МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы II Международной научной конференции,
22–25 сентября 2015, г. Красноярск

Научный редактор
Е. А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2015

УДК 528.8
ББК 26.8с51
Р 326

Издание подготовлено и опубликовано при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

Редакционная коллегия:

Ваганов Евгений Александрович – академик РАН, доктор биологических наук, ректор СФУ;
Цибульский Геннадий Михайлович – доктор технических наук, профессор, директор ИКИТ СФУ, заведующий кафедрой СИИ;
Носков Михаил Валерианович – доктор физико-математических наук, профессор;
Кашкин Валентин Борисович – доктор технических наук, профессор;
Харук Вячеслав Иванович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ГИС;
Маглинец Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ»

Р 326 Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы II Междунар. науч. конференция, 22–25 сентября 2015, г. Красноярск / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 365 с.
ISBN 978-5-7638-3306-5

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
ББК 26.8с51

ISBN 978-5-7638-3306-5

© Сибирский федеральный университет, 2015

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 528.852

ЖЁСТКАЯ И НЕЧЁТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. В. Асмус[(1)], А. А. Бучнев[(2)], В. П. Пяткин[(2)]
[(1)]Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
e-mail: asmus@planet.iitp.ru
[(2)]Институт Вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ) СО РАН
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

HARD AND FUZZY CLUSTERING OF EARTH REMOTE SENSING DATA

Vasiliy V. Asmus[(1)], Aleksey A. Buchnev[(2)], Valeriy P. Pyatkin[(2)]
[(1)]State Research Center of Space Hydrometeorology «Planeta», Roshydromet
e-mail: asmus@planet.iitp.ru
[(2)]Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics (ICM&MG) SB RAS
e-mail: baa@ooi.sscc.ru
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

Рассматривается система кластеризации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Система представлена следующими методами: методом *K*-средних, методом анализа мод многомерных гистограмм, гибридным методом, объединяющим метод анализа мод многомерных гистограмм с последующей иерархической группировкой и рядом алгоритмов нечеткой кластеризации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, кластерный анализ, жесткая кластеризация, нечеткая кластеризация.

Введение

Центральные вопросы тематической обработки (интерпретации) данных ДЗЗ – вопросы повышения качества дешифрирования – непосредственно связаны с проблемой выбора адекватных алгоритмов распознавания [1–4]. В данной работе рассматривается кластерный анализ в обработке многоспектральных (многомерных) данных ДЗЗ. Характеризуя методы кластеризации в целом, следует отметить, что в основном они отыскивают в данных не те структуры, которые там реально существуют, а те, для поиска которых они предназначены [2]. Поэтому надежность результатов кластеризации часто можно оценить лишь сравнением нескольких вариантов обработки данных ДЗЗ. Характерной особенностью данных ДЗЗ является «загрязнение» выборок смешанными векторами измерений, т. е. векторами, которые образуются при попадании в элемент разрешения съемочной системы нескольких природных объектов. Это обстоятельство является одним из источников ошибок при построении карты классификации [1; 2]. Большинство алгоритмов кластеризации для отнесения векторов

признаков кластерам вычисляют для каждого вектора значения подходящей функции «правдоподобия». В случае зачисления вектора признаков в кластер по максимальному значению функции правдоподобия получается так называемая *жесткая* кластеризация. Рассмотрим некоторые алгоритмы *жесткой* кластеризации.

Жёсткая кластеризация

В состав программного комплекса, реализованного совместными усилиями ФГБУ «НИЦ «Планета» и ФГБУН ИВМиМГ СО РАН, входит реализация классического алгоритма жесткой кластеризации – алгоритма *K*-средних, широко используемого для разбиения на кластеры больших объемов многомерных данных [4]. Алгоритм *K*-средних может быть отнесен к классу параметрических, так как он неявным образом предполагает природу плотности вероятности: кластеры стремятся иметь конкретную геометрическую форму, зависящую от выбранной метрики. Мы используем следующие метрики: Евклидова, Махаланобиса, Чебышева, city-block расстояние. Известно также, что результат кластеризации методом *K*-средних зависит от задания начальных центров кластеров. Предоставляется выбор одного из трех вариантов, два из которых определяются на основе статистических характеристик набора данных и один основан на случайной выборке. Один из вариантов алгоритма позволяет учитывать влияние смешанных векторов [2]. Дополнительным параметром в этом случае является выбираемое эмпирически соотношение чистых и смешанных векторов в наборе данных. На основе этого соотношения и градиентного изображения, сформированного подходящим градиентным оператором (Робертса/Превитта/Собела), выделяются связные компоненты, состоящие из чистых векторов. Кластеризации подвергаются средние векторы связных компонент. В дальнейшем смешанные векторы распределяются по полученным кластерам на основе минимального расстояния до центра кластера.

Другой подход, позволяющий получать разбиение векторов измерений на кластеры произвольной формы, основан на предположении, что исходные данные являются выборкой из многомодового закона распределения, причем векторы, отвечающие отдельной моде, образуют кластер [2]. Таким образом, задача сводится к анализу мод многомерных гистограмм.

Ещё один алгоритм жёсткой кластеризации, реализованный в нашем программном комплексе, – гибридный метод: анализ мод многомерной гистограммы с последующей иерархической группировкой**.** Практическое использование метода анализа мод многомерной гистограммы показывает, что зачастую получение приемлемого результата является весьма трудоемким процессом и требует высокой квалификации эксперта-исследователя. Причиной этого является, вероятно, то, что алгоритм является многопараметрическим (в частности, на решение оказывает большое влияние способ сглаживания гистограммы). В связи с этим, система кластеризации дополнена двухэтапной процедурой (с сохранением всех ранее существовавших функций): на первом этапе выполняется предварительное разбиение исходной выборки на кластеры с помощью модального анализа, а затем для получения окончательного результата используется иерархическая группировка [5]. Заметим, что применение иерархической группировки для кластеризации исходного набора векторов нереально из-за того, что используемая в алгоритме матрица расстояний состоит (в начале работы алгоритма) из $N(N-1)/2$ элементов, где N – количество векторов. Предварительное использование модального анализа позволяет сократить объем данных до разумных пределов. В качестве входных данных для иерархической группировки используются векторы средних группы векторов, связанных с каждой модой многомерной гистограммы. Напомним, что на каждом шаге восходящей иерархической

классификации объединяются два кластера, расстояние между которыми минимально Достоинством иерархической группировки является то, что после построения иерархического дерева кластеризации можно “разрезать” его на любом уровне иерархии, т. е. получать разные кластерные карты, не запуская снова процесс кластеризации.

Последним этапом работы всех алгоритмов жёсткой кластеризации является сортировка полученных кластеров по убыванию их объемов и подсчет соответствующих статистик: объемов, векторов средних и девиаций (стандартных отклонений) в каналах для каждого кластера. Эти данные записываются при необходимости в файл на диске. Туда же записывается число векторов данных, не вошедших ни в один из кластеров, т. е. попавших в "*K*+1"-й кластер. Эти данные являются основой для анализа разделимости полученных кластеров. Результатом работы классификаторов в рабочем режиме является одноканальное (байтовое) изображение, значениями пикселов которого являются номера кластеров. Это изображение окрашивается в предопределенные цвета, которые в интерактивном режиме могут быть заменены на цвета, определяемые пользователем. К выходному изображению можно применить функцию постклассификации для удаления изолированных пикселов (генерализация данных).

Следует отметить, что предложенные алгоритмы жёсткой кластеризации внедрены в практику оперативной работы ФГБУ «НИЦ «Планета», и широко используются в технологии построения карт ледовой обстановки по спутниковым данным видимого, инфракрасного или микроволнового диапазонов.

Нечёткая (*мягкая)* кластеризация

Альтернативой жесткой разделяющей кластеризации является *мягкая* или *нечеткая* кластеризация, разрешающая векторам принадлежать всем кластерам с коэффициентом членства $u_{ij} \in [0,1]$, определяющим степень принадлежности *j*-го вектора *i*-му кластеру:

$$\sum_{i=1}^{C} u_{ij} = 1, \ \forall j, \qquad (1)$$
$$\sum_{j=1}^{L} u_{ij} < L, \ \forall i,$$

определяя этими соотношениями нечеткую кластеризацию. Здесь *C* – число кластеров, *L* – количество векторов измерений. В недавнее время нами в состав системы кластеризации программного комплекса была включена реализация широко используемого алгоритма нечеткой кластеризации, известного как метод *C-средних* [6]. Это итерационный алгоритм, который используется для разделения смешанных векторов измерений в данных ДЗЗ. Идея метода заключается в описании сходства вектора с каждым кластером с помощью функции уровней принадлежности, принимающей значения от нуля до единицы. Значения функции, близкие к единице, означают высокую степень сходства вектора с кластером. Очевидно, что сумма значений функции уровней принадлежности для каждого пиксела должна равняться единице. Так же, как и в алгоритме *K*-средних, параметрами соответствующей процедуры (кроме количества кластеров) являются тип метрики и вариант выбора начальных центров кластеров. Дополнительным параметром является показатель нечеткости, значения которого для данных ДЗЗ предлагается брать близкими к двум (см. [1]).

Вторым алгоритмом нечеткой кластеризации, включенным в состав программного комплекса по обработке данных ДЗЗ, является алгоритм нечеткой кластеризации с регуляризацией – так называемый алгоритм *Possibilistic C-means, PCM*. Принципиальное отличие алгоритма PCM от алгоритма FCM состоит в снятии ограничения (1) на элементы матрицы принадлежности вектора признаков кластерам: в алгоритме FCM для каждого вектора признаков сумма элементов матрицы принадлежности по всем кластерам должна равняться единице (вероятностное – probabilistic – свойство алгоритма FCM). Таким образом, в алгоритме FCM членство вектора в кластере является относительным, т. к. оно зависит от членства этого вектора во всех других кластерах, в то время как в алгоритме PCM значение членства вектора в кластере является абсолютным (т. е. не зависящим от значений членства этого вектора в других кластерах) и может интерпретироваться в терминах типичности вектора. Алгоритм PCM пытается найти моды в наборе данных, так как каждый полученный кластер соответствует плотной области в этом наборе. В процессе выполнения итераций алгоритма прототипы кластеров последовательно перемещаются в плотные области в пространстве признаков.

PCM алгоритм является робастным методом кластеризации, который может быть использован для обнаружения плотных областей в данных. Степень членства вектора признаков в кластере определяется двумя величинами: расстоянием вектора до прототипа кластера и параметром K, называемым ссылочным расстоянием кластера. Значение этого параметра индивидуально для каждого кластера и зависит от среднего размера кластера.

Авторы алгоритма (Krishnapuram&Keller [7]) отмечают, что для получения качественных результатов кластеризации требуется хорошая инициализация ссылочных расстояний кластеров. Следуя их рекомендациям, в качестве начального приближения матрицы степеней членства векторов признаков в кластерах используется результат выполнения алгоритма нечеткой кластеризации методом FCM. То есть необходимым условием выполнения алгоритма PCM для какого-либо набора данных является предварительное выполнение алгоритма FCM для этого набора данных.

Основная часть работы алгоритмов FCM и PCM состоит в итерационном перестроении матрицы уровней принадлежности векторов признаков кластерам и пересчете центров кластеров. Алгоритмы заканчивают работу при выполнении заданного числа итераций либо при достижении матрицы уровней принадлежности состояния стабильности, т. е. состояния, при котором норма разности матриц в двух последовательных итерациях не превосходит заданного порога. Эта работа требует больших временных затрат при ее последовательном выполнении, особенно в случае, когда показатель нечеткости неравен двум, в связи с чем реализованы параллельные версии алгоритмов. Параллельная реализация алгоритмов осуществляется средствами ОС Windows в рамках одного процесса путем запуска нескольких параллельных потоков. Количество запускаемых потоков равно количеству логических процессоров компьютера. Каждый поток перестраивает соответствующую часть матрицы уровней принадлежности. Необходимая при работе параллельных потоков синхронизация достигается с помощью механизма событий ОС Windows.

Заключение

Практика решения конкретных прикладных задач ДЗЗ с использованием предлагаемых алгоритмов кластеризации многоспектральных космических снимков, получаемых как с российских, так и с зарубежных спутников, подтверждает их высокую эффективность. Отметим, что широкий набор возможностей системы

кластеризации программного комплекса позволяет эксперту-исследователю выбирать адекватные решения задач дешифрирования данных ДЗЗ.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-07-00068) и Программы № 43 Президиума РАН (проект № 32).

Список литературы

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

2. Асмус В.В. Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды: дис. в виде науч. докл. … д-ра физ.-мат. наук. На правах рукописи. М., 2002. 75 с.

3. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2010. № 2. С. 58–66.

4. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means // Pattern Recognition Letters. 31 (2010). P. 651–666.

5. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия: пер. с фр. М.: Финансы и статистика, 1988. 342 с.

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

7. Krishnapuram R. and Keller J.M. A possibilistic approach to clustering // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1:98–110. 1993.

УДК 504.064.37+614.841

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПИРОГЕННОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ РОССИИ

С. А. Барталев, Ф. В. Стыценко, Е. А. Лупян
Институт космических исследований РАН
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

SATELLITE MONITORING OF RUSSIAN FORESTS' PIROGENIC MORTALITY

S. A. Bartalev, F. V. Stytsenko, E. A. Loupian
Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

Разработана технология мониторинга гибели лесов России от пожаров на основе спутниковых данных. Данные спутниковых измерений, охватывающих период 2006–2014 гг., впервые позволили объективно оценить масштабы и многолетнюю изменчивость пирогенной гибели лесов в масштабах страны, которая, как показывают результаты исследований, характеризуется устойчивым нарастанием в последние годы.

Ключевые слова: лесные пожары, гибель лесов, дистанционное зондирование.

Введение

Пожары являются наиболее мощным фактором воздействия на леса России и часто приводят к их гибели. Данные о площади поврежденных огнем и погибших насаждений необходимы для решения задач защиты, использования и воспроизводства лесов, а также являются ключевой составляющей информационного обеспечения фундаментальных биосферных исследований. Развитие и практическое использование методов спутникового мониторинга пожаров создало технологическую основу для качественного повышения уровня достоверности информации о горимости лесов России [1]. Инструментальная оценка пройденной огнем площади, осуществляемая по данным дистанционного зондирования на национальном и глобальном уровнях, сейчас позволяет получать достаточно точную информацию для решения широкого круга практических и научных задач. Регулярное картографирование пройденных пожарами лесов и других наземных экосистем России на основе спутниковых изображений различного пространственного разрешения [2; 3; 4] дало возможность сформировать продолжительные ряды данных, позволяющих характеризовать площади пожаров, оценивать пространственно-временную вариабельность масштабов пирогенного воздействия на леса, выявлять тренды пожарных режимов.

Вместе с тем важнейший вопрос масштабов пирогенной гибели лесов России до настоящего времени оставался слабо исследованным в научной литературе. Официальная статистика, основанная на использовании крайне неоднородных по степени актуальности и точности лесоучетных данных, несет лишь информацию о совокупной площади гарей и погибших от других причин насаждений в структуре земель лесного фонда. В данной работе представлена технология оценки гибели лесов в результате воздействия пожаров на основе спутниковых данных.

Методические основы мониторинга пирогенной гибели лесов

Физическую основу мониторинга пирогенной гибели лесов составляют вызываемые пожарами изменения отражательной способности лесов в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра прежде всего на длинах волн, соответствующих линиям поглощения света молекулами хлорофилла и воды.

В исследовании использовался коротковолновый вегетационный индекс *SWVI* (Short Wave Vegetation Index) [5], а также его разностная относительная версия *RdSWVI*, характеризующая изменения состояния лесов между спутниковыми наблюдениями до и после пожара:

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}}, \quad (1)$$

$$RdSWVI = \frac{SWVI_{pre} - SWVI_{post}}{\sqrt{SWVI_{pre}}}, \quad (2)$$

где R_{nir} и R_{swir} – соответственно значения коэффициента отражения в ближнем и среднем ИК диапазонах; SWVI_{pre} и $SWVI_{post}$ – значения вегетационного индекса *SWVI* лесного покрова соответственно до и после пожара.

Экспериментальные исследования [5], включающие анализ данных наземного обследования поврежденных пожарами лесов и полученных системами MODIS и Landsat-TM спутниковых изображений, показали наличие связи между значениями, принятого в отечественной практике лесопатологического мониторинга, показателя средневзвешенной категории состояния (СКС) лесов и спектрального вегетационного индекса *RdSWVI*, вычисляемого на основе формул (1) и (2). Это составило основу разработки метода оценки гибели лесов, позволяющего выполнять в масштабах страны регулярный сбор информации об их пирогенных повреждениях с использованием данных спектрорадиометра MODIS [6; 7]. Указанный метод основан на использовании данных измерений отражательной способности лесов в ближнем (858 нм) и среднем (1640 нм) ИК каналах и установленной зависимости между значениями СКС и индекса *RdSWVI*. В качестве оценки степени повреждения лесов принимается значение СКС в момент времени, соответствующий максимуму *RdSWVI*, достигнутому после пожара до конца текущего календарного года. При этом оценка СКС проводится только для пожаров, демонстрирующих устойчивые изменения сезонной динамики коротковолнового вегетационного индекса в сравнении с его многолетней статистической нормой в предшествующий пожару пятилетний период.

Результаты спутниковой оценки пирогенной гибели лесов

Представленные в таблице данные о распределении поврежденных пожарами лесов по категориям состояния позволяют, в частности, получить консервативную оценку средней площади ежегодной пирогенной гибели лесов, составившую величину около $1{,}52 \times 10^6$ га · год$^{-1}$. Полученная величина может рассматриваться как оценка снизу в силу того, что она характеризует площадь лесов, погибших непосредственно в год пожара. С учетом высокой вероятности летального исхода для древостоев, отнесенных к категории усыхающих и характеризуемых потерей выше 2/3 ассимиляционного аппарата крон деревьев, более полная средняя оценка площади пирогенной гибели лесов составляет около $2{,}50 \times 10^6$ га · год$^{-1}$.

Согласно полученным данным общая площадь погибших в период 2006–2014 гг. лесов составила около $22{,}5 \times 10^6$ га. Размах межгодовых вариаций пирогенной гибели насаждений (рисунок) характеризуется широким диапазоном от $0{,}57 \times 10^6$ га до $7{,}00 \times 10^6$ га с достижением максимальной величины в 2012 г., отмеченным экстремальным уровнем горимости лесов России. Доля погибших лесов от пройденной огнем их площади колеблется в различные годы в диапазоне от 27,6 % до 67,4 %, а ее среднемноголетняя величина составляет 50,4 %.

Отдельного упоминания заслуживает монотонный, начиная с 2008 г., рост относительной величины доли погибших насаждений в общей пройденной огнем

площади лесов России (рисунок). Рассмотрение причин феномена возрастания разрушительной силы лесных пожаров может лежать как в плоскости поиска трендов метеорологических факторов, определяющих интенсивность горения, так и исследований его возможной обусловленности повышением уровня горимости в лесах, характеризуемых меньшей пожароустойчивостью. Указанное повышение уровня горимости в лесах в свою очередь может быть вызвано, ростом частоты антропогенных возгораний ввиду расширяющегося хозяйственного освоения территорий.

