hygiene of Federal service on customers' rights protection and human well-being surveillance, Novosibirsk
e-mail: tani-ta@list.ru
[(2)]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
e-mail: raputa@sscc.ru

Обсуждаются результаты мониторинга загрязнения снежного покрова гг. Кемерово и Новокузнецка взвешенными веществами. С использованием зимних спутниковых снимков, полученных в панхроматическом диапазоне, в соответствии с дискретной шкалой оттенков серого цвета, проиндексирована плотность тона изображения очагов загрязнения. Для ряда зимних сезонов проведено сопоставление результатов компьютерной обработки космоснимков с результатами наземного мониторинга загрязнения снежного покрова этих городов. Установлено наличие корреляционных связей между оттенками серого цвета и содержанием загрязняющих примесей в пробах снеготалой воды.

Ключевые слова: пылевое загрязнение, атмосфера, снежный покров, спутниковые снимки, корреляционный анализ.

Введение

В зимнее время значительные территории городов покрыты снегом, и вследствие этого основные источники взвешенных веществ находятся над поверхностью земли и их выбросы носят организованный характер. На спутниковых снимках городов отчетливо проявляется осаждение на снежный покров аэрозолей антропогенного происхождения. На них участки загрязненного снега затемнены и отражают атмосферную динамику процессов переноса пыли, сажи от источников атмосферных выбросов [1, 2].

Регулярный контроль загрязнения атмосферы городов проводится на стационарных постах Государственной службы наблюдений [3]. Поэтому при отборе проб снега по территории города следует отдавать предпочтение отбору именно вблизи постов, что в дальнейшем создаёт возможности выявления корреляционных связей межсредового загрязнения [4, 5]. В последующей перспективе это позволит проводить оценку длительного загрязнения атмосферного воздуха территорий города определёнными примесями по спутниковым снимкам.

Мониторинг загрязнения снежного покрова городов

Отбор проб снега проводился вблизи городских постов контроля загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово в конце зимних сезонов 2009–2011 гг. и в

г. Новокузнецке в начале марта 2014 г. Схема расположения стационарных пунктов наблюдения за загрязнением (ПНЗ) атмосферного воздуха представлена на рис. 1.

Пробы отбирались с помощью пластмассовой трубы на открытых площадках неповреждённого снежного покрова на всю глубину. Анализ снежных проб выполняли в лаборатории после их топления по схемам в зависимости от природы определяемых компонентов [6].

Результаты лабораторных исследований твёрдого осадка в пробах снеготалой воды приведены в таблице.

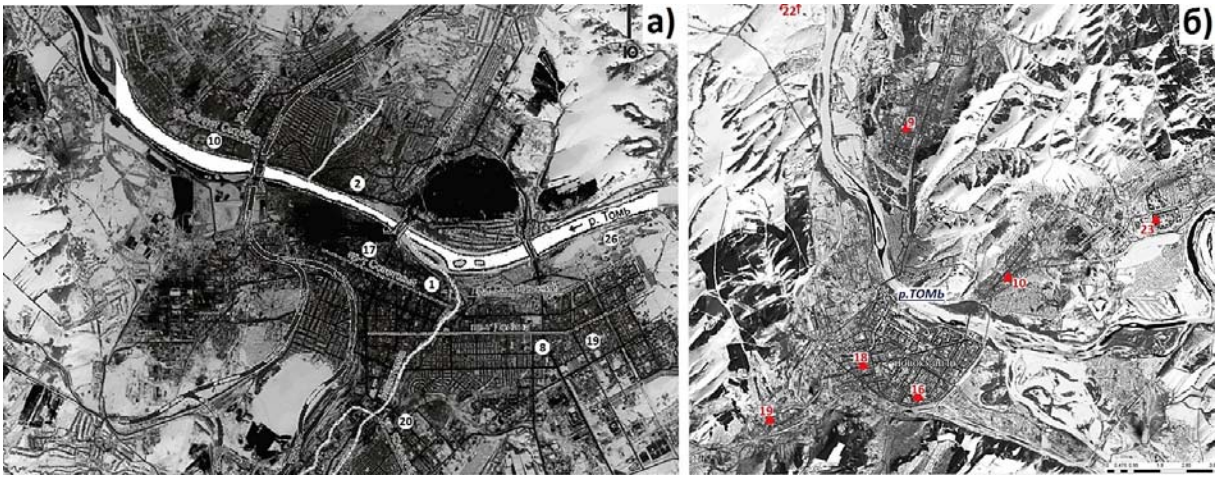


Рис. 1. Схемы размещения постов контроля атмосферного воздуха на оцифрованных спутниковых снимках г. Кемерово от 26.03.2006 г. (а) и г. Новокузнецка от 5.02.2015 г. (б)