Таблица

Оценка площади поврежденных пожарами лесов России по категориям состояния

Год	Площади лесов различных категорий состояния, тыс. га			
	Неповрежденные и ослабленные	Сильно ослабленные	Усыхающие	Погибшие
2006	2148,7	143,4	536,4	1295,1
2007	1109,6	108,2	239,6	334,1
2008	6223,3	232,8	848,0	1608,0
2009	2333,4	177,8	530,2	901,9
2010	1112,0	237,5	462,0	1019,2
2011	1427,7	336,6	982,9	1364,7
2012	2816,0	1066,2	3373,0	3639,0
2013	976,4	223,2	802,7	1464,4
2014	1248,9	256,2	1083,2	2033,4
В среднем в год	**2155,1**	**309,1**	**984,2**	**1517,8**
%	**43,6**	**6,2**	**19,8**	**30,6**

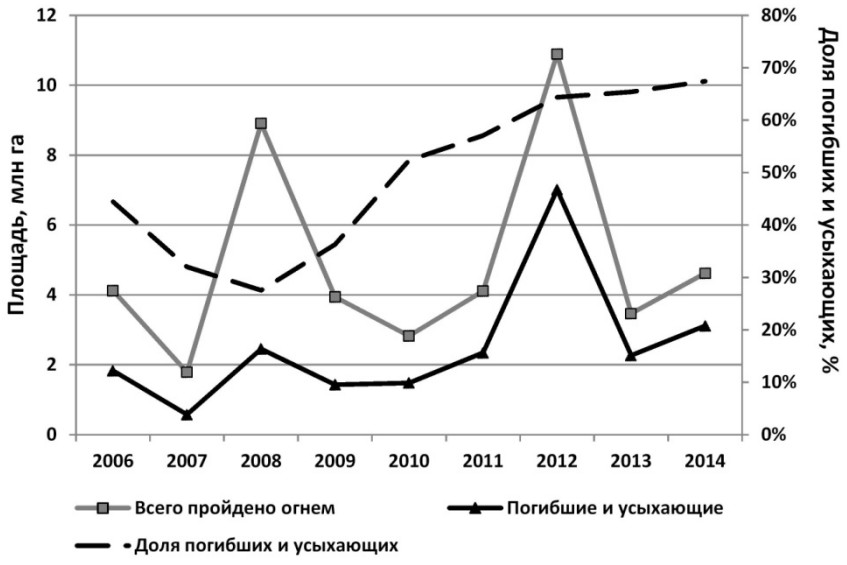


Рис. Многолетние вариации характеристик воздействия пожаров на леса России

Указанные выше оценки получены в год пожара и не учитывают постпожарного усыхания лесов. Развитием указанных методов явился метод картографирования постпожарных усыханий леса, позволивший выявить погибшие в результате пожаров 2006–2014 гг. леса по состоянию на 2014 г. Данный метод основан на анализе динамики индекса SWVI в последующие за пожаром годы для непосредственно затронутых пожарами и прилегающих к нему участков леса. Участок леса считался погибшим, если два года подряд демонстрировал устойчивое отклонение индекса SWVI от своего до имевшего место до воздействия пожара значения. По результатам работы данного

метода по состоянию на 2014 г. в России выявлено $24{,}5 \times 10^6$ га погибших в результате воздействия пожаров лесов.

Полученные результаты могут быть использованы для выработки оптимальных стратегий организации охраны лесов от пожаров в лесах России, направленной на минимизацию потенциального ущерба их ресурсному потенциалу, а также для проведения исследований в области влияния пирогенного фактора на биосферные функции лесов.

Исследования проведены при поддержке РФФИ (грант №13-05-41420 РГО_а). Использованные в исследованиях спутниковые карты растительного покрова созданы при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389).

Список литературы

1. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) / 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. 2008. Вып. 5. Т. II. С. 419–429.

2. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 9–27.

3. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, О.Ю. Панова, В.Ю. Ефремов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 9–20.

4. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений / В.А. Егоров, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Уваров // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 2006. Вып. 2. С. 98–109.

5. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов, Ф.В. Стыценко, Т.С. Ховратович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.

6. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS / Ф.В. Стыценко, С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 254–266.

7. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Барталев, Ф.В. Стыценко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

УДК 528.8.04, 528.88

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ И ОПЫТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В. Г. Безбородов
ОАО «НПК «РЕКОД»
e-mail: info@rekod.ru

Рассматриваются вопросы, посвященные результатам космической деятельности.
Ключевые слова: ГИС, центр космических услуг, геоинформационная платформа, результаты космической деятельности.

Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация «РЕКОД» (далее – ОАО «НПК «РЕКОД») создано в мае 2008 г. по инициативе Роскосмоса и Росимущества в целях обеспечения эффективного использования отечественного и мирового космического потенциалов в интересах модернизации экономики Российской Федерации, развития ее регионов и муниципальных образований.

Название Корпорации образовано от слов «РЕзультаты КОсмической Деятельности» (далее – РКД), что отражает главное направление ее деятельности.

ОАО «НПК «РЕКОД» – один из активных участников рынка космических продуктов и услуг, разработчик и инструмент реализации государственной политики в этой области.

Корпорация является головной организацией Федерального космического агентства по подготовке и реализации совместных соглашений, программ и проектов с субъектами Российской Федерации и другими потребителями в области использования результатов космической деятельности.

Корпорация ориентирована на создание с использованием РКД интегрированных и специализированных геоинформационных и навигационно-информационных систем, продуктов и услуг, специального программного обеспечения, доступных как звеньям мониторинга и управления различного уровня, так и массовым конечным пользователям.

Роскосмосом при непосредственном участии Корпорации разработаны Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 г. (утверждены Президентом Российской Федерации 14 января 2014 г., № Пр-51), а также Положение «О полномочиях федеральных органов исполнительной власти в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации, развития ее регионов и расширения международного сотрудничества» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 07.07.2015 № 682).

По заказу Роскосмоса, регионов России и других заказчиков Корпорацией на договорной основе реализовано 173 комплексных и специализированных проектов (работ) по созданию систем и аппаратно-программных комплексов на основе системы ГЛОНАСС/GPS и других результатов космической деятельности, включая региональные, муниципальные, отраслевые, объектовые и иные геоинформационные системы и геопорталы; системы спутникового мониторинга основных отраслей экономики – транспорта, сельского, водного, лесного и дорожного хозяйства, нефтегазового и туристско-рекреационного комплексов, экологического мониторинга;

региональные системы высокоточного позиционирования с клиентскими приложениями; системы мониторинга земель и объектов недвижимости, чрезвычайных ситуаций (пожаров, наводнений, оползней), критически важных объектов (мостов, ГЭС, других крупных инженерных сооружений), трансграничных и особо охраняемых природных территорий; системы безопасности дорожного движения; 3D-модели территорий, городов и объектов, другие системы, продукты и услуги, основанные на использовании результатов космической деятельности.

Космические продукты и услуги ОАО «НПК «РЕКОД» основаны на программном обеспечении собственной разработки, на которое получено более 80 свидетельств Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ, из них 27 непосредственно связаны с использованием систем ГЛОНАСС/GPS.

В целях продвижения космических продуктов и услуг в регионы обеспечены подготовка и научно-методическое сопровождение Соглашений Роскосмоса о взаимодействии в области использования результатов космической деятельности с 76 субъектами Российской Федерации и 2 муниципальными образованиями.

Обеспечен переход к программно-целевому методу использования результатов космической деятельности в регионах России. По поручению Роскосмоса ОАО «НПК «РЕКОД» разработана Типовая региональная целевая программа «Внедрение спутниковых навигационных технологий с использованием системы ГЛОНАСС и других результатов космической деятельности в интересах социально-экономического и инновационного развития субъекта Российской Федерации», одобренная Протоколом заседания Межведомственной рабочей группы по форсированному созданию и развитию системы ГЛОНАСС от 24 марта 2011 г. № 1. Типовая программа служит основой для разработки государственных целевых программ использования РКД в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях.

Такие программы утверждены уже в 62 регионах России, в 23 находятся в стадии разработки. По поручению Роскосмоса ОАО «НПК «РЕКОД» осуществляет научно-методическое сопровождение разработки этих программ.

С целью консолидации усилий и ресурсов участников процесса использования результатов космической деятельности (государства, общества, науки, бизнеса) при координирующей роли ОАО «НПК «РЕКОД» разработана и представлена в Минэкономразвития России Технологическая платформа «Использование результатов космической деятельности в интересах конечных потребителей». Эта платформа поддержана Роскосмосом, Министерством образования и науки РФ, кластером космических технологий и телекоммуникаций Фонда «Сколково», 13 субъектами Российской Федерации, 2 муниципальными образованиями, более чем 60 государственными и коммерческими организациями.

По заказу Роскосмоса ОАО «НПК «РЕКОД» осуществляет цикл системных научных исследований, направленных на определение и анализ потребностей различных конечных потребителей в использовании результатов космической деятельности, обоснование рациональных путей и механизмов внедрения космических продуктов и услуг в практику социально-экономической деятельности Российской Федерации, ее регионов и населения страны.

Осуществляемое ОАО «НПК «РЕКОД» комплексное космическое обеспечение в интересах государственных и муниципальных нужд и других конечных потребителей основано на создании и совместном использовании космических продуктов и услуг навигации, дистанционного зондирования Земли, связи, гидрометеорологического, топогеодезического, картографического и других видов космического обеспечения (а также иных необходимых информационных ресурсов).

Комплексное космическое обеспечение потребителей реализуется в соответствии с разработанным ОАО «НПК «РЕКОД» универсальным алгоритмом с использованием

базовой геоинформационной платформы КОСМОС. Эта отечественная платформа является основой всех реализуемых проектов, в том числе национальной инфраструктуры центров космических услуг (далее – ЦКУ) – региональных, муниципальных, отраслевых, инновационно-образовательных (университетских и школьных), развертываемой во исполнение Протокола совещания у Председателя Правительства Российской Федерации В.В. Путина от 10 августа 2010 г. № ВП-П7-44пр и Перечня поручений Президента Российской Федерации от 10 октября 2012 г. № Пр–2672. Инфраструктура ЦКУ включает 48 центров: 13 региональных, 2 муниципальных, 21 университетский, 11 школьных центров, 1 ЦКУ техникума. В стадии становления находятся еще 29 ЦКУ различного уровня.

Центры космических услуг создаются как центры компетенции в области использования результатов космической деятельности, как базовые элементы ситуационных центров и центров мониторинга, обеспечивающие на соответствующем уровне формирование совокупного навигационно-информационного ресурса субъектов Российской Федерации и других объектов управления:

– структурированного по отраслям экономики, территориям и другим критериям;

– интегрированного с электронными картами и космоснимками;

– позиционированного в пространстве и времени в единой системе координат ГЛОНАСС/GPS;

– обновляемого с использованием космических и других систем дистанционного зондирования;

– предоставляемого в простой и удобной форме руководителям всех уровней и другим пользователям, включая население.

Базовый Центр космических услуг, в котором создаются и отрабатываются типовые космические продукты и услуги, расположен в основном офисе ОАО «НПК «РЕКОД» (г. Москва).

С целью ускорения формирования инфраструктуры ЦКУ ОАО «НПК «РЕКОД» проводит глубокую модернизацию базовой геоинформационной платформы и реализует комплексный проект «Космические регионы», в рамках которого на основе предоставляемой ОАО «НПК «РЕКОД» безвозмездной лицензии осуществляется массовая установка конечным потребителям базовой ГИС-платформы КОСМОС – в регионы, муниципальные образования, университеты, предприятия (всего 30), и круг участников проекта неуклонно расширяется.

В рамках этого проекта идет внедрение базовой геоинформационной платформы в различные сферы социально-экономической деятельности, включая военно-патриотическую работу, здравоохранение и многие другие.

Корпорация принимает активное участие в формировании системы подготовки и повышения квалификации специалистов в области использования результатов космической деятельности, в том числе на основе развертывания сети университетских и школьных ЦКУ (в рамках соглашений о сотрудничестве, заключенных ОАО «НПК «РЕКОД» с 60 ведущими университетами, 11 общеобразовательными школами и одним техникумом).

При поддержке Роскосмоса Корпорацией подготовлены и Минтрудом России утверждены профессиональные стандарты «Специалист по использованию результатов космической деятельности», «Специалист по менеджменту космических продуктов, услуг и технологий», «Специалист по оказанию космических услуг на основе использования глобальных навигационных спутниковых систем», «Специалист по созданию космических продуктов и оказанию космических услуг на основе использования данных ДЗЗ», разрабатывается проект профессионального стандарта «Специалист по применению геоинформационных систем и технологий для решения задач государственного и муниципального управления».

ОАО «НПК «РЕКОД» уделяет особое внимание гармонизации нормативного правового обеспечения в области использования результатов космической деятельности. В соответствии с планом законопроектной деятельности Правительства Российской Федерации на 2015 г. (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2014 г. № 2736-р) Роскосмосом при поддержке ОАО «НПК «РЕКОД» разрабатываются законопроекты:

– «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О космической деятельности» (в части повышения эффективности использования результатов космической деятельности)»;

– «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (в части использования результатов космической деятельности в различных секторах экономики)».

Таким образом, в настоящее время происходит качественный переход от штурма космоса к планомерной работе по организации практического использования результатов космической деятельности.

УДК 528.8; 629.78

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ НАЗЕМНОЙ КАЛИБРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

Б. И. Беляев, В. А. Сосенко, Л. В. Катковский, А. Д. Хомицевич,
В. А. Иванов, А. А. Пасенюк
Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, г. Минск
e-mail: remsens@mail.ru

Описан опытный образец мобильного модульного комплекса спектральной аппаратуры оптического диапазона, предназначенный для использования на наземных подспутниковых полигонах для обеспечения полетных калибровок авиакосмических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), необходимой для повышения надежности дешифрирования данных ДЗЗ путём интеграции данных космического, авиационного и наземного сегментов.

Ключевые слова: калибровка датчиков авиакосмической аппаратуры, аппаратно-программный комплекс, дистанционное зондирование.

Введение

В рамках программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» («Мониторинг-СГ») в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ был разработан и создаётся опытный образец модульного аппаратно-программного комплекса (АПК) «Калибровка» научной аппаратуры оптического диапазона для использования на наземных подспутниковых полигонах с целью калибровки авиакосмических средств дистанционного зондирования Земли. Калибровка датчиков целевой аппаратуры Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКС ДЗЗ) и других аппаратов ДЗЗ, в том числе и российского «Канопус-В», является важнейшей задачей в период их эксплуатации, поскольку естественный временной дрейф характеристик датчиков требует его постоянного контроля. Помимо калибровки существует необходимость отработки новых методик дистанционных исследований земных покровов путём интеграции данных космического, авиационного и наземного сегментов.

Дистанционные наблюдения земной поверхности с носителей космического базирования давно перешли в стадию широкого практического использования. В связи с этим разрабатывается стратегия обеспечения качества данных ДЗЗ. Для наземного обеспечения таких работ развивается концепция сети подспутниковых полигонов как важнейшего сегмента наземной инфраструктуры космических исследований, которые удовлетворяют условиям различия климатических зон, разнообразия растительных покровов, имеют отличающиеся тематические направленности и несут функциональные нагрузки, соответствующие задачам полигонного обслуживания. Работа подспутниковых полигонов предполагает использование специальной аппаратуры, функционирующей в различных диапазонах электромагнитных длин волн, соответствующих, в частности, аппаратуре Белорусских и Российских космических аппаратов, должны обеспечивать возможность проведения двухуровневых экспериментов, а также многоуровневых с привлечением авиационных средств.

Состав аппаратно-программного комплекса

Для измерения спектров различных объектов наибольшее распространение в настоящее время получили спектрометры и спектрорадиометры, использующие полихроматоры, в которых, как правило, используются вогнутые отражательные дифракционные решетки, выполняющие дополнительно роль коллиматоров, а также линейные и матричные многоэлементные фотоэлектронные приемники излучения.

С целью расширения рабочего спектрального диапазона спектрометров (без потери информации на стыках различных поддиапазонов) при сохранении высокого спектрального разрешения и чувствительности приборов применяются различные приемы пространственного разделения входного пучка излучения на два и более пучков (светоделение); использование нескольких (чаще двух) входных щелей; использование нескольких линейных приемников излучения с пространственным смещением друг относительно друга. Указанные особенности учтены и используются в спектрорадиометрах АПК.

Для максимальной эффективности использования АПК предполагается проведение многоуровневых измерений тестовых объектов подспутниковых полигонов с использованием АПК «Калибровка», что позволит повысить точность временной и пространственной привязки измеряемых данных, точность измерения абсолютных яркостей отраженного объектами излучения.

В состав АПК входят следующие модули:

- бортовой фотоспектрорадиометр (ФСР) высокого разрешения на диапазон 400–900 нм, снабженный цифровой покадровой видеосистемой и предназначенный для измерения спектральных отражательных характеристик всех типов природных поверхностей полигонов (тестовых площадок) с борта авиационных носителей и в наземных условиях;
- двухканальный модульный спектрорадиометр (ДМС) 400–900 нм, предназначенный для одновременного измерения яркости отраженного излучения от подстилающей поверхности и освещенности падающего излучения с верхней полусферы;
- портативный спектрорадиометр на область 800–1500 нм (ПСР-700);
- портативный спектрорадиометр на область 1200–2500 нм (ПСР-1300);

ПСР-700 и ПСР-1300 предназначены для измерения в наземных стационарных условиях, с вышек и подвижных средств спектральных характеристик отражения тестовых участков природных и искусственных объектов.

- сканирующий солнечный спектрополяриметр на область 350–950 нм (ССП-600) для измерения прямого солнечного и рассеянного атмосферой под различными углами излучения;
- комплект специальных насадок для обеспечения измерений коэффициентов спектральной яркости, поляризационных характеристик, спектрального альбедо;
- специальное программное обеспечение (СПО) управления, хранения и обработки данных.

Основные характеристики АПК

АПК обеспечивает:

- спектральное разрешение 2–5 нм в диапазоне 400–900 нм, 10 нм в диапазоне 800–1500 нм, 15 нм в диапазоне 1200–2500 нм;
- синхронное измерение оптических характеристик солнечного излучения (для определения параметров атмосферы) и подстилающих поверхностей;
- измерение угловых зависимостей отраженного излучения;
- одновременное измерение падающего и отраженного излучения (для измерений КСЯ и альбедо);

- цифровую регистрацию изображений спектрометрируемого объекта;
- погрешности измерения оптических параметров подстилающих поверхностей 5–10 %;
- АПК и СПО должны обеспечивать привязку спектров и изображений к навигационным данным (время, географические координаты) GPS, совместный анализ спектров и изображений.

Одним из пяти спектральных приборов в составе АПК «Калибровка» будет бортовой фотоспектрорадиометр высокого спектрального разрешения, работающий в диапазоне 400–900 нм, действующий макет которого уже использовался в 2015 г. в полевых измерениях.

ФСР будет обеспечивать: спектральное разрешение 2–3 нм в диапазоне 400–900 нм; измерение угловых зависимостей спектров отраженного излучения; цифровую регистрацию изображений спектрометрируемого объекта; привязку спектров к изображениям, а также спектров и изображений к навигационным данным GPS (время, географические координаты); совмещение в одном блоке датчиков регистрации спектров, изображений, накопления и обработки данных; совместный анализ спектров и изображений. Погрешности измерения абсолютных спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ) подстилающих поверхностей составят 5–10 %.

Разрабатываемый АПК, объединяющий в своем составе пять спектральных приборов, использует новые способы спектрометрии, касающиеся, в частности комплексирования спектрорадиометров различных спектральных диапазонов, видеопривязки и регистрации изображений спектрометрируемого объекта с жесткой пространственной привязкой поля зрения спектрорадиометра к изображению, географическую привязку объектов, одновременную съемку спектров отражения подстилающей поверхности и освещающего излучения, регистрацию спектрально-угловых зависимостей рассеянного в атмосфере излучения Солнца и др.

Программное обеспечение входящее, в состав АПК может функционировать как в операционных системах семейства Windows, так и в *nix системах. Позволяет записывать данные в едином формате. Обеспечивает одновременную запись данных со всех устройств. Реализует дальнейшую обработку: пересчет и фильтрацию в соответствии с калибровочными данными, тематическую обработку.

Методики измерения земных покровов

Разработана методика измерений СПЭЯ и коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ) различных типов земной поверхности, предназначенная для проведения измерений с использованием модульного комплекса спектральной аппаратуры оптического диапазона «Калибровка». К измеряемым поверхностям относятся: эталонные площадки подспутниковых (калибровочных) полигонов, однородные участки различных типов подстилающей поверхности (основных типов почв и покрытий), площадки различных сельхозкультур и монокультур древесной растительности.

Тестовые площадки представляют собой, как естественные достаточно однородные подстилающие поверхности, так и специально созданные калибровочные площадки различной природной этиологии размером около 20×20 м (при пространственном разрешении спутниковой аппаратуры 10 м и менее). Планируются и готовятся к использованию искусственные площадки (тканевые полотнища), для которых определяются места их развертывания и ориентации, осуществляется геопривязка точек выкладки полотнищ.

При отборе калибровочных участков для измерений следует расположить их (пронумеровать) в порядке важности на случай проведения квазисинхронных (с авиакосмическими средствами) измерений ввиду недостаточной мобильности

передвижения наземной группы от участка к участку и большого объема измерений у наземной группы (множество пространственных точек и большой массив угловых измерений на каждой пространственной точке).

При подготовке измерений выполняют определение (уточнение) геометрических размеров всех калибровочных участков и их ориентации, координатная географическая привязка центральных (и при возможности угловых) точек участков с максимально возможной точностью (с использованием приемников GPS, Глонасс, карт Google Earth и имеющихся топографических карт), векторизация отобранных участков, нанесение участков на карто-схему полигона.

Заключение

Новизна комплекса состоит в обеспечении полного набора высокоточных одновременных измерений спектров отражения и атмосферы в широком диапазоне 0,4–2,5 мкм с последующим обеспечением полетных калибровок спутниковых спектральных и спектрозональных систем. Модульность комплекса позволяет использовать отдельные спектральные приборы независимо, что является несомненным плюсом при необходимости проведения быстрых измерений. Следует также отметить уникальность данного комплекса. Аналогов подобных комплексов в Республике Беларусь на данный момент не существует.

Список литературы

1. Разработка комплекса наземной спектральной аппаратуры для обеспечения полетных калибровок спутниковых съемочных систем / С.В. Абламейко, Б.И. Беляев, Л.В. Катковский, В.А. Сосенко, О.О. Силюк // Белорусский космический конгресс. Т. 1. Минск, 2014. С. 234–237.

2. Мобильный фотоспектрорадиометр для наземных измерений спектров отражения и изображений тестовых участков подспутниковых полигонов / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский, В.А. Иванов, В.А. Сосенко // Шестой Белорусский космический конгресс. Т. 1. Минск, 2014. С. 253–256.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ, ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. М. Владимиров[(1)], Ю. М. Князькин[(2)], Ю. А. Маглинец[(3)], М. В. Носков[(3)], В. Ю. Ромасько[(4)], В. И. Харук[(5)], Г. М. Цибульский[(3)], А. П. Шевырногов[(6)]
[(1)]Красноярский научный центр СО РАН
[(2)]АО ИСС
[(3)]Институт космических и информационных технологий
[(4)]Красноярский филиал Центра управления в кризисных ситуациях МЧС России
[(5)]Институт леса СО РАН
[(6)]Институт биофизики СО РАН

В статье приведена историческая справка по организации космического мониторинга территорий Красноярского края. Приводится описание научно-технического задела и перспектив развития.

Ключевые слова: дистанционные методы зондирования, организация системы космического мониторинга, мультиагентные системы.

Все началось, пожалуй, в начале 1970-х гг. с авиационной экспедиции на Дальний Восток, в которой приняли участие И.И. Гительзон, А.С. Исаев, А.П. Шевырногов. С появлением первой спутниковой информации стало очевидным, что она является релевантным исходным материалом для изучения динамики биосферы при использовании соответствующих информационных технологий.

Первые спутниковые данные о поверхности Земли показали, что их качественная интерпретация возможна только с развитием комплексных подспутниковых спектрометрических методов: наземных и авиационных. Поскольку требуемое оборудование невозможно было приобрести, то в Институте физики СО РАН (отдел биофизики) и в Институте леса СО РАН началось создание соответствующего оборудования для съема, хранения и обработки информации: быстродействующий обтюраторный спектрофотометр (В.В. Кольцов, А.П. Шевырногов, Ю.А. Куденко), дисплейные процессоры, устройства оцифровки изображений, датчик изображений ИК-диапазона (В.Г. Черепанов, Г.М. Цибульский).

С помощью создаваемого оборудования были проведены подспутниковые авиационные измерения над лесами Нижнего Приангарья, вдоль русла реки Енисей, на Байкале и др. Высокого уровня развития достигли методы в лесопожарном направлении (А.И. Сухинин), в изучении динамики лесов (В.И. Харук).

Российско-американская комиссия по экономическому и технологическому сотрудничеству (USSR – USA Joint Commission on Scientific and Technological Cooperation) была создана в соответствии с Ванкуверской декларацией, принятой по итогам встречи президентов США и РФ 3–4 апреля 1993 г. Одним из результатов работы Комиссии стала установка в конце 1994 г. в г. Красноярске станции HRPT для приема цифровой экологической и метеорологической информации с американских спутников TIROS/NOAA. Это стало возможно во многом благодаря поддержке и усилиям академика Александра Сергеевича Исаева – бывшего председателя Президиума Красноярского филиала Сибирского отделения Академии наук СССР. В рамках российско-американской рабочей группы «Науки о Земле» РАН – NASA велись совместные работы по космическому мониторингу состояния биосферы в плане динамики концентрации пигментов фотосинтеза в океане и на суше (Международная программа «Зеленая волна»). Сектором аэрокосмических методов исследований Института леса СО РАН с 1994 по 2007 г. велся непрерывный прием и обработка данных со спутников: NOAA-9, 12, 14, 15, 16, 17. Использование данных спутников NOAA позволило осуществлять мониторинг паводковой обстановки на реках Сибири, делать оценку пожароопасного состояния лесов, мониторинг и детектирование

действующих пожаров, дешифрирование нарушенности лесных территорий энтомовредителями и пожарами, анализ параметров атмосферы (данные NOAA/TOVS). Для этих задач были разработаны новые методы и технологии обработки данных многоспектральной съемки, включая авторское программное обеспечение.

В то же время в Красноярском научном центре СО РАН с 1997 по 1998 г. велся приём космических снимков поверхности Земли с КА «Ресурс-01 № 3» на севере от Северного Ледовитого океана до территории Монголии и Китая на юге и от Якутии на востоке до Пермского края на западе. На КА «Ресурс-01 № 3» были установлены: многоканальное устройство МСУ-Э, пространственное разрешение вдоль направления полёта 34 м, поперёк направления полёта 45 м; многоканальное сканирующее устройство МСУ – СК, пространственное разрешение 140 м в видимом и в ближнем ИК участках спектра и 550 м в тепловом ИК-участке. На основе полученных снимков было выполнено прогнозирование минерагенических зон Восточного Саяна, проведено изучение Главного Саянского и Восточно-Саянского разломов, которые проходят по территории Красноярского края от озера Байкал и представляют сейсмическую опасность для края. Необходимость выполнений исследований была подтверждена в дальнейшем. Так, в 2000 г. произошло Караганское землетрясение, эпицентр которого находился на линии Главного Саянского разлома в 180 км от г. Красноярска. В 2009 г. землетрясение силой в 5 баллов было на территории Красноярского края, эпицентр находился в Восточном Саяне в 150 км от г. Красноярска. Практическое применение нашли снимки паводковой ситуации на р. Вилюй в мае 1998 г. и разливов нефтепродуктов на территории Ханты-Мансийского АО, оз. Кымылэмтор, Самотлор, Белое (18 июня 1998 г.).

Разработки сектора аэрокосмических методов исследования леса и позднее лаборатории мониторинга леса ИЛ СО РАН получали поддержку от российских и зарубежных фондов. В частности, в 1999–2014 гг. были реализованы проекты: «Возникновение, поведение и последствия катастрофических пожаров в лесах» (Совместный проект РФФИ и Красноярского научного фонда, № 11-05-98026); Моделирование пожароопасности лесов на территории Восточной Сибири и прогноз «активности лесных пожаров на основе данных дистанционного зондирования и геоинформационных банков данных» (Совместный конкурс ККФН – НОЦ «Енисей» Дистанционное зондирование и математическое моделирование биосферных процессов); «Integrating Historic Patterns of Wildfire, Emissions, and Integrating Historic Patterns of Wildfire, Emissions, and Climate for Siberia as a Basis for Estimating the Impacts of Fire on Carbon Cycling, Quantifying Past Fire/Climate Interactions, and Projecting Future Fire/Climate Change Impacts» (Российско-американское соглашение, NASA #10-05-043); «Пожароуправление в зонах возникновения крупных и катастрофических лесных пожаров» (USDA Forest Service, Соглашение № 10-IC-11132762-208); Стратегия по снижению пожарной опасности ООПТ Алтае-Саянского экорегиона (WWF, United Nations Development Program/ International Climate Initiative).

Сотрудниками центра приема и обработки спутниковой информации ИЛ СО РАН по результатам работ 1996–2015 гг. было опубликовано более 200 печатных работ, в том числе 6 коллективных монографий, в которых рассматривается весь круг направлений и результатов, полученных непосредственно с использованием данных, принимаемых со спутников. Центр приема и обработки спутниковой информации с момента основания был доступен для проведения научных исследований, выполнения хоздоговорных тем (лесничества Красноярского края, База авиалесоохраны), подготовки студентов и аспирантов города (КГУ, СибГТУ, КГТУ, позднее СФУ).

В 1997 году на основании трехстороннего соглашения в составе Красноярского научного центра СО РАН, Администрации Красноярского края и МЧС России была организована лаборатория приема и обработки космической информации Всероссийского НИИ по проблемам ГО и ЧС (212 ЛПОКИ ВНИИ ГО ЧС). Руководителем лаборатории был назначен опытный сотрудник НПО ПМ им. Решетнева –

В.И. Иванов. В 2009 г. из уже ставшего к тому времени Сибирским филиалом ВНИИ ГО ЧС было преобразовано в Красноярский филиал по космическому мониторингу Национального центра управления в кризисных ситуациях МЧС России. Подразделение является ведущим разработчиком новых методов и технологий работы с космической информацией в системе МЧС. В зоне оперативной ответственности Красноярского филиала находится территория Сибирского и Уральского федеральных округов. Также силами сотрудников филиала в Красноярске разработана (и сосредоточена здесь же) единая база данных космического мониторинга по территории России и приграничных государств. База данных содержит всю архивную информацию космоснимков, принятых сетью приемных станций МЧС (Владивосток, Красноярск, Вологда, Москва), а также результаты детектирования различных чрезвычайных ситуаций (лесные и степные пожары, паводковые явления). Доступ к базе данных организован через ведомственную распределённую ГИС «Каскад».

С самого начала тесного сотрудничества сектора аэрокосмических методов исследования леса ИЛ СО РАН и лаборатории ВНИИ ГОЧС велась работа по подготовке кадров совместно с кафедрой прикладной космофизики Красноярского госуниверситета (ныне СФУ) [2]. Большой вклад в развитие методов дистанционного зондирования внесло сотрудничество с кафедрой экологической информатики, созданной в 1993 г., совместно с Институтом биофизики СО РАН Красноярского политехнического института (позднее КГТУ, СФУ). Кафедру основал профессор Анатолий Петрович Шевырногов, активно внедряющий в науку практику методов космического мониторинга.

В 2007 г. в связи с образованием Сибирского федерального университета было приобретено новейшее уникальное оборудование приема и обработки космической информации – аппаратно-программный комплекс «Унискан-36». Таким образом, все аппаратура приема и обработки спутниковых данных, расположенная в корпусе «Экология» КНЦ СО РАН, вошла в состав созданного Красноярского регионального центра коллективного пользования.

Развитие методов космического мониторинга, создание материальной базы для его осуществления привело к естественной организации обучения в этой области. Здесь надо упомянуть кафедры ГИС и СИИ Института космических и информационных технологий (ИКИТ) СФУ, научно-образовательный центр «Институт космических исследований высоких технологий», основанный на базе СибГАУ и Красноярского НЦ СО РАН.

В декабре 2012 г. по инициативе Губернатора Красноярского края была создана региональная технологическая платформа (РТП) «Информационно-телекоммуникационные и космические технологии для инновационного развития Сибири». Стратегической целью РТП является обеспечение использования результатов информационно-телекоммуникационных и космических технологий в целях социально-экономического развития Красноярского края. В ходе работы Региональной технологической платформы в 2012–2014 гг. была организована работа с профильными Министерствами Красноярского края (Министерство природных ресурсов и экологии, Министерство сельского хозяйства, Министерство транспорта, Министерство промышленности) для отладки механизмов взаимодействия с потребителями информации дистанционного зондирования Земли.

Под эгидой РТП в рамках создания региональной системы дистанционного зондирования Земли силами творческого коллектива ИКИТ СФУ под руководством Г.М. Цибульского был осуществлен ряд пилотных проектов. Был создан программно-аппаратный комплекс оперативного приема, обработки, индексации и поиска космоснимков с web-доступом, в базе данных которого находится постоянно пополняемый архив космоснимков территории края, поступающих из различных источников. Выполнен проект «Геоинформационная система агромониторинга

масштаба муниципального района», в ходе которого были отработаны модели информационного взаимодействия хозяйствующих субъектов (фермерские хозяйства, предприятия АПК), представителей органов власти различного уровня (муниципальный район, Министерство сельского хозяйства). В рамках проекта создан пополняемый репозиторий геопространственной информации, обновляемый по результатам дистанционного мониторинга земной поверхности, наземных исследований, коммуникации со сторонними источниками геопространственной информации (Росреестр, агрохимические службы края и др.).

Новейшим этапом развития космического мониторинга в Красноярском крае стало решение Роскосмоса от 17.12.2013 г. о создании Сибирского регионального центра приема и распространения космической информации дистанционного зондирования Земли (СРЦ ДЗЗ) при АО «ИСС» им. ак. М. Ф. Решетнева. Оперативное управление СРЦ ДЗЗ возложено на оператора космических систем – НЦ ОМЗ. Центр создан в целях проведения работ в области приема-передачи информации с российских космических спутников ДЗЗ. А также для хранения, обработки и доведения до потребителей информации космических средств наблюдения, полного обеспечения данными дистанционного зондирования Земли всех потребителей космической информации федерального и регионального уровней.

В состав Сибирского регионального центра при АО «ИСС» входят:

– комплекс приема и предварительной обработки информации, каталогизации и архивирования данных (КПОИ), включая региональный банк геоинформационных данных;

– комплекс тематической (отраслевой) обработки космической информации ДЗЗ и создания выходной продукции с её использованием;

– геоинформационный ситуационный центр для отображения и визуализации геопространственной информации;

– комплекс приема-передачи (КППИ) через спутник-ретранслятор с НЦ ОМЗ и абонентскими пунктами приема, регистрации, архивации информации ДЗЗ и телекоммуникационная сеть;

– комплекс информационного взаимодействия РЦ ДЗЗ с центральным архивом и потребителями КИ ДЗЗ с использованием системы удаленного доступа через региональный Геопортал.

Ежедневно Центр принимает информацию с КА «Ресурс-П» № 1, «Ресурс-П» № 2, «Ресурс-ДК», «Метеор-М» № 1, «Метеор-М» № 2, «Канопус-В».

Отметим, что в последние годы в практике решения региональных задач методами дистанционного мониторинга в ряде субъектов Российской Федерации достигнут определенный прогресс. Тем не менее единого устоявшегося мнения о том, что должна из себя представлять региональная система дистанционного зондирования (РСДЗЗ), не сложилось. Судя по публикациям, работы в рассматриваемой области в основном сводятся к построению информационно-поисковых систем, в то время как задачи регионального управления требуют организации не просто навигаторов в море информации, а полноценных систем, поддерживающих весь цикл принятия решений от постановки задачи управления геопространственным объектом (ГПО) до организации в полном объеме всего комплекса мероприятий по мониторингу и управлению.

Модель задачи (З) выглядит традиционно [1]:

$$З = <К, Ка, Кт>, \quad (1)$$

где К – необходимое для решения задачи знание об исследуемом объекте и знание о способе решения задачи; Ка – исходная информация (знание) об исследуемом объекте (актуальная модель исследуемого объекта); Кт – требуемая модель исследуемого объекта.

РСДЗЗ должна обладать интерфейсом пользователя, позволяющим формулировать цели, в том числе и нечеткие. Система обеспечивает поддержку различных уровней принятия управленческих решений и, таким образом, пользователей разного типа, преследующих различные цели, что определяет ее многоцелевой характер. РСДЗЗ должна поддерживать процессы постановки задач и принятия решений, включая пользователя в контур управления геопространственным объектом и проявляя в отношении него требуемую активность, что в свою очередь обуславливает неопределенность по целям.

Среди очевидных подзадач задачи управления следует выделить такие, как поиск релевантных по отношению к целям данных, локализацию объекта, мониторинг. В простейшем случае управление направлено на единичный пространственно локализованный (стационарный) объект, изменяются только наблюдаемые атрибуты объекта во времени. В порядке усложнения задачи могут возникать ситуации, когда:

- объект не стационарен в пространстве;
- рассматривается не объект, а класс объектов;
- отслеживается не объект, а процесс, внешним проявлением которого могут быть различные комбинации классов объектов, представленные, например, в виде совокупности тематических карт.

В общем случае при построении РСДЗЗ следует говорить о сверхбольших объемах слабоструктурированных и зачастую несогласованных меж собою исходных данных.

Знание об исследуемом объекте может быть представлено в форме предметной онтологии. Ввиду многоцелевого характера системы речь идет не о единичной онтологии, а об их совокупности. Отметим также необходимость наличия онтологии метауровня, оперирующей общими концептами и отношениями, характерными для геопространственных объектов как таковых.

Неопределенность по целям для РСДЗЗ обуславливает такие свойства системы, как адаптивность и способность к самоорганизации. Процесс формулирования текущей задачи и ее решение – процесс формирования ансамбля простейших решателей второго рода (агентов) и статической структуры ансамбля (процесс самоорганизации) [3]. Таким образом формируется онтология задач, которые система научилась решать.