Таблица

Концентрация твёрдого осадка (г/л) в пробах снеготалой воды на ПНЗ гг. Кемерово и Новокузнецка [7]

КЕМЕРОВО	Осадок (г/л)			НОВОКУЗНЕЦК	Осадок (г/л)
№ поста	2008/09 г.	2009/10 г.	2010/11 г.	№ поста	2013/14 г.
1	0,194	0,109	0,097	9	1,46
2	0,139	0,101	0,135	10	0,684
8	0,120	0,093	0,095	16	0,603
10	0,086	0,078	0,112	18	0,835
17	–	0,188	0,144	19	0,299
19	0,074	0,050	0,029	22	0,048
20	0,112	0,051	0,068	23	0,381
26	0,056	0,045	0,043	–	–

Анализ спутниковых снимков

В работе использовались снимки ИСЗ, полученные в панхроматическом диапазоне (Landsat, digitalglobe.com). В результате обработки снимка г. Кемерово от 26 марта 2006 г., заключающейся в дискретизации шкалы оттенков серого цвета, было получено оцифрованное изображение городских территорий (рис. 1, *а*). Аналогичная процедура была выполнена со спутниковым снимком г. Новокузнецка от 5.02.2015 г. (рис. 1, *б*).

Это позволило выделить ореолы пылевых выпадений примесей от основных очагов загрязнения города (коксохимические и металлургические заводы, ТЭЦ, крупные автомагистрали). Преобладающий вынос примесей происходит в направлениях на север и северо-восток от источников.

Анализ таблицы и рис. 1 показывает, что значения рассматриваемых параметров загрязнения от поста к посту меняются вполне согласованно в значительных диапазонах изменения концентрации осадков в снеге и тональности территорий города на спутниковом снимке.

Результаты и обсуждение

Численная обработка результатов наземных и спутниковых исследований загрязнения снежного покрова гг. Кемерово и Новокузнецка проводилась в рамках линейного корреляционного анализа.

На рис. 2 представлены корреляционные зависимости между осадком пыли в пробах снега и тонами серого цвета на спутниковом снимке для зимних сезонов 2008–2011 гг. на ПНЗ г. Кемерово. По вертикальной оси представлена интенсивность тона, по горизонтальной оси концентрация осадка (г/л) в пробе снеготалой воды. Измеренные значения тона и концентраций на постах указаны квадратиками.

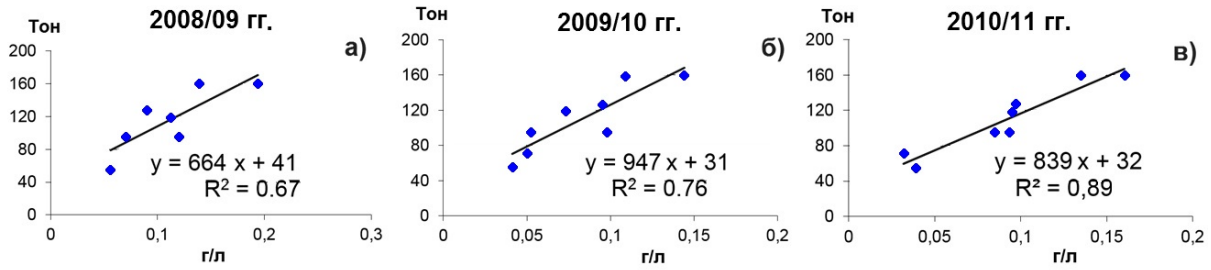


Рис. 2. Линейно-корреляционные зависимости между оттенками серого цвета на космоснимке г. Кемерово от 26.03.2006 г. и твёрдыми осадками в пробах снега для зимних сезонов: 2008–2009 гг. (а), 2009–2010 гг. (б), 2010–2011 гг. (в)