Анализируя аспекты взаимодействия региональных и федеральных систем, следует отметить общемировую тенденцию к построению РСДЗЗ как элементов инфраструктуры пространственных данных (ИПД) соответствующего уровня. В РФ работы в этом направлении далеко не закончены, однако очевидно, что всякая вновь создаваемая РСДЗЗ должна обеспечить способы взаимодействия с существующей ИПД. Механизм «связывания» ИПД различного уровня может быть обеспечен за счет использования онтологий, в этой связи обсуждается понятие геоонтологии [4; 5].

Список литературы

1. Цибульский Г.М. Мультиагентный подход к анализу изображений: монография. Новосибирск: Наука, 2005. 188 с.

2. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.

3. Вовк А.А., Цибульский Г.М., Латынцев А.А. Технология формирования обобщенного «и/или» дерева решения задач анализа изображений. Исследование скорости сходимости процесса формирования обобщенного «и/или» дерева // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2009. Т. 2, № 1. С. 32–48.

4. Онтологическое моделирование и публикация данных об особо охраняемых природных территориях / К.А. Кузнецов и др. // Труды 14-й Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL-2012, Переславль-Залесский, Россия, 15–18 октября 2012 г. Переславль-Залесский, 2012.

5. Мясникова С.И. Геоонтология создания серии карт муниципальных районов // Геодезия и картография. 2012. № 12. С. 41–48. Библиогр.: с. 48 (8 назв.). – ISSN 0016-7126.

УДК 528.7, 528.87

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

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

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF MULTISPECTRAL HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

Aleksander P. Guk[2], Larisa G. Evstratova[2]
[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: guk_ssga@mail.ru
[2]Moscow State University
e-mail: lge_21@mail.ru

Намечены пути решения проблемы эффективной обработки космических снимков высокого разрешения. Обсуждаются алгоритмы, методы и технологии фотограмметрической обработки снимков, автоматизированного и автоматического дешифрирования. Приводятся примеры разработанных методик и технологий.

Ключевые слова: космические снимки высокого разрешения, автоматизация дешифрирования, дешифровочные признаки, алгоритмы.

Появление космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, предназначенных для коммерческого использования, произвело кардинальные изменения в сфере их использования. Что в свою очередь потребовало разработать принципиально новый подход к обработке таких снимков, так как космические снимки высокого разрешения имеют другую структуру и свойства по сравнению со снимками среднего и низкого разрешения.

С точки зрения обработки отличительными особенностями, характеризующими снимки высокого разрешения, являются:

1. Высокая геометрическая точность изображения, обеспечивающая получение координат точек местности с ошибкой 1–0,5 метра на местности. Это требует специальной фотограмметрической обработки снимков, использования строгой модели определения координат точек местности, надежного алгоритма идентификации опорных точек, высокоточного ортотрансформирования снимков.

2. Иная структура изображения на космических снимках высокого разрешения, по сравнению со снимками среднего и низкого разрешении. Для дешифрирования таких снимков нужно выполнить исследования новых свойств изображения и разработать соответствующие алгоритмы и методики.

3. Возможность выполнения мониторинга различного уровня детальности. Возникает необходимость совместной обработки снимков различного разрешения, полученных различными съемочными системами и в разное время.

Таким образом, назрела новая проблема в области фотограмметрической обработки и методов дешифрирования снимков – проблема эффективной обработки снимков высокого разрешения.

Для решения этой проблемы нужно:

– разработать методику фотограмметрической обработки снимков высокого разрешения;

– разработать новый подход к автоматизированному и автоматическому дешифрированию космических снимков высокого разрешения;

– разработать методы, алгоритмы и технологии мониторинга территорий по космическим снимкам высокого и среднего разрешения.

С 80-х годов прошлого века на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА под руководством авторов выполняются интенсивные исследования в области цифровой обработки аэрокосмических снимков.

В области классической фотограмметрии были проведены следующие работы: калибровка устройств получения цифрового изображения по аналоговым аэрофотоснимкам; калибровка цифровых съемочных камер; разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для цифрового трансформирования и ортотрансформирования снимков; разработка теории и алгоритмов, обеспечивающих работу цифрового стереоплоттера; разработка алгоритмов цифровой фототриангуляции и методов обработки сканерных снимков.

Авторами была предложена теория цифровой обработки снимков, основанная на новом подходе: цифровая многоспектральная съемочная систем рассматривается как измерительная не только в геометрическом, но и в фотометрическом плане. В рамках этой теории было введено понятие «внутренняя метрическая точность изображения» – точность, характеризуемая случайными ошибками снимка, которые зависят от съемочной системы и не может быть улучшена за счет использования математической модели обработки данных [1]. В соответствии с предложенной теорией в конце 90-х годов был разработан комплекс программ, выполняющих весь комплекс фотограмметрических работ, который был реализован в цифровом стереоплоттере SDS (представлен и получил одобрение на международной выставке XYIII конгресса ISPRS в Вене в 1996 году).

Выполненные работы в области дешифрирования многозональных аэро- и космических включают:

– исследования дешифровочных свойств снимков;

– разработка новых алгоритмов, методик и технологий.

Были изучены различные дешифровочные признаки изображения объектов на космических снимках. Установлено, что поэлементная обработка яркостей на многоспектральных снимках при автоматизированном дешифрировании снимков не является эффективной вследствие существенного влияния на яркости внешних факторов. Также было установлено, что структурные признаки являются более устойчивыми, характеризуют внутренние свойства изображений объектов, непосредственно связанных с его структурой и практически не изменяется во времени. Такие признаки получают путем Фурье преобразования, вейвлет-преобразования, путем преобразования с использованием специально заданных базисных функций различного вида (например, сферических функций). Численными характеристиками структурных признаков являются коэффициенты при базисных функциях. В дискретном случае – это матрица или матрицы коэффициентов. Для вейвлет-преобразования – это матрицы коэффициентов при базисных функциях для каждого масштабного уровня преобразования. Сложность заключается в математической формализации структурных признаков. Интересные результаты удалось получить при преобразовании многоспектральных изображений с целью перейти от исходных измерений спектральных яркостей к независимым компонентам (метод главных компонент, метод Tasseled Cap и метод независимых компонент) [2].

В докладе также рассматриваются некоторые из предложенных алгоритмов автоматизированного и автоматического дешифрирования снимков, технологии и результаты их применения при решении следующих задач:

– выделения границ лесных массивов и лесных вырубок на основе использования вэйвлет преобразования;

– оперативной оценки породного состава лесных насаждений путем автоматической классификации многоспектральных космических снимков с использованием коэффициентов Tasseled Cap;

– привязки разномасштабных разновременных космических снимков, полученных съемочными системами различного типа;

– определения некоторых таксационных характеристик лесных массивов – размеры крон, породы и т. д.;

– мониторинга городских территорий на основе анализа сверхплотных цифровых моделей поверхностей (ЦМП) и цифровых моделей рельефа (ЦМР);

– исследования артефактов по космическим снимкам с использованием геометрических признаков;

– мониторинга лесных массивов.

В качестве примера приведем алгоритм идентификации точек на разномасштабных разновременных снимках, полученных различными съемочными системами. Была разработана и исследована методика идентификации точек на снимках различных масштабов и полученных камерами различного типа [3]. Методика основана на применении известного алгоритма SIFT и реализована в виде отдельного модуля для комплекса ENVI (рис. 1).

Для мониторинга территорий предложена новая методика оперативного дешифрирования на основе вейвлет-анализа и модифицированного метода Tasseled Cap. Также предложен и исследован новый метод дешифрирования снимков по статистическим эталонам.

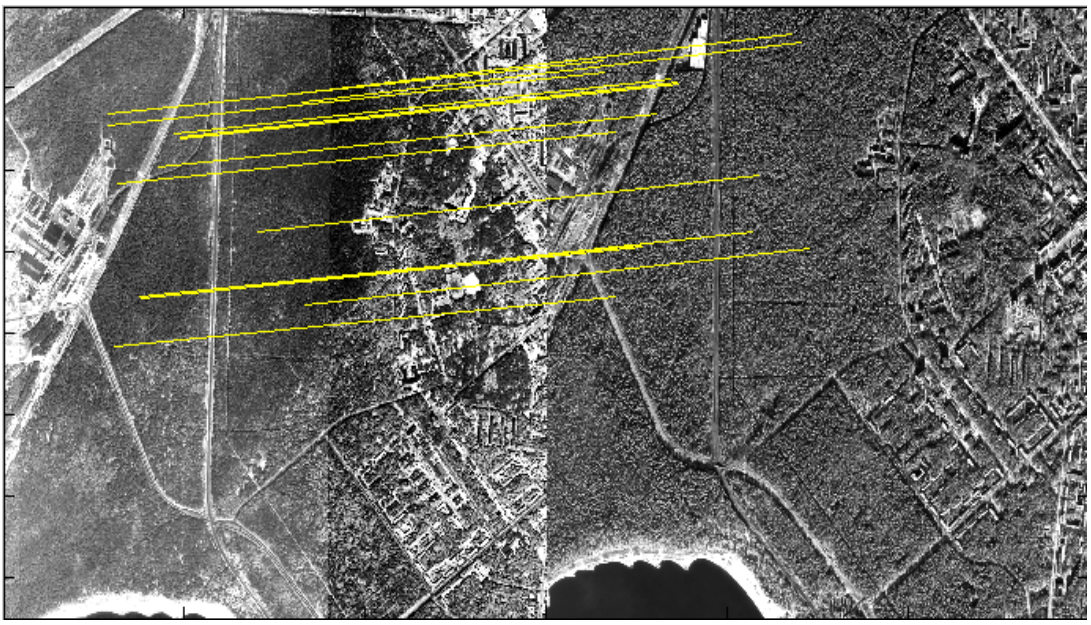


Рис. 1. Идентификация точек на космических снимках

В заключение следует особо подчеркнуть, что *только переход к автоматическим методам дешифрирования* позволит обеспечить качественный скачок в использовании средств дистанционного зондирования и повысить эффективность их применения.

Список литературы

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

2. Разработка методик автоматизированного дешифрирования космических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках [Текст] / А.П. Гук, Л.Г. Евстратова, Е.П. Хлебникова, М.А. Алтынцев, С.А. Арбузов, А.С. Гордиенко, А.А. Гук // Геодезия и картография. 2013. № 7. С. 31–40.

3. Гук А.П., Йехиа Хассан, Мики Хассан. Автоматический выбор и идентификация характерных точек на разновременных разномасштабных аэрокосмических снимках [Текст] // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 2. С. 63–68.

УДК 504.064.37:528.8

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВНОГО ОБЪЕМА ПРОРЫВООПАСНЫХ ВЫСОКОГОРНЫХ ОЗЕР

В. Г. Коновалов, В. А. Рудаков
Институт географии РАН, Москва, Россия
e-mail: vladgeo@gmail.com

Цифровая модель рельефа и дистанционное зондирование озер и использованы для мониторинга и расчета параметров их наполнения (площадь, глубина, потенциальный резервный объем).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, прорывоопасные озера, цифровая модель рельефа, мониторинг.

Введение

Прорывы подпруженных высокогорных озер относятся к классу опасных гидрологических явлений [1]. Антологии этих событий, например [2–6] показывают, что они широко распространены в горных областях Земли. В ряде случаев следствием данных опасных явлений становятся человеческие жертвы и разрушения жилых и производственных сооружений.

По повторяемости рассматриваемые опасные явления можно разделить на систематические и регулярные (например, ежегодные прорывы озер: Мерцбахера (Тянь-Шань), Тальсеква и Джордж – оба на Аляске), число которых значительно меньше, чем первых. Весьма существенная разница между ними состоит в том, что регулярные и соответственно удобные для исследований события происходят через постоянные промежутки времени, а для систематических опасных явлений эта закономерность не свойственна, что затрудняет их постоянное изучение, мониторинг и прогноз методами обработки материалов аэрофотосъемки и наземных наблюдений. В связи с этим в работе предлагаются способы использования спутниковых изображений и цифровых моделей рельефа SRTM 4.1 и ASTER G2 DEM для мониторинга и оценки параметров, рассматриваемых гидрологических опасных явлений независимо от их повторяемости.

Оценка резервного объема высокогорных озер

Степень влияния плотины на естественный режим стока из вышележащего озера можно охарактеризовать таким критерием как наличие или отсутствие поверхностного стока из озерной котловины. В первом случае плотина не является препятствием для естественного руслового стока, во втором служит потенциальным источником образования резервного объема воды ΔV в озерной котловине вследствие форс-мажорного или систематически увеличивающегося ее объема. Величина ΔV в пределе равна разности между объемами озера при возможном наполнении до максимальной высоты плотины и при современном уровне озера. Причиной систематического увеличения объема высокогорного озера может быть регулярный рост притока воды вследствие повышенных осадков и/или таяния ледников и снега в бассейне озера, а также ухудшение условий фильтрации воды сквозь плотину.

Оценки двух форм влияния плотин на режим высокогорных озер получены на примере бассейна р. Гунт (правый приток Пянджа – основной составляющей р. Амударьи) с помощью дистанционных изображений со спутника TERRA (сканер ASTER), цифровой модели рельефа (ЦМР) и компьютерной программы Global Mapper v. 15. Анализ трендов изменения средней летней температуры воздуха Ts и суммы осадков Ру за характерные периоды октябрь-апрель и июнь-август в 1951–2006 гг. выполнен по данным 13 метеостанций Памира в интервалах: высоты 329–3747 м н. у. м,

широты 36,73°–37,43° N, долготы 68,56°–72,63° E. На всех метеостанциях отмечено устойчивое синхронное возрастание Ts (см. рис. 1), а также однообразный положительный тренд изменения суммы осадков за октябрь–апрель и июнь–август. Оба этих фактора благоприятствуют увеличению объема прорывоопасных озер.

Расчет и мониторинг параметров прорывоопасных озер

Для оценки резервного объема высокогорных озер применяются следующие операции:

1. Оцифровка контура озера в географических координатах на изображениях со спутника TERRA или в сервисе GOOGLE EARTH PRO и наложение полученного контура на ЦМР района, загруженную в программе Global Mapper.

2. Далее в среде Global Mapper выполняем процедуры:

а) расчет максимальной высоты подпруживающей плотины относительно уреза воды (см. рис. 3);

б) определение длины AC заданного профиля, длины L между отметками начала и конца озера и ее половины m_1 или m_2 (рис. 2–3);

в) определение разности ΔZ высоты в точках начала озера и конца профиля (отрезок CD на рис. 2);

г) определение площади озера при современном уровне и наполнении его до верха плотины (рис. 4);

д) расчет максимальной глубины озера (отрезок BE на рис. 2);

е) расчет резервного объема озера как разности между объемами потенциального заполнения котловины озера до высоты плотины при современных и возможных будущих значениях площади и глубины озера.

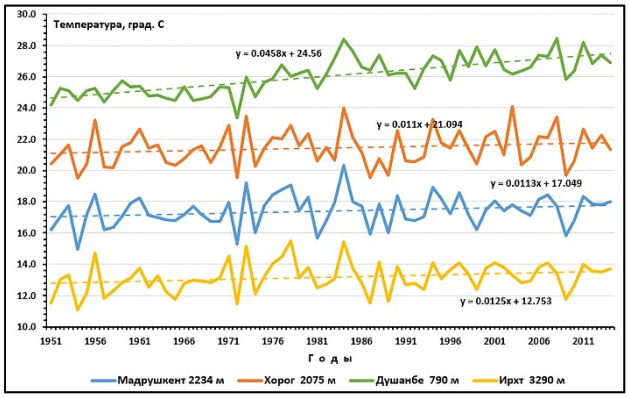


Рис. 1. Температура воздуха Ts на Памире

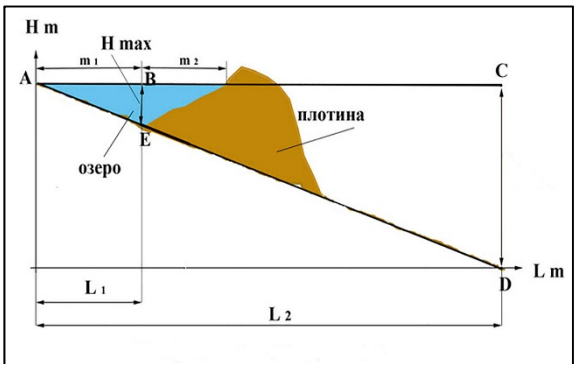


Рис. 2. Профиль рельефа по тальвегу долины

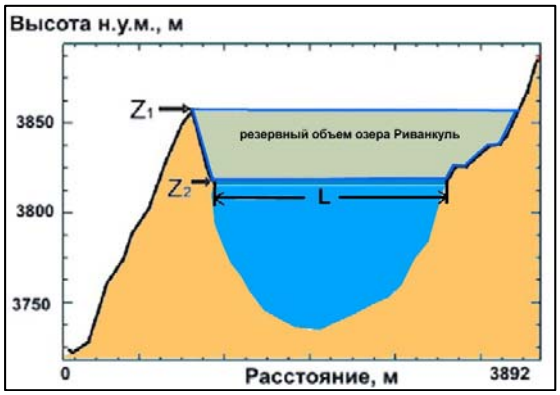


Рис. 3. Профиль высоты для оз. Риванкуль. Высота плотины = $Z_1 – Z_2$, L – длина озера

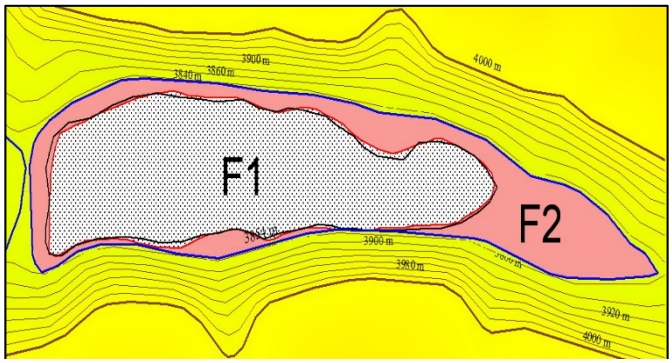


Рис. 4. Изменение площади оз. Риванкуль. F1 – современная и F2 – возможная площадь

На рис. 1–4 представлены: 1) многолетнее изменение температуры воздуха на метеостанциях Памира; 2) иллюстрация к расчету максимальной глубины высокогорного озера по материалам дистанционного зондирования и ЦМР; 3) вертикальный профиль рельефа для бассейна озера Ривaнкуль; 4) изменение площади озера Ривaнкуль в зависимости от высоты подпруживающей плотины над урезом воды.

Потенциальный резервный объем трех озер (Ривaнкуль, Зардив и Чапдара) при соответственных значениях увеличения площади на 0,65 км^2, 0,79 км^2 и 0,16 км^2 и превышения плотины над современным уровнем воды 38 м, 72 м, 6 м составил 24,2 млн м^3 (56,9 %), 31,0 млн м^3 (153,6 %), и 0,73 млн м^3 (1,0 %). Здесь в скобках указана доля ΔV от современного объема. Наибольшую опасность представляет, полностью заполненное озеро Ривaнкуль, прорывная волна которого и вызванный ею сель достигнет г. Хорог.

Определение глубины и объема озер

Расчет максимальной глубины озер в бассейне Гунта выполнен двумя способами. Первый, изложенный в работе [7], основан на принятии следующих положений: (1) максимальная глубина озера находится вблизи середины озера, (2) продольный вертикальный профиль глубины озера от его начала и до подпруживающей плотины может быть аппроксимирован полуэллипсом, вписанным в прямоугольный треугольник. Оба этих положения основаны на обобщении результатов батиметрических съемок высокогорных озер. Основанием для второго способа служит условие геометрического подобия треугольников ABE и ACD (см. рис. 2), параметры которых для заданного контура озера и его окрестности определяем в среде Global Mapper (см. п. 2.1). Поскольку в данном и аналогичных случаях коэффициент подобия $Kp = L_1/L_2$, максимальная глубина Dmax (отрезок BE на рис. 2) на середине длины озера равна произведению $\Delta Z \bullet Kp$. Смысл L_1 и L_2 понятен из рис. 2. Несмотря на различия в обосновании обоих способов определения Dmax, они дают близкие результаты. Для пересчета Dmax в среднюю глубину озера Dmean получена [8] эмпирическая формула $D\text{mean} = D\text{max}/2{,}78$ размерность метры.

Объем высокогорных озер V служит одной из основных характеристик для мониторинга их размеров, расчета и прогноза гидрологического режима озер. Очень часто расчет V выполняют (например, [8–9; 11 и мн. др.] по весьма упрощенным эмпирическим формулам в виде $V = aF^b$ или уравнений регрессии $V = f(k, F)$. Здесь F – площадь озера; a, b, k – параметры, которые однозначно зависят от размера и состава эмпирической выборки. Поскольку площадь F является одним из ряда факторов (глубина, периметр, коэффициент формы, отношения параметров морфометрии и др.), определяющих объем озера, при построении эмпирической зависимости $V = V(F)$ необходимо использовать значения F, удовлетворяющие принципу «при прочих равных условиях». Несоблюдение этого принципа неизбежно приведет к появлению завышенной или «ложной» корреляции. Так, в работе [9] формула $V = aF^b$ была получена по данным о V и F для 15 озер, причем для 13 из них площадь была неравномерно распределена в интервале 0,0035–1,6 км^2, а площадь остальных двух была 5 км^2 и 6 км^2. Очевидна неоднородность состава эмпирической выборки и ограниченность ее размера. Другие параметры в формуле типа $V = aF^b$ были найдены [8] по данным V и F для 32 озер на Кавказе, при этом площадь 31 озера изменялась от 0,00036 км^2 до 0,065 км^2. Площадь 32-го озера была равна 0,149 км^2 и она существенно повлияла на вид и параметры уравнения для расчета объема как функции площади. Ранее в работе [7] была подготовлена база данных по 141 озеру, расположенных в различных регионах Земли. Теперь число озер в этой базе увеличено до 158 и формула вида $V = aF^b$ (размерность V млн м^3) была получена для интервалов площади F, перечисленных в таблице.

Решающим аргументом при выборе эмпирической формулы $V = V(F)$ служит ее проверка на независимых данных. Впервые такая проверка выполнена по материалам батиметрических измерений объема 25 озер на Тянь-Шане [10], площади которых изменялись от 0,007 км^2 до 1,4 км^2. Были использованы формулы $V = aF^b$ из работ [8]

(475,6 %), [9] (478,4 %), [11] (482,7 %) и наша для интервала 0 <= F < 1,0 из таблицы (179,0 %). Здесь после ссылки на источник дана средняя относительная ошибка расчета объема озер. Как видно, наилучшие результаты проверки показала наша формула, поскольку она менее всего завышает величину объема.

Таблица

Исходные данные и параметры уравнений $V = aF^b$ для расчета объема озер

Заданные пределы F	N	Пределы в выборке, км^2		Параметры $V = V(F)$		R^2	F, км^2 (P = 85 %)
		min	max	a	b		
F < 0,1	86	0,00004	0,1	9,57	1,226	0,92	0.033 (73)
0 < F < 0,4	115	0,00004	0,4	12,28	1,266	0,94	0.200 (98)
F > 0,1 <= 0,4	29	0,103	0,4	21,47	1,538	0,39	
1,0 <= F < 36	22	1,34	35,8	20,97	1,505	0,82	
0 <= F < 1,0	136	0,00004	0,96	13,77	1,285	0,94	0.440 (116)

Условные обозначения: N – число случаев; R^2 – коэффициент детерминации; Fкм^2 (P = 85 %) – верхний предел величины F, для которой интегральное распределение $P(F)$ = 85 %, в скобках дано число случаев с Fкм^2 ≤ верхнего предела.

Заключение

Множество высокогорных озер разнообразных форм, размеров и генезиса служит одним из элементов ландшафта на всех континентах Земли. Потенциально наиболее прорывоопасными могут быть моренные и моренно-ледниковые озера. Площадь и объем озер, превышение подпруживающей плотины над урезом воды и условия стока из них следует использовать в качестве критериев прорывоопасности. Показано, что эти критерии легко поддаются оценке с помощью ЦМР и спутниковых изображений.

Предложены и проверены формулы для расчета глубины и объема озер для нескольких интервалов их площади. Параметры и резервный объем озер определены на примере бассейна р. Гунт, где по данным [12], находится 428 озер площадью ≥ 2500 м^2.

Список литературы

1. ГОСТ Р 22.1.08–99. Государственный стандарт Российской Федерации. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. Разработчик Росгидромет. Статус документа действующий. Дата последнего изменения: 19.04.2010.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 319 с.
3. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 143 с.
4. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 154 с.
5. Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods in Nepal. Kathmandu, ICIMOD, 2011. 109 p.
6. Устойчивость горных озер Центральной Азии. Риски воздействия и принятие мер. UNEP RRC. Bangkok. Thailand. Ашхабад, 2006. 134 с.
7. Коновалов В.Г. Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. Вып. 4. С. 80–89.
8. Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер: автореф. дис. … канд. М.: МГУ, 2014. 29 с.
9. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps / C. Huggel, A. Kääb, W. Haeberli, P. Teysseire and F. Paul // Canadian Geotechnical Journal. 2002. 39 (2). Pp. 316–330.
10. Шнитников А.В. (ред.) Озера Тянь-Шаня и их история. Л.: Наука, 1980. 230 с.
11. Anacona P. I., Norton K.P., and Mackintosh A. Moraine-dammed lake failures in Patagonia and assessment of outburst susceptibility in the Baker Basin // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014, 14. Pp. 3243–3259. doi:10.5194/nhess-14-3243–2014
12. Mergili M. and Schneider J. F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011, 11. Pp. 1447–1462. doi:10.5194/nhess-11-1447–2011

УДК 528.88

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ХАНТЫ-МАНСИЙСКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ

Г. А. Кочергин
Автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»
e-mail: KocherginGA@uriit.ru

Статья посвящена вопросам практического использования данных дистанционного зондирования Земли и других результатов космической деятельности в региональном Центре космических услуг Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Рассмотрены основные направления деятельности по актуальным для региона направлениям: тематическая обработка и анализ космических снимков с целью решения задач экологического мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: Центр космических услуг, результаты космической деятельности, данные дистанционного зондирования Земли, геоинформационные технологии, экологический спутниковый мониторинг.

Введение

Региональный Центр космических услуг Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ЦКУ) был создан 18 сентября 2013 года распоряжением Правительства автономного округа на базе Автономного учреждения «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий» (ЮНИИ ИТ). Одной из главных целей создания ЦКУ является 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.

Основными предпосылками создания ЦКУ стали необходимость проведения объективного дистанционного мониторинга экологического состояния окружающей среды и моделирования чрезвычайных ситуаций, характерных для территории автономного округа. Около 50 % территории автономного округа покрыто лесной растительностью, поэтому лесные пожары и незаконные рубки леса являются серьезной экологической и экономической проблемой нашего региона. Ежегодно тысячи гектаров леса уничтожаются или подвергаются негативному воздействию, как вследствие природных, так и антропогенных факторов. Кроме того, вследствие интенсивной разработки нефтяных месторождений на территории автономного округа остро стоит вопрос оценки воздействия факельных установок (ФУ) по сжиганию попутного нефтяного газа (ПНГ) на экосистемы региона. Еще одной немаловажной задачей является оперативное выявление новых нефтезагрязнений почвы, а также картографирование существующих нефтезагрязненных участков, определение их возраста и степени рекультивации.

На территории автономного округа расположено более 250 тысяч озер и болот. Речную сеть формируют реки Обь и Иртыш совместно с притоками и множеством мелких речек. В связи с этим задачи спутникового мониторинга водного хозяйства, среди которых мониторинг паводковой обстановки, мониторинг состояния береговых линий и их изменения вследствие активных русловых процессов также стоят в числе приоритетных.

Задачи спутникового мониторинга

С учетом специфики нефтедобывающего региона приоритетным направлением деятельности ЦКУ является разработка технологий экологического мониторинга окружающей среды на основе данных дистанционного зондирования Земли и других результатов космической деятельности с использованием геоинформационных систем. В качестве наиболее востребованных разработок Центра можно выделить спутниковый мониторинг лесного хозяйства, водного хозяйства, факельных установок, нефтяных загрязнений.

Территория автономного округа занимает значительную площадь, сравнимую с крупнейшими европейскими государствами, и при этом имеет достаточно редкую сеть коммуникаций, что требует использования дистанционных методов мониторинга природных и техногенных объектов. Использование космической съемки позволяет успешно решать следующие задачи:

- оперативное выявление и картографирование лесных вырубок;
- выявление и картографирование выгоревших участков леса;
- картографирование факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа;
- выявление и картографирование участков нефтезагрязнений;
- оперативный мониторинг паводковой обстановки в период весенне-летнего половодья;
- анализ изменения береговых линий вблизи населенных пунктов.

Далее рассмотрим подробнее решаемые в Центре космических услуг задачи спутникового мониторинга.

Оперативное выявление и картографирование лесных вырубок

Мониторинг рубок лесных насаждений проводится ежегодно в зимний период с декабря по апрель. Для решения данной задачи нами разработан алгоритм выявления лесных вырубок, который основан на анализе изменений подстилающей поверхности путем сравнения двух разновременных космических снимков Landsat-8. Для этого формируется мультиспектральное изображение, состоящее из панхроматических каналов с диапазоном длин волн 0,5–0,68 мкм и пространственным разрешением 15 м, отснятых за разные даты в период устойчивого снежного покрова. Все изменения на местности, произошедшие за период времени между съемками, будут отчетливо выделяться на построенном таким образом мультивременном композите ярко-красным цветом. Это связано с тем, что лес имеет низкие значения яркости, а снег – высокие, и при появлении вырубки спектральная яркость территории значительно повышается. Понижения яркости, напротив, отражаются синими тонами (тени от облаков, расчищенные участки оголенной земли и т. д.). На заключительном этапе производится заполнение таблицы атрибутов векторного слоя контуров лесных рубок, в которую вносится следующая информация: дата последнего обнаруженного отсутствия вырубки, дата обнаружения вырубки, временной интервал обнаружения, площадь вырубки, номер лесного квартала, обозначение выдела, наименование арендатора территории.

Выявление и картографирование выгоревших участков леса

Для анализа космических снимков с целью выявления и картографирования лесных гарей используется разработанный в ЦКУ алгоритм автоматизированной обработки космических снимков, основанный на использовании нормализованного индекса сгорания – NBR (Normalized Burn Ratio), который позволяет провести оценку площадей сгоревшей растительности. В качестве исходных данных для расчета NBR используются ближний инфракрасный и дальний инфракрасный каналы со спутника Landsat-8 с диапазонами длин волн 0,76–0,9 мкм и 2,08–2,35 мкм соответственно.

Выбор этих каналов обусловлен тем, что ближний инфракрасный канал позволяет оценить содержание хлорофилла в живой растительности, в то время как дальний инфракрасный канал чувствителен к отдельным нефотосинтезирующим (мертвым) деревьям, золе и обугленной древесине на пожарищах. Таким образом, использование NBR позволяет проследить изменения подстилающей поверхности от живой вегетирующей растительности к такому состоянию почвы, которое возникает после пожара. Для создания векторного слоя лесных гарей используются космические снимки за летний период.

Картографирование факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа

Для выявления и картографирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа в ЦКУ разработан алгоритм автоматической обработки и анализа космических снимков Landsat-8. В основе алгоритма лежит процедура пересчета спектральных яркостей инфракрасных каналов – ближнего инфракрасного (0,85–0,88 мкм), коротковолнового инфракрасного (2,11–2,29 мкм) и теплового инфракрасного (11,5–12,51 мкм) с целью выявления пикселей открытого пламени, определения местоположения и картографирования их контура. Разработанный алгоритм в автоматическом режиме обнаруживает места с аномальными температурами, которые могут быть идентифицированы как пожары, а в случае многократного повторного обнаружения (2 и более раз) в одном и том же месте их можно идентифицировать как ФУ по сжиганию ПНГ или другие неподвижные техногенные объекты с высокотемпературными выбросами. На заключительном этапе проводится визуальная верификация выявленных объектов, соответствующих работающим факельным установкам, создание векторного слоя и наполнение таблицы атрибутов для каждой выявленной факельной установки. Результаты работы алгоритма верифицируются с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения, в том числе с российских спутников Канопус-В и Ресурс-П.

Выявление и картографирование участков нефтезагрязнений

Для выявления нефтяных загрязнений на почве используется разработанный нами алгоритм дешифрирования космических снимков Landsat-8, в основе которого лежит классификация с использованием обучающих выборок, которые, в свою очередь, строятся на основе анализа космических снимков более высокого пространственного разрешения, например Канопус-В и Ресурс-П. Задача дешифрирования нефтезагрязнений по космическим снимкам является одной из наиболее трудоемких и наименее автоматизируемых. Для верификации результатов обработки и тематического анализа космических снимков сотрудники ЦКУ выезжают на полевые работы, в ходе которых выборочно проводится визуальная заверка фактов нефтезагрязнений на территории лицензионных участков и отбор проб с целью проведения лабораторного анализа и определения концентрации загрязняющих веществ в почве. Результатом работы является векторный слой контуров нефтезагрязнений и соответствующая ему таблица атрибутов.

Оперативный мониторинг паводковой обстановки в период весенне-летнего половодья

Для решения задач спутникового мониторинга рек Обь-Иртышского бассейна в период весенне-летнего половодья используются космические снимки MODIS со спутников TERRA и AQUA. Нами разработан алгоритм, позволяющий ежедневно в автоматическом режиме проводить классификацию мультиспектральных снимков MODIS с пространственным разрешением 250 м с целью выделения облачности, снежного покрова и водной поверхности. Результаты классификации снимков MODIS дополняются результатами классификации снимков Landsat-8 с разрешением 30 м в случае наличия таких снимков на зону подтопления. Результаты анализа космических

снимков ежедневно в период с 1 апреля по 31 июля публикуются на геопортале Центра космических услуг, что позволяет в оперативном режиме отслеживать процессы таяния снежного покрова, вскрытия рек и затопления пойменных территорий.

Анализ изменения береговых линий вблизи населенных пунктов

Для решения задач анализа изменений береговых линий используются разновременные архивные и актуальные космические снимки высокого пространственного разрешения. Нами разработана технология анализа космических снимков, которая позволяет выявлять места активных русловых процессов вблизи населенных пунктов автономного округа, расположенных на реках Обь и Иртыш, и оценивать скорость разрушения береговой линии. Технология основана на использовании космических снимков с пространственным разрешением не хуже 1 м.

Представление результатов спутникового мониторинга

В Ханты-Мансийском автономном округе разработана и введена в эксплуатацию государственная информационная система «Территориальная информационная система Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» (ТИС Югры), которая предназначена для сбора, хранения, обработки и представления информации с целью информационного и научно-аналитического обеспечения решения задач, связанных с управлением социально-экономическим развитием автономного округа, в том числе обеспечения информацией для оперативного управления работой по предотвращению чрезвычайных ситуаций. Во исполнение Закона Ханты-Мансийского автономного округа от 1 июля 2013 года № 61-оз «О государственных информационных системах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» все информационные ресурсы, в том числе представляющие результаты тематической обработки космических снимков, созданные за счет средств бюджета автономного округа подлежат интеграции с ТИС Югры. Таким образом, для оперативного доступа органов государственной власти и лиц принимающих управленческие решения результаты тематической обработки космических снимков конвертируются в векторный формат данных, дополняются необходимыми атрибутивными данными и публикуются с использованием картографических сервисов на геопортале Центра космических услуг https://geoportal.uriit.ru и в геоинформационной подсистеме ТИС Югры.

Заключение

По результатам работы Центра космических услуг можно отметить повышение интереса к данным дистанционного зондирования Земли и другим результатам космической деятельности, в первую очередь сотрудников Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), Службы по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений ХМАО-Югры (Природнадзор Югры), природоохранной прокуратуры и следственного отдела по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югры. Результаты обработки космических снимков активно используются ими при проведении проверок и выявлению нарушений в сфере лесного и водного законодательства. Результаты мониторинга паводковой обстановки используются Главным управлением МЧС России по ХМАО-Югре при реализации плана противопаводковых мероприятий.

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

УДК 528.8.044.2:63

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

Е. А. Балдина[(1)], П. В. Денисов[(2)], М. А. Лысаков[(3)], А. С. Мартьянов[(1,2)], М. Ю. Пучков[(3)], К. А. Трошко[(1,2)]

[(1)]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

[(2)]Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»

[(3)]Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого овощеводства и бахчеводства

e-mail: baldina@geogr.msu.su, denisov@ntsomz.ru, rosecostroi@mail.ru

В летний период 2014 г. проведена четырёхкратная поляриметрическая съёмка участка дельты Волги радиолокатором С-диапазона Radarsat-2. В сроки, совпадающие и близкие к срокам проведения съёмки, выполнены наземные обследования неиспользуемых сельскохозяйственных угодий (залежей) на выбранном участке. В работе представлены результаты определения степени зарастания залежей травянистой и древесно-кустарниковой растительностью по радиолокационным данным и оценка точности результатов с опорой на данные наземных обследований.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование Земли, Radarsat-2, поляриметрия, сельское хозяйство, залежи, дельта Волги.

Введение. Во всём мире активно ведутся работы по исследованию возможностей радиолокационных данных для решения задач сельского хозяйства: картографирования типов сельскохозяйственных угодий и произрастающих на них культур, контроля состояния посевов, прогнозирования урожая, оценки влагосодержания почв и др. Существенно в меньшей степени такие данные используются для выявления и оценки состояния выпавших из обработки пахотных земель – залежей, которые являются резервом для расширения посевных площадей.

За два последних десятилетия в России было выведено из оборота около 30–40 млн га пашни [1]. В настоящее время эти земли трансформируются под влиянием различных факторов в зависимости от региональных особенностей и продолжительности периода заброшенности. Оценка состояния залежей имеет значение для определения вида мероприятий по рекультивации и мелиорации этих земель при возвращении их в сельскохозяйственный оборот.

Предполагается, что радиолокационные данные в силу высокой чувствительности к геометрическим и диэлектрическим особенностям зондируемой поверхности покажут высокую эффективность в определении состояния залежей. Для проведения эксперимента выбран участок дельты Волги, на котором представлены залежи разного возраста и состояния.