Максимальные значения тона и осадка в снеге достигаются для ПНЗ № 1, 2, 17, минимальные – для ПНЗ № 19, 26. Следует отметить, что ПНЗ № 1 расположен в центре города. Пост № 2 находится сравнительно недалеко от коксохимического завода и на направлении преобладающего от него сноса загрязняющих примесей через р. Томь. Отметим также, что пересечение всех трёх линий регрессий на рис. 2 происходит несколько выше начала координат. Этот факт может означать, что сравнительно небольшая по массе часть мелкодисперсных фракций пыли при топлении снеговых проб перешла в растворённое состояние или не зафиксировалась в снежном покрове. В целом для всех трёх зимних сезонов уровень согласия измеренных концентраций осадка в снеготалой воде с данными тональности цвета на спутниковом снимке вполне удовлетворительный.

На рис. 3, *а* представлена линейная корреляционная связь между осадком пыли в пробах снега и тонами серого цвета на спутниковом снимке для зимнего сезона 2013–2014 г. на ПНЗ г. Новокузнецка. На рис. 3, *б* приведена корреляционная связь между осадком пыли в пробах снега и взвешенными веществами, измеренными на ПНЗ в атмосферном воздухе города.

Полученные результаты указывают на возможность создания взаимно дополнительных систем наземного и дистанционного мониторинга и пересчета данных спутниковых наблюдений на загрязнение снежного покрова территорий рассматриваемых городов.

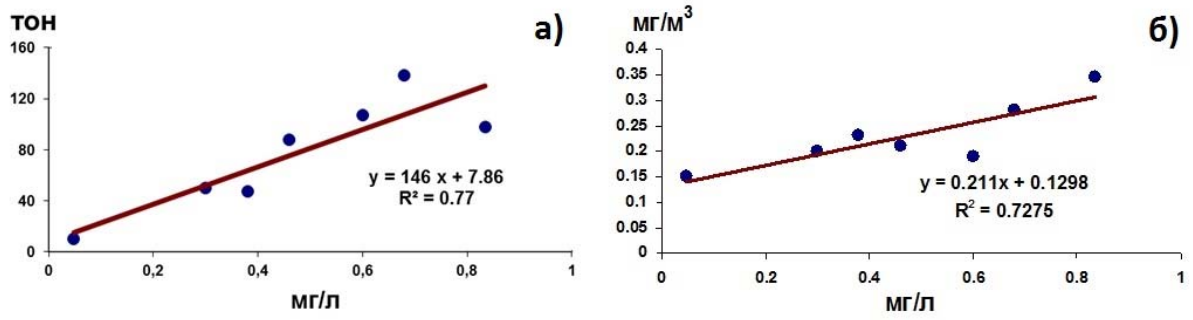


Рис. 3. Линейно-корреляционная связь между оттенками серого цвета на космоснимке от 5.02.2015 г. и осадками в пробах снега для зимнего сезона 2013/14 г. (а), зависимость между среднезимними концентрациями взвешенных веществ и осадками в пробах снега на ПНЗ г. Новокузнецка (б)

Заключение

На примере гг. Кемерово и Новокузнецка показано существование линейных корреляционных связей между содержаниями осадков в пробах снега и тональностями серого цвета на зимних спутниковых снимках территорий этих городов. Для рассмотренных зимних сезонов существует определённая стабильность размещения и функционирования основных источников выбросов взвешенных веществ в атмосферу городов. Проведённое исследование показало возможность создания взаимно дополнительных систем мониторинга и получения на их основе более детальной пространственной оценки состояния длительного загрязнения снежного покрова города. Использование результатов сопряжённых исследований межсредового загрязнения атмосферного воздуха и снежного покрова на постах Росгидромета гг. Кемерово и Новокузнецка позволит проводить оценки содержания в атмосфере взвешенных веществ по спутниковым снимкам и соответственно определять ингаляционные риски здоровью городского населения.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН № 16.

Список литературы

1. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94–106.

2. Василевич М.И., Щапов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследования при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 50–60.

3. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 199 с.

4. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю. Сравнительная оценка состояния длительного загрязнения атмосферы и снегового покрова г. Новосибирска на сети стационарных постов Гидрометеослужбы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 499–504.

5. Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Закономерности длительного загрязнения атмосферы и снежного покрова г. Новосибирска // Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 1. С. 28–33.

6. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 182 с.

7. Загрязнение снегового покрова полициклическими ароматическими углеводородами и токсичными элементами на примере г. Новокузнецка / Н.В. Журавлёва, Р.Р. Потокина, З.Р. Исмагилов, Е.Р. Хабибулина // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. № 5. С. 445–454.

СПИСОК АВТОРОВ

Авласко П. В. 59, 62, 66, 70
Акимов Н. П. 46
Артёмова К. С. 204
Асмарян Ш. 189
Аюржанаев А. А. 208
Бадаев К. В. 46
Балашов И. В. 24
Бекренёв О. В. 3
Белов В. В. 42
Белоносов А. Ю. 125
Белоусова Д. А. 50, 117
Бисов А. А. 62, 66, 70
Борисов Д. В. 125
Ботвич И. Ю. 212
Брежнев Р. В. 54
Бронов С. А. 59, 62, 66, 70
Бурцев М. А. 24
Бучнев А. А. 7, 11
Бушкина А. В. 204
Варламова Е. В. 216
Васильева О. А. 220
Вахнин М. Г. 226
Владимиров В. М. 74
Власенко О. А. 277
Волков Н. А. 145
Воронина Н. Н. 129
Гектин Ю. М. 46
Гиниятуллина О. Л. 230
Горбачева Е. Н. 78
Григорец Е. А. 234
Гук А. П. 14, 82
Дамов М. В. 170
Данилин И.М. 328
Данилова И. В. 262
Дегтярев А. О. 204
Дементьев А. О. 17
Дмитриев Е. В. 17
Домрачев С. Ю. 3
Домрачева М. С. 3
Доровская М. И. 70
Дубровская О. А. 295
Дунаева Е. А. 242
Евстратова Л. Г. 14, 82
Есин Р. В. 59, 62, 66, 70
Ефремов В. Ю. 24
Женибекова А. Б. 85
Завьялова Д. Ю. 295
Зайцев А. А. 46
Заречнева А. И. 339
Зеньков И. В. 246, 252
Зотин А. Г. 133, 137, 170
Имашев С. А. 34
Инюшина Н. В. 129
Исаев В. А. 141
Ищук И. Н. 145, 149
Кабанов Д. М. 308, 312
Картушинский А. В. 154
Качаев А. В. 89
Кашкин В. Б. 74, 258
Кашницкий А. В. 24
Ким П. А. 7
Киселев О. И. 158
Кихтенко В. А. 196
Князькин Ю. М. 92
Кобец Д. А. 24
Козодеров В. В. 17
Корец М. А. 262
Коробейников П. А. 95
Кочергин Г. А. 113, 288
Кочнев В. А. 162
Крашенинникова Ю. С. 24
Кудря Н. О. 267
Кудрявцев А. Е. 125
Кулик Е. Н. 220, 320
Куприянов М. А. 288
Курако М. А. 267
Куулар Х. Б. 271
Лагашкина В. С. 204
Ларько А. А. 343
Леженин А. А. 273
Лупян Е. А. 24
Маглинец Ю. А. 103, 277
Мазуров А. А. 24
Мальцев Е. А. 167
Мамаш Е. А. 196
Мамчур Н. Л. 129
Мараескул А. В. 59, 62, 66, 70
Маргарян В. Г. 281
Мартынов С. И. 3
Матузко А. К. 99
Мельников П. В. 28
Миков Л. С. 230
Михайлов М. И. 186
Мищенко Д. Д. 62, 66, 70
Моисеева Н. А. 286
Молокова Н. В. 95
Мурадян В. 189
Муратов И. Н. 288
Мячина К. В. 291
Назиров Р. Р. 24