1. Особенности сельского хозяйства дельты Волги. Земли дельты Волги традиционно использовались для ведения сельского хозяйства. С 1960-х гг. основной отраслью сельского хозяйства становится орошаемое растениеводство, которое достигло максимальных масштабов к середине 1980-х гг. Специфической особенностью ведения сельского хозяйства в этом регионе являлось обвалование значительной части территории, т. е. ограждение площади от затопления во время половодья путем создания систем из земляных валов и рвов.

В результате аграрной реформы начала 1990-х гг. значительная часть орошаемых угодий оказалась заброшенной. После прекращения орошения на обвалованных землях с нарушенным водным режимом началось развитие процессов деградации почвенно-растительного покрова: засоление, опустынивание, пастбищная дигрессия, зарастание древесно-кустарниковой растительностью, в т. ч. галофитной [2].

2. Используемые данные. Спутниковые радиолокационные данные получены в рамках международной образовательной программы Канадского космического агентства SOAR-EI (проект №5137). Было запланировано четырёхкратное получение поляриметрических данных в период с 4 июня по 15 августа 2014 г. Съёмка проводилась с интервалом в 24 дня при идентичных параметрах для уменьшения влияния факторов, не связанных с изменениями местности.

В сроки, совпадающие и близкие к срокам проведения радиолокационной съёмки, авторами проводились наземные обследования участка дельты Волги. Основной объект исследования – залежи разного возраста и степени нарушенности. С учетом специфики решаемой задачи и особенностей радиолокационных снимков (чувствительность к влагосодержанию, шероховатости) был разработан подробный типовой план описания элементарных площадок, включающий запись следующих параметров: дата обследования, номер элементарной площадки, географические координаты, номера фотографий, вид сельскохозяйственного угодья, особенности рельефа, характеристики растительного покрова (виды, стадия вегетации, высота, проективное покрытие или количество (деревья и кустарники), характеристики почвенного покрова (степень увлажнения, проявления пастбищной дигрессии). Материалы наземных обследований после систематизации использовались для оценки достоверности результатов обработки радиолокационных данных.

3. Обработка радиолокационных данных. Для выбора оптимальных параметров обработки радиолокационных данных с целью картографирования состояния залежей проведён ряд экспериментов.

Влияние алгоритмов фильтрации спекл-шума на возможности дешифрирования состояния залежей. Необходимость предварительной фильтрации изображения обусловлена наличием дефекта изображения – зернистости, называемой спеклом. Проведено сравнение нескольких алгоритмов фильтрации спекл-шума [3] применительно к задаче автоматического выделения участков залежей с различной степенью зарастания. Для эксперимента использовалось одиночное изображение в перекрёстной поляризации. Каждый результат фильтрации был подвергнут неконтролируемой классификации методом K-means с выделением двух классов, соответствующих участкам с выраженной вегетирующей растительностью и практически лишённых её. Достоверность классификации вычислялась по отношению количества правильно распознанных пикселов к их общему количеству, также рассчитывался коэффициент каппа, учитывающий поправку на случайность [4] (табл. 1, значения каппы указаны в скобках).

Фильтры Mean, Lee, Gamma MAP с одинаковыми размерами окна дают практически идентичные результаты. С небольшим перевесом выигрывает Gamma MAP.

Возможности поляриметрических декомпозиций для дешифрирования состояния залежей. Поляриметрические декомпозиции позволяют выделять участки, на которых в разной степени выражено действие основных механизмов рассеяния радиоволн: однократного, двукратного и объёмного [5]. Для растительного покрова, как правило, характерно объёмное рассеяние, поэтому именно эта компонента использовалась для дальнейшей классификации методом K-means с выделением двух классов. Оценка достоверности проводилась аналогично предыдущему случаю, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Оценка достоверности классификации изображения после фильтрации разными методами

Тип фильтра/ размер окна	Mean	Median	Lee ENL=1	Frost d=2	Gamma MAP ENL=1
3×3	49,55 (0,20)	45,31 (0,15)	50,24 (0,20)	42,29 (0,13)	50,25 (0,20)
5×5	61,03 (0,31)	55,59 (0,25)	61,33 (0,32)	41,99 (0,13)	61,58 (0,32)
7×7	65,56 (0,37)	63,14 (0,33)	66,01 (0,37)	40,48 (0,12)	66,75 (0,38)

Таблица 2

Оценка достоверности классификации компонентов объёмного рассеяния

Pauli, линейные значения	Pauli, дБ	Freeman-Durden, дБ	Yamaguchi, дБ	van Zyl, дБ
62,16 (0,32)	91,89 (0,79)	91,89 (0,79)	92,79 (0,82)	84,68 (0,65)

Стоит отметить, что классификация изображения, представленного в линейных значениях, имеет куда более низкую достоверность, чем со значениями, выраженными в децибелах. В целом можно заметить, что использование результатов поляриметрических декомпозиций даёт гораздо большую точность, чем одиночные изображения в перекрёстной поляризации.

Влияние алгоритмов классификации на дешифрирование состояния залежей

Проведен эксперимент по выбору оптимального алгоритма классификации изображений [6]. Использовался набор из четырёх разновременных изображений интенсивности в перекрестной поляризации, предварительно прошедших обработку многовременным фильтром. Выбор этого фильтра связан с незначительными изменениями залежей в течение анализируемого периода.

Результативность неконтролируемой классификации оценивалась при задании разного числа классов. Выбор 2 классов позволил разделить участки с вегетирующей растительностью (и травянистой, и древесно-кустарниковой) и с редкими высохшими эфемерами, которые показаны зелёным и бежевым соответственно (рис. 1, *а*). Оптимальный результат даёт выбор 3 классов, при котором дополнительно выделяется древесная и кустарниковая растительность (коричневый), однако в этот класс попадают и некоторые участки, заросшие тростником (рис. 1, *б*); доля правильно распознанных пикселов при этом – 65 %, коэффициент каппа – 0,41. С увеличением числа классов площадь класса травянистой растительности оказывается завышенной (рис. 1, *в*).

Качество контролируемой классификации на основе эталонов, выбранных по данным наземных обследований, зависит от выбора метода. Для классификации по методу параллелепипеда характерно большое количество неклассифицированных пикселов (рис. 2, *а*). Метод минимального расстояния с выделением трех классов

(рис. 2, *б*) обеспечивает достоверность 76 % при коэффициенте каппа 0,53. Наибольшая достоверность дешифрирования в 83 % при коэффициенте каппа 0,63 была достигнута при классификации по методу опорных векторов с ядром на основе радиальных базисных функций с выделением трех классов.

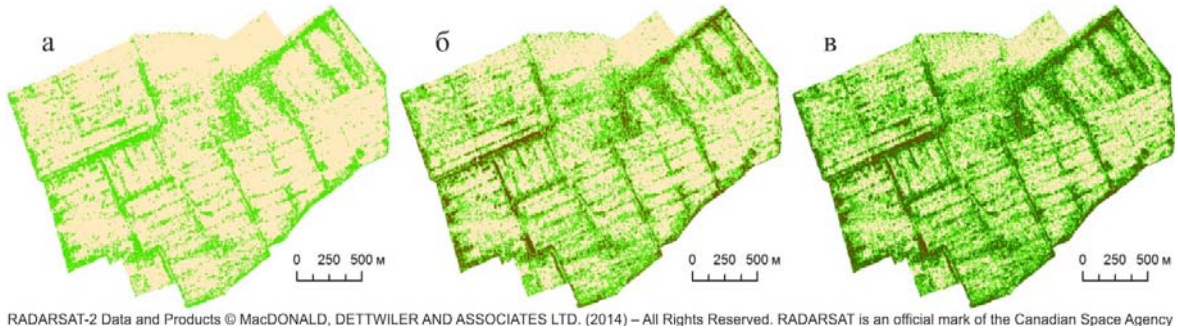


Рис. 1. Результаты неконтролируемой классификации методом K-means: *а* – 2 класса; *б* – 3 класса; *в* – 4 класса

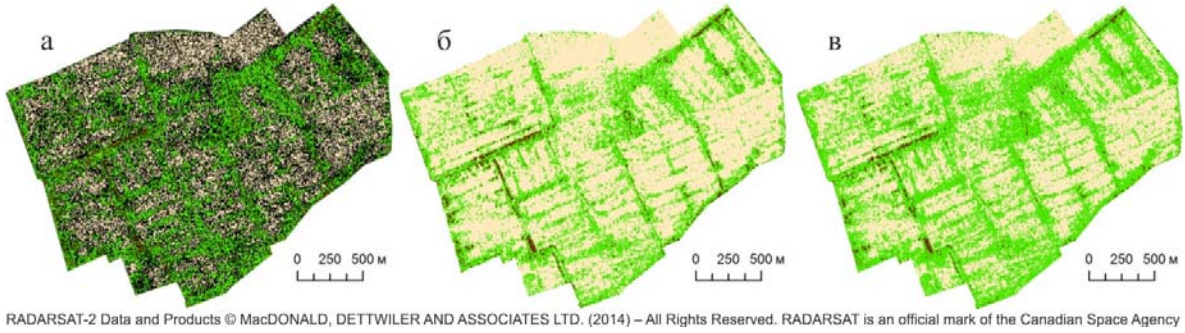


Рис. 2. Результаты контролируемой классификации непараметрическими методами с выделением 3 классов: *а* - параллелепипеда; *б* – минимального расстояния; *в* – опорных векторов

Наиболее часто применяемые при обработке данных оптического диапазона параметрические методы классификации (минимального расстояния и максимального правдоподобия) в нашем случае дали недостоверные результаты. Это объясняется тем, что эти методы требуют нормального распределения выборок и данных, а исследуемые данные имеют экспоненциальное распределение.

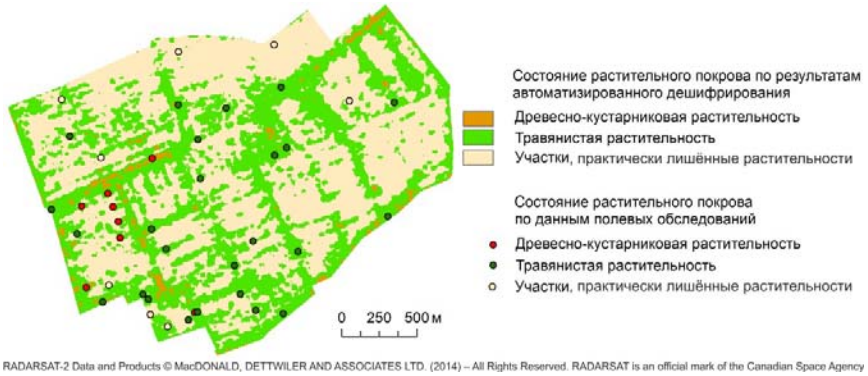


Рис. 3. Карта состояния залежи и её оценка по наземным данным

4. Выводы. Проведённые эксперименты позволяют сформулировать некоторые рекомендации по обработке поляриметрических радиолокационных данных для оценки

состояния залежей. Значительные преимущества перед одиночными изображениями в перекрёстной поляризации имеют результаты поляриметрических декомпозиций Pauli, Freeman-Durden и Yamaguchi, а именно компонента объёмного рассеяния. Для дальнейшей обработки важен пересчёт линейных значений в децибелы. Для дешифрирования участков с выраженной и практически отсутствующей растительностью достаточно провести неконтролируемую классификацию с выделением двух классов. Для выделения в отдельный класс древесно-кустарниковой растительности необходимо использование эталонов. Наиболее подходящие методы классификации – опорных векторов и минимального расстояния. Пример карты приведён на рис. 3.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2248.2014.5 и РФФИ 13-05-12011-офи.

Список литературы

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / под ред. акад. Г.А. Романенко. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 64 с.

2. Бармин А.Н., Иолин М.М., Стебенькова М.А. Виды антропогенного воздействия и стратегия оптимизации природопользования Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги для устойчивого развития // Изменения природно-территориальных комплексов в зонах антропогенного воздействия. М.: Медиа-Пресс, 2006. С. 172–188.

3. Y. Huang, J.L. van Genderen. Evaluation of Several Speckle Filtering Techniques for ERS-1&2 Imagery // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1996. Vol. XXXI. Pp. 164–169.

4. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2010. 424 с.

5. J.-S. Lee, E. Pottier, Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications, CRS Press, 440 p., 2009.

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

УДК 621-83 : 621.313.323: 528.8

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, П. В. Авласко, В. А. Поваляев,
Р. М. Никитин, М. Н. Ульянченко
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: sapr@mail.ru

PRECISE ELECTRIC DRIVES OF SPACECRAFT FOR EARTH REMOTE SENSING

S. A. Bronov, N. A. Nikulin, P. V. Avlasko, V. A. Povalaev,
R. M. Nikitin, M. N. Ulyanchenko
Siberian Federal University
Institute of space and informatic technologies
e-mail: sapr@mail.ru

Рассмотрены принципы функционирования и построения нового класса электроприводов на основе индукторных двигателей двойного питания для космических аппаратов.

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

Назначение и особенности прецизионных электроприводов космических аппаратов

Космические аппараты (КА) содержат специальную аппаратуру, которая обеспечивает их нормальное функционирование, а также осуществляет получение и регистрацию полезной информации [1]. Это – системы поворота антенн, системы поворота солнечных батарей, системы позиционирования аппаратуры и др. Эти системы содержат электроприводы на основе электродвигателя того или иного типа. В связи с особенностью эксплуатации в условиях полной автономности, возможных перепадов температур и др., ко всем устройствам КА, включая электроприводы, предъявляются повышенные требования по точности, надёжности, энергопотреблению.

Особенностью электроприводов рассматриваемого класса является необходимость обеспечить плавное (невозмущённое) вращение на низких скоростях. Кроме того, стремятся минимизировать объём управляющей аппаратуры, в том числе датчиков.

В настоящее время в КА применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами и индукторные двигатели [2]. Оба типа двигателей управляются схожим образом, но индукторные двигатели имеют меньшие (в десятки раз) номинальные скорости вращения при повышенных частотах питания, что позволяет обеспечить повышенную плавность вращения по сравнению с двигателями с постоянными магнитами и избавиться от механических редукторов, что повышает надёжность всего КА.

Ещё одним типом электродвигателя, который может использоваться в электроприводах КА, является индукторный двигатель двойного питания (ИДДП) [3]. Он является разновидностью индукторных двигателей и также имеет низкую номинальную скорость вращения. Но в конструкции ИДДП используется принцип двойного питания, заключающийся в том, что на статоре у него размещаются две многофазные обмотки (а не одна, как у других двигателей). При питании обеих обмоток системами напряжения переменного тока с разной частотой угловая скорость двигателя определяется их разностью:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{Z_r},$$

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

В случае равенства обеих частот ИДДП стоит, в случае превышения одной частоты он начинает вращаться в соответствующую сторону.

Таким образом можно обеспечить ещё более низкие и стабильные скорости, а также простое изменение направления вращения, что затруднительно у других типов электродвигателей.

Научная проблема заключается в том, чтобы разработать новые способы управления такими двигателями с учётом специфических требований к электроприводам КА.

Частотно-фазовое управление прецизионным электроприводом на основе индукторного двигателя двойного питания

Электроприводы рассматриваемого класса являются позиционными электроприводами, т. е. они должны обеспечивать поворот рабочего механизма (антенны, солнечной батареи, штанги с аппаратурой и др.) на заданный угол с требуемой скоростью. Обычные двигатели являются скоростными, т. е. они могут поворачиваться с определённой скоростью, но не могут остановиться в заданном положении. Чтобы обеспечить поворот на заданный угол, используют датчики углового положения и обратную связь. Построение таких контуров управления сопряжено с некоторыми сложностями.

В отличие от двигателей других типов ИДДП могут поворачиваться на требуемый угол и останавливаться в заданном положении. Этому способствует принцип двойного питания [4].

Угол поворота может быть записан по аналогии с выражением для скорости:

$$\theta_r = \frac{\theta_1 - \theta_2}{Z_r},$$

где θ_r – угол поворота вала двигателя; θ_1, θ_2 – текущие фазовые сдвиги первого и второго питающих напряжений.

Таким образом, задавая фазовые сдвиги питающих напряжений (любого одного или обоих одновременно), можно осуществить поворот ротора ИДДП на заданный угол. Фазовые сдвиги можно задавать с помощью цифровой системы управления на основе микроконтроллера. Угол поворота может быть весьма малым, так как он ещё и обратно пропорционален коэффициенту электромагнитной редукции ИДДП, который может составлять 40…100. Такой режим работы аналогичен работе шагового двигателя. Это значит, что ИДДП может использоваться для отработки малых углов поворота, в том числе без датчика углового положения на валу, что существенно упрощает конструкцию электропривода и повышает надёжность всего КА.

Алгоритм работы такого электропривода может быть следующим:

1) в исходном состоянии обе частоты питания одинаковые, и двигатель стоит (режим так называемого синхронного стояния);

2) при необходимости повернуть двигатель на некоторый угол выбирается то напряжение, которое нужно использовать (при этом используются дополнительные условия);

3) выполняется сдвиг выбранного напряжения по фазе, и двигатель поворачивается;

4) частота изменяемого напряжения снова становится равной исходной, и двигатель останавливается.

Такой простейший алгоритм работы электропривода может быть усложнён с целью получения дополнительных эффектов.

В ряде случаев допускается использование замкнутых систем управления электроприводом. В этом случае применяют те или иные датчики обратной связи и регуляторы. Поскольку основной регулируемой переменной является угол поворота, то можно использовать датчик угла поворота, который даст достоверное значение угла и позволит таким образом повысить точность регулирования. Но в динамических режимах необходимо контролировать также другие переменные состояния, в частности скорость и угол нагрузки. Контролирование скорости позволяет обеспечить необходимый темп изменения угла поворота, а также вращение с заданной скоростью. Контролирование угла нагрузки гарантирует удержание ИДДП в синхронизме в переходных режимах. Для построения такой системы нужны датчики угла нагрузки и угловой скорости.

Угол нагрузки θ_M невозможно измерить каким-либо датчиком непосредственно. Но он определяется с использованием текущих фаз питающих напряжений и угла поворота:

$$\theta_M = \theta_1 - \theta_2 - Z_r\theta_r .$$

Таким образом, для измерения угла нагрузки достаточно измерить угол поворота вала двигателя θ_r, а также иметь информацию о текущих фазах питающих напряжений. Последнее легко получить из системы управления устройством электропитания, так как эти фазы специально формируются, например системой широтно-импульсной модуляции.

Теоретически в качестве датчика угловой скорости можно использовать тахогенератор, но на низких и сверхнизких скоростях, характерных для электроприводов рассматриваемого класса, сигнал тахогенератора будет слабым и зашумлённым.

Одним из возможных путей решения проблемы датчиков может быть использование системы управления с моделью (рисунок).

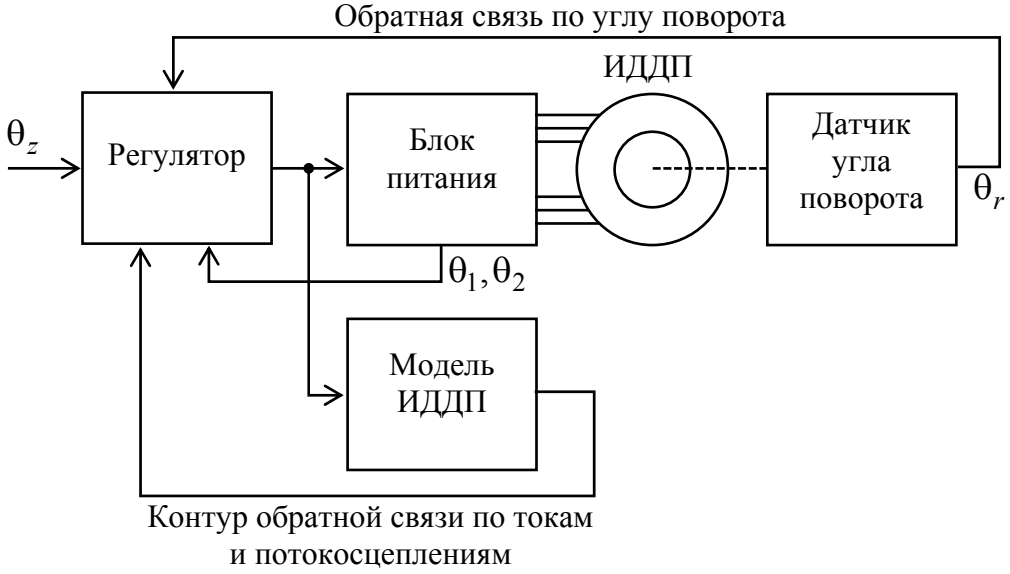


Рис.

На вход Регулятора поступает сигнал задания угла поворота, на который должен повернуться вал двигателя. Регулятор формирует сигнал управления для Блока питания и такой же сигнал подаёт на модель ИДДП [5]. Блок питания формирует два трёхфазных напряжения питания (амплитуды, частоты и фазы), в модели так же формируются соответствующие напряжения. Двигатель отрабатывает поданные на его обмотки напряжения, в обмотках формируются токи и потокосцепления, вал поворачивается с некоторой скоростью на некоторый угол. Этот угол измеряется Датчиком угла поворота, и его сигнал подаётся на регулятор, где сравнивается с заданным углом.

Одновременно все такие же процессы протекают в Модели ИДДП – в ней так же формируются токи, потокосцепления, но в математической форме. Эти токи и потокосцепления, в отличие от реальных, можно измерить (в модели они всегда рассчитаны). И по этим переменным можно тоже вводить обратные связи, как по реальным переменным.

Но поскольку модель всегда воспроизводит реальные процессы с погрешностью, то и управление с помощью модели может не вполне соответствовать желаемым процессам. В данном случае основной регулируемой переменной является угол поворота, который измеряется реальным датчиком, поэтому ошибок с позиционированием из-за модели не будет. А переменные из модели используются только для формирования переходных характеристик. При этом некоторые погрешности не имеют значения.

Заключение

Электроприводы с ИДДП представляют собой новый перспективный класс электромеханических систем, которые могут обеспечить соответствующим устройствам новые технические и эксплуатационные характеристики. Развитие этого класса электропривода должно происходить в двух направлениях: разработка новых и совершенствование известных способов управления в сочетании с принципами построения электроприводов; совершенствование самих индукторных двигателей двойного питания с точки зрения увеличения их момента.

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. ISBN 5-93182-018-3.

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. ISBN 978-5-8295-0128-0.

УДК 528.8:574

ОЦЕНКА НЕНАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ТЕРРИТОРИЙ С ВЫСОКОЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О. Л. Гиниятуллина, В. П. Потапов
Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал)
e-mail: kembict@gmail.com

Описывает подход к выделению на космоснимках ненарушенных природных территорий со сложной структурой на примере Баятских сопок в Кемеровской области с использованием алгоритма построения дерева решений. Приводятся результаты дешифрирования.

Ключевые слова: дерево решений, ненарушенные территории, Landsat 8.

В настоящее время высокие темпы добычи полезных ископаемых приводят к нарушению больших территорий земель сельскохозяйственного и лесного назначения, что приводит к экологической катастрофе. Высокая антропогенная нагрузка урбанизированных территорий сопровождается процессами изменения характера ландшафта на больших площадях, которые не только изменяют исторически сложившиеся природные ареалы, но и приводят к радикальному изменению экологического состояния региона в целом. Процессы заболачивания и опустынивания характерны для всех горнодобывающих территорий с высокими показателями добычи полезных ископаемых. Для Кузбасса, как угольного региона страны, такая ситуация носит устойчивый характер, что вызывает серьезные опасения специалистов-экологов.

Кемеровская область является регионом страны с большим разнообразием рельефных форм: Салаирский кряж и Кузнецкий Алатау, кузнецкая котловина, которая сливается с Западно-сибирской низменностью. Основные экологические проблемы связаны с негативным влиянием крупного угледобывающего, металлургического и химического производства на состояние природной среды и здоровье населения [1]. Особенности климата и географического расположения области способствует тому, что большая часть промышленных загрязнений не рассеивается в атмосферном воздухе, а осаждается в Кузнецкой котловине, при этом образуется фотохимический смог, который оказывает негативное влияние на состояние здоровья населения и биомассы в целом. Загрязнения водного бассейна р. Томь от промышленных сбросов водных суспензий приводит практически к катастрофической ситуации области в целом. Это выражается не только в ухудшении состояния растительности, но и приводит к вырождению родников и мелких рек в целом. Также следует выделить ряд проблем, связанных с добычей полезных ископаемых. Ежегодно из оборота землепользования выводятся сотни квадратных километров территорий под формирование чаш разрезов, отвалов пустой породы, хвостохранилищ и т. п. При этом степень рекультивации земель является очень низкой, не более 2–4 % от общего количества нарушенных территорий [2]. Кроме того Кемеровская область располагает высоким уровнем биологического разнообразия, который включает в себя большое количество редких, исчезающих и нуждающихся в охране растений и грибов.

В настоящее время в Кемеровской области под эгидой Программы развития ООН, Глобального экологического фонда (ГЭФ) и Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, а также поддержки Администрации Кемеровской области реализуется проект «Задачи сохранения биоразнообразия в политике и программах развития энергетического сектора России», в рамках которого ведется разработка современных информационных технологий, направленных на решение задач сохранения биоразнообразия. Одним из ведущих направлений в данном проекте является применение данных дистанционного зондирования для выделения

ненарушенных земель, а также оценка динамики состояния природных территорий, находящихся под защитой (заповедников, заказников, тестовых площадок и т. п.).

Разработкой методики выделения ненарушенных территорий по данным дистанционного зондирования занимаются специалисты Кемеровского филиала Института вычислительных технологий СО РАН. Следует заметить, что, несмотря на высокий уровень разработок в области применения космоснимков среднего разрешения (в частности, Landsat 8) для выделения природных объектов и оценки состояния биомассы как за рубежом, так и в России, при решении данной задачи на объектах Кузбасса применения стандартных методик и алгоритмов не дало удовлетворительного результата. Это связанно с тем, что, как правило, природные объекты имеют сложную структуру, характерным примером являются Баятские сопки, которые являются объектом природоохраны, представляющие собой сложное образование с каменистыми выступами, степной растительностью и небольшими кустарниками. Поскольку объект не имеет однородной текстуры, для выделения похожих образований на большой территории требуется применение интегральных показателей, либо их набора. В связи с этим применение классификаций с обучением и без обучения не дало положительного результата. Поэтому для обработки снимков использовался алгоритм построения дерева решений.

Алгоритм построения дерева решений выполняет многоступенчатую классификацию, состоящую из ряда бинарных решений, которые используются, чтобы правильно определить категорию для каждого пиксела. Отличительная особенность данного способа классификации заключается в возможности использования в одном классификаторе данных из различных источников и файлов с единой проекцией. Поэтому построенное раз дерево решений может применяться на группе снимков. При этом, как правило, дерево решений всегда ориентируется на конкретную задачу, например выделение определенного типа объектов, развивая тем самым одну определенную ветвь, оставляя предыдущие классы в значении среднего. При этом при возникновении дополнительной задачи можно активировать другую ветвь, получая тем самым сложное дерево и выполнение в рамках одной обработки нескольких задач [3; 4].

Последовательным переходом мы отделяем классы пикселей, относящихся к фону, антропогенным объектам и т. п., пока не получается класс растительности. Дальнейшее ветвление предполагало выделение густой растительности и редкой. Баятские сопки относятся к классу редкой растительности. Поскольку объект представляет собой полустепное образование, было предложено использовать в качестве определителя спектральную кривую одуванчика, который в определенные периоды является доминирующей культурой (рис. 1).

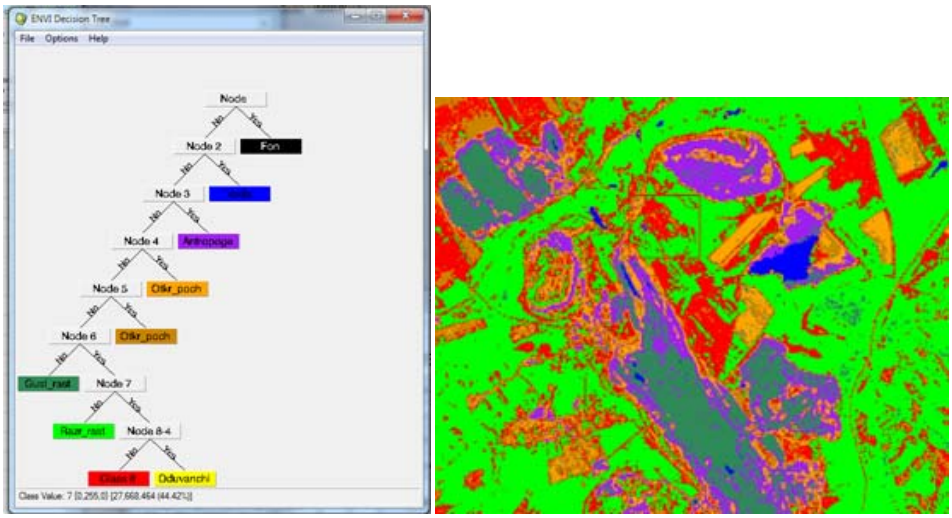


Рис. 1. Построение дерева решений. Вариант 1

Однако результат был получен неудовлетворительный. В следующем варианте дерева последовательно были выделены поля и поляны, а затем сопка (рис. 2).

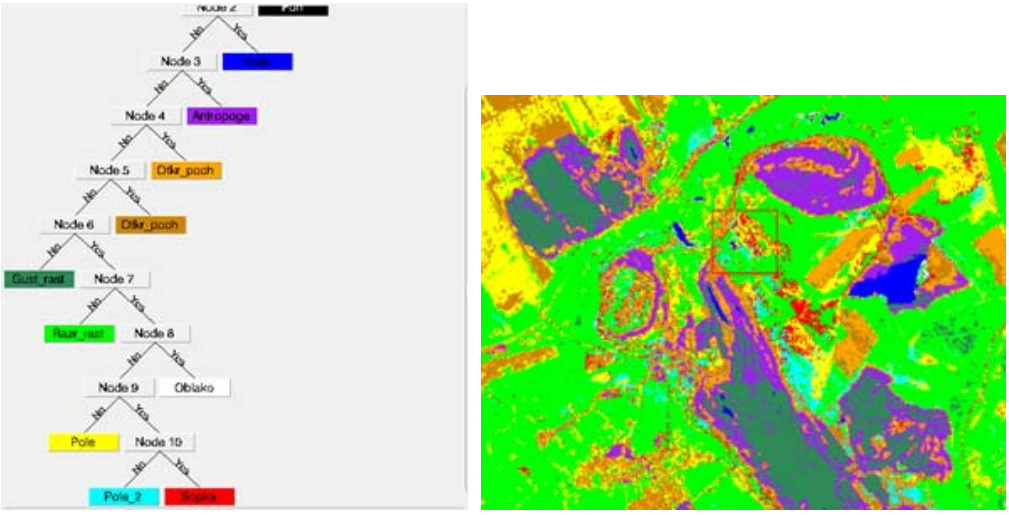


Рис. 2. Построение дерева решений. Вариант 2

Данное дерево дало положительный результат. Внутри дерева при выделении растительности применялись индексы, как традиционные (NDVI), так и комбинации полос красного и инфракрасного цвета. Причем на снимке были выделены похожие объекты, идентичность которых была проверена полевыми исследованиями Ботанического сада СО РАН (рис. 3).

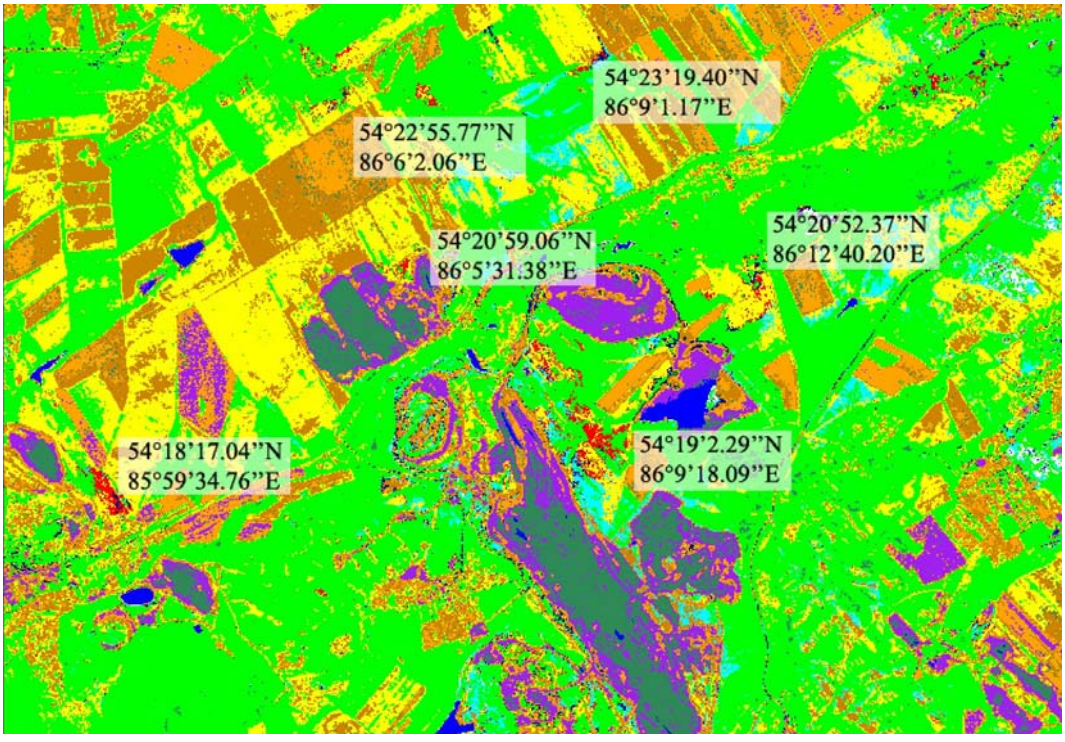


Рис. 3. Координаты выделенных новых объектов

Таким образом, применение дерева решений как инструмента для дешифрирования на космоснимках объектов сложной структуры позволяет получить удовлетворительный результат, а построенное дерево может применяться на серии

космоснимков, обеспечивая тем самым цикличность процесса. Данный подход может успешно применяться для определения по космоснимкам территорий с ненарушенными землями, позволяя не только оценивать состояние земельного фонда области, но и вести динамический мониторинг развития ситуации в целом.

Список литературы

1. Мониторинг, оценка и прогноз состояния окружающей природной среды на основе современных информационных технологий / Н.Ю. Вашлаева, В.П. Потапов, Е.Л. Счастливцев, А.Н. Куприянов, В.А. Андроханов, Ю.А. Манаков. Кемерово, 2013. 112 с.

2. Андроханов В.А. Некоторые подходы к решению проблемы рекультивации нарушенных земель в Кузбассе // Кузбасс-1: сб. ст. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). 2009. № ОВ 7. С. 178–185.

3. Purkis S., Klamas V. Remote Sensing and Global Change. UK, 2011. 757 p.

4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М., 2010. 560 с.

УДК 621.396.946:621.396.7

ВОЗМОЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СТАНЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ СКС-ОМЗ № 2 В СОСТАВЕ ЦЕНТРА ПРИЕМА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ (ЦПО И ККИ)

А. К. Гончаров, Н. С. Варейчук, А. М. Никаноров, И. В. Алифер,
К. Н. Филькин, Л. К. Кочубей, О.В. Бекренев, В. А. Капитанов,
С. И. Мартынов, А. С. Рождественский, В. В. Мороз
АО «Российские космические системы»
e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Изложенный материал о станции космической связи СКС-ОМЗ № 2 в составе центра приема и контроля качества космической информации (ЦПО И ККИ) предназначен для обмена данными в установленных форматах и объёмом через ретранслятор геостационарного космического аппарата гидрометеорологического назначения «Электро-Л» в точках стояния 76 град. в. д. и 77,8 град. в. д. между центральной станцией космической связи и абонентскими станциями, установленными на удаленных объектах Роскосмоса.

Ключевые слова: станция космической связи СКС-ОМЗ № 2, ретрансляция информации через КА.

Назначение

Станция космической связи предназначена для обмена данными файловой структуры с другими наземными комплексами и организациями, имеющими аналогичные станции, в интересах Федерального космического агентства со скоростями передачи 15,36 и 2,56 Мбит/с путем ретрансляции данных через ретранслятор геостационарного КА гидрометеорологического назначения Электро-Л» по линии вверх в диапазоне 8195 МГц и по линии вниз в диапазоне 7,5 ГГц в форматах и объемах, предусмотренных протоколами обмена.

Станция обеспечивает одновременную работу на прием и передачу (дуплексный режим), а также работу в режиме приема или передачи (симплексный режим).

Технические характеристики

Станция космической связи (СКС-ОМЗ №2) обеспечивает:

- передачу на КА «Электро-Л» в точках стояния 76 град в. д. и 77,8 град в. д. в частотном диапазоне от 8179 до 8211 МГц (частота передачи 8195 МГц) массивов цифровой информации в формате МЦИ (ОМЗ)-1 и МЦИ (ОМЗ)-2 абонентским станциям Федерального космического агентства со скоростью 15,36 и 2,56 Мбит/с соответственно;
- прием (с вероятностью ошибки не более 10-6 на бит принимаемой информации) и регистрацию с КА «Электро-Л» в точках стояния 76 град в. д. и 77,8 град в. д. массивов цифровой информации в формате МЦИ (ОМЗ)-1 и МЦИ (ОМЗ)-2 от абонентских станций Федерального космического агентства со скоростью 15,36 и 2,56 Мбит/с соответственно;
- преобразование принятых массивов цифровой информации в исходные файлы и их регистрацию;
- работу в автоматическом режиме;
- программное наведение антенн на КА «Электро-Л»;
- протоколирование работы станции;
- получение от КПТС УТС ЦПО и ККИ планов сеансов связи с КА «Электро-Л» по арендуемому каналу;

- выдачу на КПТС УТС информации о выполнении запланированных работ и данных функционального контроля.