Никитин Р. М. 62, 66, 70
Никулин Н. А. 59, 62, 66, 70
Новикова О. Г. 295
Одинцов Р. В. 258
Окишев С. С. 50
Осипенко А. В. 59
Осипенко О. В. 70
Пахирка А. И. 133, 137, 170
Пермитина Л. И. 234
Пестунов И. А. 28, 295
Полищук Ю. М. 288
Пономарев Е. И. 38, 193
Попова О. А. 174
Постнов К. В. 149
Протасов К. С. 59, 70
Прошин А. А. 24
Пылаев М. А. 145
Пятаева А. В. 178
Пяткин В. П. 7, 11
Раевич К. В. 103
Рапута В. Ф. 273, 350
Рогалев А. Н. 300
Родионов В. В. 145
Ромасько В. Ю. 304
Рублева Т. В. 258
Ружилов В. Е. 92
Рыжаков А. В. 46
Рылов С. А. 28, 295
Савчина Е. И. 133
Сагателян А. 189
Сакерин С. М. 308, 312
Сакиркина М. А. 316
Салов Г. И. 7
Саринова А. Ж. 182
Сахарова Е. Ю. 320
Свердлик Л. Г. 34
Селютина Ю. В. 277
Сенченко Я. И. 74
Сидорова В. С. 109
Симонов К. В. 267
Синявский Ю. Н. 295
Скачкова А. С. 78
Сладких Л. А. 320
Смелянский М. Б. 46
Согомонян В. В. 145
Содномов Б. В. 208
Соколов А. А. 17
Соколова А. С. 95
Соловьев В. С. 216, 335
Сорокин А. В. 186
Степанов Е. А. 149
Сутырина Е. Н. 324
Сычугов И. Г. 24
Табенков А. В. 3
Тарасенков М. В. 42
Тарасов А. В. 346
Тепаносян Г. 189
Тимощук В. С. 70
Ткачева А. А. 170, 328
Тогачев А. А. 113
Толпин В. А. 24
Толстихин П. В. 92
Томилина А. И. 137
Томшин О. А. 335
Турчинович Ю. С. 312
Тутатчиков В. С. 158
Уваров И. А. 24
Ульянченко М. Н. 59, 62, 66, 70
Усатая Ю. О. 193
Фёдоров А. Б. 204
Федотова Е. В. 339
Филимонов А. М. 149
Фирчук Ж. В. 117
Флитман Е. В. 24
Фомин С. В. 186
Фролов А. Г. 46
Хамедов В. А. 288
Харук В. И. 38
Царегородцев А. Л. 113
Цибульский Г. М. 200
Цыдыпов Б. З. 208
Чубаров Д. Л. 196
Шабанов В. Ю. 196
Швецов Е. Г. 193
Шевырногов А. П. 212, 343
Шихов А. Н. 346
Шишикин А. С. 262
Шукилович А. Ю. 200
Энгель М. В. 42
Ярославцева Т. В. 273, 350
Ященко А. С. 121

Danilova I. V. 238
Korets M. A. 238
Ryzhkova V. A. 238

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 3

Глобальная система мониторинга Земли с российских космических аппаратов серии «МЕТЕОР-М» на базе станций приема метрового диапазона 3
Бекренёв О. В., Домрачев С. Ю., Домрачева М. С., Мартынов С. И., Табенков А. В.

Макет облачного web-сервиса по выделению линейных и кольцевых структур на космических изображениях 7
Бучнев А. А., Ким П. А., Пяткин В. П., Салов Г. И.

Нечеткие кластеры с объемными прототипами в тематической обработке данных дистанционного зондирования Земли 11
Бучнев А. А., Пяткин В. П.

Новый статистический подход к распознаванию лесных массивов 14
Гук А. П., Евстратова Л. Г.

Распознавание породного и возрастного состава древостоев с использованием алгоритмов на основе самокорректирующихся кодов 17
Дмитриев Е. В., Козодеров В. В., Дементьев А. О., Соколов А. А.

Новые возможности технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга 24
Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Кобец Д. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Флитман Е. В.

Экспериментальное сравнение методов классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения по спектральным и пространственным признакам 28
Мельников П. В., Пестунов И. А., Рылов С. А.

Диагностирование аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности 34
Свердлик Л. Г., Имашев С. А.

Таежные леса в меняющемся климате: динамика лесных пожаров 38
Харук В. И., Пономарев Е. И.

Программные инструменты атмосферной коррекции спутниковых данных на основе интеграции информационных и алгоритмических ресурсов 42
Энгель М. В., Белов В. В., Тарасенков М. В.

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» 46

Перспективный ИК-радиометр для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на территории России 46
Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Зайцев А. А., Смелянский М. Б., Рыжаков А. В., Фролов А. Г.

Разработка архитектуры программного комплекса для расчета и обработки полевых данных электроразведки 50
Белоусова Д. А., Окишев С. С.

Активная система мониторинга площадных пространственных объектов по данным ДЗЗ 54
Брежнев Р. В.

Аварийные режимы работы электродвигателей исполнительных приводов для космических аппаратов 59
Бронов С. А., Никулин Н. А., Мараескул А. В., Авласко П. В., Есин Р. В., Ульянченко М. Н., Осипенко А. В., Протасов К. С.

Исполнительные электроприводы космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли 62
Бронов С. А., Никулин Н. А., Мараескул А. В., Авласко П. В., Мищенко Д. Д., Никитин Р. М., Бисов А. А., Есин Р. В., Ульянченко М. Н.

Система моделирования прецизионных динамических объектов 66
Бронов С. А., Никулин Н. А., Мараескул А. В., Авласко П. В., Мищенко Д. Д., Никитин Р. М., Бисов А. А., Есин Р. В., Ульянченко М. Н.

Математические модели электромеханических устройств для космических аппаратов 70
Бронов С. А., Никулин Н. А., Мараескул А. В., Авласко П. В., Мищенко Д. Д., Никитин Р. М., Бисов А. А., Есин Р. В., Ульянченко М. Н., Доровская М. И., Тимощук В. С., Протасов К. С., Осипенко О. В.

Модернизация приёмника радиолокационной станции вертикального зондирования атмосферы 74
Владимиров В. М., Кашкин В. Б., Сенченко Я. И.

Геоаналитика.Агро: разработка сервиса комплексной оценки состояния и агроэкологических условий произрастания сельскохозяйственных культур с использованием данных дистанционного зондирования Земли и информации, получаемой с сети стационарных метеостанций 78
Горбачева Е. Н., Скачкова А. С.

Особенности обучения магистрантов и аспирантов по направлению «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» 82
Гук А. П., Евстратова Л. Г.

Формализация выбора способов изображения для элементов общегеографических и тематических карт в среде ГИС 85
Женибекова А. Б.

NOSQL-подход для разработки дендроклиматического банка данных 89
Качаев А. В.

Характеристики наземного комплекса приемной аппаратуры Сибирского регионального центра ДЗЗ Роскосмоса 92
Князькин Ю. М., Ружилов В. Е., Толстихин П. В.

Разработка программного модуля для интерпретации результатов электромагнитного зондирования геологической среды 95
Коробейников П. А., Соколова А. С., Молокова Н. В.

Возможности геоинформационных платформ для веб-публикации пространственных данных 99
Матузко А. К.

Онтология задач оценивания земель сельскохозяйственного назначения 103
Раевич К. В., Маглинец Ю. А.

Выбор размерности пространства спектральных признаков для кластерного алгоритма 109
Сидорова В. С.

Информационная система персонального мониторинга подвижных объектов с использованием спутниковых технологий 113
Тогачев А. А., Кочергин Г. А., Царегородцев А. Л.

Разработка модуля для расчета корреляции между электромагнитными параметрами горных пород геологического разреза и характером рельефа 117
Фирчук Ж. В., Белоусова Д. А.

Особенности обработки данных SMOS LEVEL 1C 121
Ященко А. С.

Секция «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» 125

Обработка космических снимков со спутника TERRA для дешифрирования нефтеперспективных геоструктур юга Западной Сибири 125
Белоносов А. Ю., Кудрявцев А. Е., Борисов Д. В.

Визуализация графических изображений морских прогностических данных по региону Черноморского бассейна на спутниковых картах 129
Воронина Н. Н., Инюшина Н. В., Мамчур Н. Л.

Применение инфракрасных данных для повышения визуального качества изображений 133
Зотин А. Г., Пахирка А. И., Савчина Е. И.

Адаптивный фильтр шумоподавления для статичных сцен в системах видеонаблюдения 137
Зотин А. Г., Пахирка А. И., Томилина А. И.

Использование программных средств с открытым исходным кодом в мониторинге экосистем и агроценозов 141
Исаев В. А.

Применение учебно-тренажерного комплекса подготовки специалистов беспилотной авиации в интересах автоматического обнаружения и распознавания объектов 145
Ищук И. Н., Родионов В. В., Волков Н. А., Пылаев М. А., Согомонян В. В.

Применение генетического алгоритма в задаче редукции кубоида инфракрасных изображений, полученных путем математического моделирования процессов теплообмена техногенных объектов 149
Ищук И. Н., Филимонов А. М., Постнов К. В., Степанов Е. А.

Градиентный метод обработки спутниковых данных для реализации численных моделей водных систем 154
Картушинский А. В.

Применение двумерного быстрого преобразования Фурье для цифровой обработки снимков дистанционного зондирования Земли 158
Киселев О. И., Тутатчиков В. С.

Модель источников магнитного поля ядра Земли, полученная в результате решения обратной задачи 162
Кочнев В. А.

Разработка технологии обнаружения объектов противопожарной вспашки по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли 167
Мальцев Е. А.

Повышение контраста изображений на основе метода RETINEX 170
Пахирка А. И., Зотин А. Г., Дамов М. В., Ткачева А. А.

Повышение точности представления и обработки данных дистанционного зондирования Земли 174
Попова О. А.

Сегментация областей задымления при раннем обнаружении дыма на открытых пространствах 178
Пятаева А. В.

Алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с использованием подготовительной обработки и учетом междиапазонной корреляции с потерями и без потерь 182
Саринова А. Ж.

Адаптивная модель взаимодействия сигналов навигационных спутников с лесным пологом с учетом анизотропных свойств древесины 186
Сорокин А. В., Фомин С. В., Михайлов М. И.

Использование метода линейного спектрального разделения для получения индикаторов деградации сельскохозяйственных земель 189
Тепаносян Г., Сагателян А., Асмарян Ш., Мурадян В.

Спутниковые данные применительно к анализу характеристик пожаров растительности 193
Усатая Ю. О., Пономарев Е. И., Швецов Е. Г.

Применение методов автоматической кластеризации для выявления промышленных тепловых источников в массиве термических точек 196
Шабанов В. Ю., Мамаш Е. А., Кихтенко В. А., Чубаров Д. Л.

Сегментация, управляемая целями 200
Шукилович А. Ю., Цибульский Г. М.

Секция «МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ» 204

Водородная дегазация Земли: регистрация со спутников и обнаружение на местности 204
Артёмова К. С., Бушкина А. В., Дегтярев А. О., Лагашкина В. С., Фёдоров А. Б.

Оценка трендов NDVI в Забайкалье по данным MODIS TERRA 208
Аюржанаев А. А., Содномов Б. В., Цыдыпов Б. З.

Изучение фенологической изменчивости растительности Красноярского края на основе спутниковых данных 212
Ботвич И. Ю., Шевырногов А. П.

Исследование вариаций индекса NDVI растительности Восточной Сибири по данным ДЗЗ 216
Варламова Е. В., Соловьев В. С.

Анализ динамики естественной и лесопарковой растительности по данным дистанционного зондирования 220
Васильева О. А., Кулик Е. Н.

Комплексный анализ геопространственных данных при изучении новейших тектонических процессов и перспектив нефтегазоносности севера Тимано-Печорской провинции 226
Вахнин М. Г.

Обработка данных SENTINEL-1A для решения задач мониторинга в горнопромышленных регионах 230
Гиниятуллина О. Л., Миков Л. С.

Использование российских данных ДЗЗ для изучения динамики восстановления эколого-ресурсного потенциала лесных регионов после воздействия пожаров 234
Григорец Е. А., Пермитина Л. И.

Classification and Estimation of Vegetation Cover Spatial Diversity Using Digital Elevation Model and Satellite Imagery 238
Danilova I. V., Ryzhkova V. A., Korets M. A.

ГИС-картирование и оценка степени засушливости на основе данных дистанционного зондирования Земли 242
Дунаева Е. А.

Использование ресурсов дистанционного зондирования в исследованиях формирования природных экосистем на разрабатываемых и отработанных угольных месторождениях Красноярского края и Иркутской области 246
Зеньков И. В.

Определение технических параметров открытой угледобычи и угольной логистики в австралийском штате Новый Южный Уэльс с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли 252
Зеньков И. В.

Исследование атмосферных возмущений во время сильного землетрясения весной 2011 г. 258
Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Одинцов Р. В.

Использование данных дистанционного зондирования для оценки состояния растительности в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района 262
Корец М. А., Данилова И. В., Шишикин А. С.

Гидрофизический мониторинг аномально высоких волн: обработка данных и прогноз опасности 267
Кудря Н. О., Курако М. А., Симонов К. В.

Информационная система мониторинга состояния и динамики лесов Республики Тыва 271
Куулар Х. Б.

Использование спутниковых наблюдений для вычисления метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы 273
Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.

Использование индекса NDVI для оценки продуктивности и дифференциации зерновых культур 277
Маглинец Ю. А., Селютина Ю. В., Власенко О. А.

Изменение динамики экстремальных индексов атмосферных осадков (число дней в году с осадками 20 мм/день и более) в Ширакском регионе Республики Армения 281
Маргарян В. Г.

Использование данных дистанционного зондирования Земли для проведения мониторинга состояния и использования земель 286
Моисеева Н. А.

Дистанционный мониторинг паводковой обстановки на реке Обь по снимкам среднего и высокого разрешения 288
Муратов И. Н., Кочергин Г. А., Куприянов М. А., Полищук Ю. М., Хамедов В. А.

Состояние степных ландшафтов в районах нефтедобычи: выявление нарушенных земель и фрагментации на основе данных LANDSAT 291
Мячина К. В.

Сегментация спутниковых изображений в задачах оперативного анализа последствий чрезвычайных ситуаций (на примере лесных пожаров и паводков) 295
Пестунов И. А., Рылов С. А., Дубровская О. А., Синявский Ю. Н., Новикова О. Г., Завьялова Д. Ю.

Исследование практической устойчивости технических систем на конечном интервале времени 300
Рогалев А. Н.

Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов 304
Ромасько В. Ю.

Оценки влияния континентальных выносов на аэрозольную оптическую толщу атмосферы над Восточной Атлантикой по данным спутниковых наблюдений ... 308
Сакерин С. М., Кабанов Д. М.

Влияние зимнего муссона на пространственное распределение аэрозольной оптической толщи атмосферы над Аравийским морем (спутниковые и корабельные измерения) 312
Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Турчинович Ю. С.

Мониторинг развития вновь осваиваемых территорий Новой Москвы с помощью данных ДЗЗ и ГИС-технологий 316
Сакиркина М. А.

Идентификация сельскохозяйственных культур по спектрозональным спутниковым данным 320
Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Кулик Е. Н.

Изучение пространственно-временного распределения прозрачности в поверхностном слое воды оз. Байкал по данным радиометра AVHRR 324
Сутырина Е. Н.

Использование данных лазерного сканирования в моделировании лесных ландшафтных сцен 328
Ткачева А. А., Данилин И.М.

Использование многолетних архивных данных AVHRR (1986–2015 гг.) для исследования пирогенной активности в Восточной Сибири 335
Томшин О. А., Соловьев В. С.

Анализ состояния древостоев по данным дистанционного зондирования РЕСУРС-П 339
Федотова Е. В., Заречнева А. И.

Квазистационарные зоны по динамике трендов NDVI – мощный инструмент исследования пространственных структур растительности суши 343
Шевырногов А. П., Ларько А. А.

Анализ случаев возникновения смерчей в лесной зоне Европейской части России по данным дистанционного зондирования Земли 346
Шихов А. Н., Тарасов А. В.

Оценка длительного загрязнения территорий городов Кузбасса по данным наземного и спутникового мониторинга снежного покрова 350
Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф.

Список авторов 354

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы III Международной научной конференции
(Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.)

Научный редактор
Евгений Александрович Ваганов

Ответственный редактор
Михаил Валерианович Носков

Корректор *Ю. И. Молокова*
Компьютерная верстка *Т. М. Бовкун*

Подписано в печать 15.08.2016. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 21,2. Тираж 100 экз. Заказ № 2622

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

В Библиотечно-издательском комплексе СФУ
вам быстро и качественно выполнят следующие виды
издательских работ:

– редактирование
– корректура
– художественное оформление
– компьютерная верстка

Наш адрес:
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а, к. 0108
Тел. (391) 206-26-67 – отдел приема и сопровождения заказа