Основные технические характеристики станции космической связи (СКС-ОМЗ):

- диаметр рефлектора приемо-передающей антенны – 2,4 м;
- антенный пост размещен под радиопрозрачным укрытием, что обеспечивает защиту от ветряных нагрузок. Диаметр РПУ – 3,9 м;
- коэффициент усиления антенны на прием должен быть не менее 43 дБ, на передачу – не менее 44 дБ;
- антенна должна обеспечивать прием и передачу сигналов с круговой поляризацией:
  - на передачу – левого направления вращения;
  - на прием – правого направления вращения;
- коэффициент эллиптичности по полю в направлении максимума диаграммы направленности антенны должен быть не менее 0,8;
- двухосное ОПУ должно обеспечивать наведение антенны на КА на видимой дуге геостационарной орбиты в режимах программного и ручного наведения в пределах:
  - по азимуту ± 75° от направления на юг;
  - по углу места от 3° до 50°;
- погрешность наведения антенны по каждой угловой координате не более 0,1°;
- система управления антенной должна обеспечивать в режимах местного и дистанционного управления:
  - программное наведение антенны на КА;
  - ручное наведение антенны оператором.

Наведение на КА в режиме дистанционного управления осуществляется по расчетным данным угловых координат (азимут и угол места) положения КА, поступающие от вычислительных средств НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы».

Приемно-передающий тракт комплекса приема-передачи должен обеспечивать независимый выбор несущих частот приемника и передатчика с шагом не более 100 кГц в заданном рабочем диапазоне частот, а также прием и передачу информации со скоростями 15,36 Мбит/с и 2,56 Мбит/с.

В ходе испытаний на аналогичной станции требуемые скорости были достигнуты при уровне излучаемой мощности порядка 4,5 Вт. Это показывает, что станция имеет запас по мощности, учитывая максимальную выходную мощность передатчика не менее 30 Вт, и может передавать данные на скоростях до 70 Мбит/с.

Добротность приемного тракта изделия при углах места наведения антенны не ниже 7° с учетом потерь в РПУ не хуже +19 дБ/К.

Максимальная ЭИИМ станции – не менее 56 дБВт.

В передающем тракте будет предусмотрена возможность регулирования выходной мощности с дискретностью 1 дБ в диапазоне от 0 до минус 25 дБ;

Предусмотрено хранение принимаемой информации не менее 10 суток, а также формирование отчета о проведённом сеансе;

На рабочем месте оператора отображается процесс приема/передачи информации о ходе сеанса, и все данные заносятся в базу данных проведенных сеансов связи.

Выводы

Создание станции космической связи (СКС-ОМЗ №2) позволяет связать объект на территории АО «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск Красноярского края) с Научным Центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы» и обеспечить обмен данными в заданных объемах через КА «Электро-Л».

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ РОССИЙСКИХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЗЗ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Л. А. Гришанцева, К. С. Емельянов, К. И. Зубкова, Т. Г. Куревлева,
О. В. Кушнырь, В. С. Марков, А. Ю. Морозова, Л. И. Пермитина
АО «Российские космические системы»
e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru, eks@ntsomz.ru, zubkova.k@ntsomz.ru, kto06@mail.ru,
kushnyr@ntsomz.ru, mvs@ntsomz.ru, morozova@ntsomz.ru, permitina@ntsomz.ru

Сообщается о возможностях Оператора по предоставлению спутниковых данных и продуктов их обработки в интересах оперативного мониторинга состояния природных и антропогенных объектов. Освещены проблемы, тормозящие эффективное и своевременное применение данных дистанционного зондирования Земли. Представлены возможности геосервиса Оператора в интересах ведомственных и региональных информационных систем. Освещены проблемы, касающиеся использования гиперспектральной информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая информация, Оператор российских космических средств, геоинформационные сервисы.

В соответствии с Федеральной космической программой России (ФКПР) на период 2006–2015 гг. в настоящее время проводится расширение орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Работа проводится в соответствии с концепцией развития российской космической системы ДЗЗ на период до 2025 г., а именно с целью максимального удовлетворения потребностей национальной экономики и обеспечения конкурентоспособности в области ДЗЗ. Основными направлениями деятельности по совершенствованию отечественной системы дистанционного зондирования Земли являются формирование научно-технического задела создания бортовых приборов ДЗЗ, удовлетворяющих мировому уровню, создание наземной инфраструктуры, включающей комплексы приема и обработки информации, а также взаимодействие с ведущими общественными и коммерческими организациями.

Основные задачи ДЗЗ включают в себя мониторинг состояния природных ресурсов суши и Мирового океана, гидрометеорологические наблюдения, экологический мониторинг, обновление топографических карт и кадастровых планов и получение фундаментальных знаний о Земле. Основными потребителями космических услуг в России являются государственные институты – федеральные и региональные органы власти, а именно Роскартография, МЧС, Росгидромет и др. В настоящее время 99,7 % поставок данных ДЗЗ приходится на государственных потребителей. При этом основной тенденцией российского потребительского рынка этих данных ДЗЗ за последние 8 лет стала стабилизация его роста с ежегодным возрастанием объемов на 10–12 %.

Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) является наземным комплексом Роскосмоса, осуществляющим прием, регистрацию, обработку и распространение космической информации вышеуказанным потребителям. Основная деятельность НЦ ОМЗ осуществляется в рамках ФКПР и соглашений Роскосмоса с космическими агентствами других стран (Франция, Германия, США, Италия). В Центре ведутся помимо прямой эксплуатации космических систем работы по контролю качества поступающей информации, разработке гелиофизических аппаратурных комплексов, обеспечению и проведению летных испытаний и многое другое.

Основными направлениями, тормозящими эффективное и своевременное применение данных ДЗЗ, является следующее:

– отсутствие единой технологии работы с данными ДЗЗ и представления этих данных и результатов обработки пользователям в различных центрах;

– отсутствие единой политики в создании и эксплуатации наземных центров получения и обработки данных ДЗЗ – центры планируются отдельно разными ведомствами и регионами;

– отсутствие долговременного устойчивого финансирования исследовательских проектов и соответствующих кадров.

По состоянию на сегодняшний день объем получаемых данных ДЗЗ не в полной мере удовлетворяет спрос заказчиков – отмечается устойчивая ориентация российских потребителей на зарубежную информацию, несмотря на то что группировка КА расширяется стремительными темпами. В настоящее время в состав российской ОГ входят следующие КА ДЗЗ:

– «Метеор-М» №№ 1, 2 (глобальный и региональный уровни наблюдения);

– «Ресурс-П» №№ 1, 2 (региональный и локальный уровни наблюдения);

– «Канопус-В» № 1 (локальный уровень наблюдения).

Данные среднего и низкого разрешения с КА «Метеор-М» №№ 1–2 и «Электро-Л» № 1 (аппаратура МСУ-МР и МСУ-ГС соответственно) являются информацией открытого доступа. Основные потребители этих данных (98 % от общего объема) – организации Росгидромета.

КА «Метеор-М» №№ 1, 2 (КМСС) и «Ресурс-П» № 1 (ШМСА) позволяют получать данные среднего разрешения, используемые преимущественно для решения задач регионального мониторинга. Эти данные применяют для оперативной (1 раз в 3 суток) оценки ситуации на региональном уровне и имеют значение для решения задач природно-ресурсного характера. Полное покрытие территории Красноярского края (второго по величине субъекта Российской Федерации) данными среднего разрешения обеспечивается за 5–7 дней.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволяет решать задачи мониторинга объектов социально-экономической инфраструктуры, осуществлять крупномасштабное картографирование территорий (до 1:10 000). В настоящее время их получение возможно с использованием «Канопус-В» № 1 (ПСС, МСС) и «Ресурс-П» №№ 1, 2 (Геотон). Данные высокого пространственного разрешения являются наиболее востребованными среди российских потребителей. Такие материалы съемки могут поставляться с частотой, определяемой условиями баллистического прогноза полета КА и метеоусловиями (облачность, осадки) обычно 1–2 раза в месяц. Создание сплошного покрытия территории Красноярского края данными высокого разрешения возможно в течение 6 месяцев, то есть в рамках одного съемочного сезона (май-октябрь). Также существуют ограничения на приоритет территорий для задания очередности съемки.

Российский КА «Канопус-В» работает в единой ОГ с белорусским КА (БКА). Целевое использование объединенной группировки осуществляется на паритетной основе, при этом российские пользователи имеют возможность получать до 15 % информационного ресурса БКА, что обеспечивает повышение оперативности съемки территории Красноярского края на 10 %.

В 2015 г. ожидается запуск КА «Канопус-В-ИК» с дополнительной аппаратурой наблюдения в среднем и дальнем ИК-диапазоне (МСУ-ИК-СР), предназначенной для выявления техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, прежде всего детектирования очагов пожаров.

В настоящее время Оператор обеспечивает поставки данных уровней обработки, которые определены разработчиками КА и Роскосмосом для каждого конкретного КА; результаты съемки предоставляются в виде данных, прошедших радиометрическую и

геометрическую коррекцию, уровень L1B согласно принятой международной классификации на безвозмездной основе федеральным и региональным органам власти. Поставка продуктов более высоких уровней обработки осуществляется на договорной основе в соответствии с требованиями конечного потребителя.

Наземный комплекс приема, обработки и распространения космической информации Оператора КС ДЗЗ, подразумевающий обработку первичной космической информации, включает в себя Единый банк геоданных (ЕБГД) и Банк базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования (ББП). Банк геоданных функционирует с 2010 года и включает в себя геодезически привязанные данные ДЗЗ, прошедшие относительную и абсолютную калибровки, а также процедуру геометрической коррекции. Банк базовых продуктов находится в стадии разработки; он будет содержать информацию по индексным изображениям – по состоянию растительного покрова, качеству морских вод, распространению речных затоплений и др. Данные попадают в геопортал Роскосмоса, из которого могут быть использованы в интересах ведомственных и региональных информационных систем, единой государственной системы информации об обстановке мирового океана (ЕСИМО), а также для проведения международных программ сотрудничества.

Отдельно стоит указать, что, начиная с 2010 года, под руководством Роскосмоса создается система подспутниковых валидационных наблюдений, ориентированная, в первую очередь, на оценку геометрических и радиометрических характеристик данных высокого и сверхвысокого разрешения.

Создаваемая система обеспечит валидацию по основным характеристикам целевой аппаратуры всех существующих и перспективных российских космических средств ДЗЗ видимого, ближнего инфракрасного и радиолокационного диапазонов.

Что касается тематических продуктов, то они занимают некоторое промежуточное место между первичными данными ДЗЗ стандартного уровня обработки (L1B) и комплексными тематическими продуктами (создание тематических ГИС с использованием цифровых моделей рельефа, результатов наземных измерений). Данный вид продуктов ДЗЗ является базовым для решения целого ряда тематических задач и его целесообразно создавать централизованно, без развертывания технологий производства у конечного потребителя. В случае использования таких продуктов государственными потребителями немаловажным является фактор экономии бюджетных затрат на разработку и эксплуатацию технологий для каждой космической системы в отдельности.

Совершенно новой для российского потребителя является использование гиперспектральной информации – штатная гиперспектральная аппаратура впервые была установлена на КА «Ресурс-П» № 1, запущенном в 2013 г., в 2014 – на КА «Ресурс-П» № 2. Важнейшее отличие гиперспектральных данных от многозональных заключается в большем числе спектральных каналов (до нескольких сотен) и более высокое спектральное разрешение (единицы нм и менее). Это позволяет проводить анализ информации на принципиально новом уровне:

– выявлять узкие линии поглощения, характерные для минеральных веществ, газов и воды, проводить их идентификацию и определять концентрацию;

– применять для гиперспектральных данных методы распознавания спектральных характеристик, которые применяются для многозональных данных, но при этом характеристики распознавания существенно улучшаются за счет большей статистики и информативности;

– вычислять индексные оценки состояния растительности типа вегетационных индексов, но при этом результаты обработки получаются более корректными и устойчивыми за счет высокого спектрального разрешения, кроме того, возможно

использование корректированных вегетационных индексов с дополнительными каналами.

Основной проблемой корректного использования гиперспектральной информации (ГСИ) является отсутствие технической и технологической готовности российского потребителя к ее целевому применению; необходимо продолжение исследований и постепенный переход от научного, экспериментального использования информации к практическому применению.

С целью повышения эффективности целевого использования российских средств ДЗЗ необходимо усилить информационную интеграцию геосервисов Оператора с ведомственными и региональными информационными системами для обеспечения равного доступа конечных пользователей к спутниковой информации и данным наземных наблюдений.

УДК 531.717.82, 528.855

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

С. И. Добрынин[(1)], П. Н. Дагуров[(2)]
[(1)]Бурятский филиал Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
e-mail: dobrynin@biik.ru
[(2)]Институт физического материаловедения СО РАН

Приведены принцип работы и описание разработанного и созданного устройства для автоматизированного определения высот микрорельефа (шероховатости) земной поверхности.
Ключевые слова: микроволновое зондирование, шероховатость почвы, автоматизация.

Введение

В аэрокосмическом микроволновом дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) информационными продуктами являются сигнал обратного рассеяния от земной поверхности в случае радиолокаторов с синтезированной апертурой (активные системы ДЗЗ) или собственное радиотепловое излучение Земли (радиометрические пассивные системы). И в том и другом случае характеристики сигнала определяются в равной мере как электрическими свойствами земных покровов, так и шероховатостью земной поверхности [1; 2]. Поэтому для дистанционного определения таких параметров земной поверхности как влажность почвы, характеристики снежно-ледовых покровов необходимо разделять влияние собственно электрических свойств и шероховатости почвы.

Все существующие модели микроволнового зондирования, прогнозирующие значение коэффициента обратного рассеяния (для радиолокации) или коэффициента отражения (для радиометрии) используют множитель, описывающий шероховатость почвы, в который входят такие статистические характеристики почвы, как дисперсия неровностей и автокорреляционная функция. Для корректного описания этих характеристик необходим обширный массив экспериментальных измерений шероховатости почвы. Однако существующие методы измерения неровностей почвы достаточно трудоемки. Например, в традиционном методе измерения шероховатости почвы с помощью металлических штырей, показанном на рис. 1, используется большая доля ручного труда.

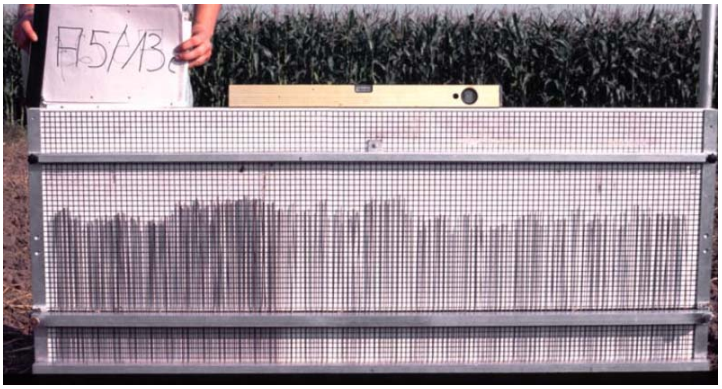


Рис. 1. Измерение шероховатости почвы с помощью игольчатого профиломера

Очевидными недостатками этого метода являются низкая оперативность измерений шероховатости и большая погрешность измерений.

Описание автоматизированного метода измерения шероховатости земных покровов

Для уменьшения трудоемкости процесса измерений шероховатости почвы, а также повышения точности, был разработан и реализован прибор для автоматизированного определения шероховатости почвы, общий вид представлен на рис. 2.

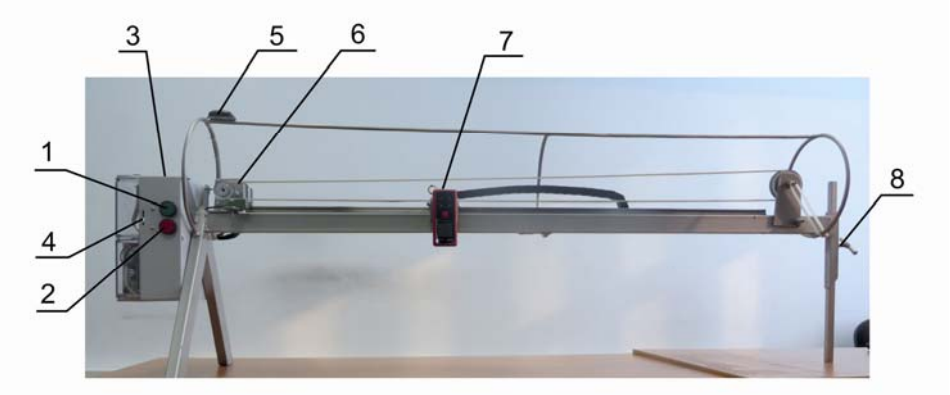
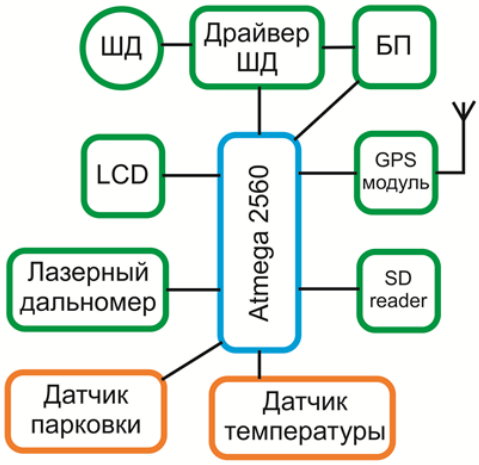


Рис. 2. Общий вид устройства для автоматизированной регистрации шероховатости земных покровов (1 – кнопка запуска измерения; 2 – кнопка сброса текущего измерения; 3 – ЖК-экран; 4 – SD накопитель; 5 – активная антенна GPS; 6 – шаговый двигатель; 7 – модуль лазерного дальномера; 8 – механизм регулировки наклона)

Действие прибора основано на принципе многоточечного, автоматического измерения расстояния до поверхности лазерным дальномером. Структурная схема прибора показана на рис. 3.

Результаты измерения параметров шероховатости записываются на съёмный носитель (SD карта памяти) в табличном виде, в файлы формата *.CSV соответствующие стандарту RFC 4180.



ШД – Шаговый двигатель.
Драйвер ШД – Драйвер шагового двигателя.
БП – Блок питания.
LCD – ЖК дисплей.
SD reader – модуль записи файлов на SD карту.
Atmega 2560 – Микроконтроллер.

Рис. 3. Структурная схема устройства для автоматизированной регистрации шероховатости земных покровов

Регистрация расстояний до поверхности земли в точках фиксируется лазерным дальномером UNI-T UT390B, каретка с установленным лазерным дальномером перемещается по направляющему рельсу с помощью шагового двигателя. Позиционирование до начала измерения осуществляется с помощью индуктивного

бесконтактного датчика парковки. Все элементы устройства управляются с помощью микроконтроллера ATmega2560 производства компании Atmel Corporation.

Процессы инициализации компонентов при включении прибора, а также ход сканирования отображаются на LCD дисплее.

Для работы в полевых условиях используется встроенный источник питания.

Основные технические параметры:

• Длина перемещения: 1000 мм

• Диапазон измерений высоты неровностей: 0–300 мм (возможно увеличение путем увеличения высоты опор)

• Минимальный интервал измерений по горизонтали: 2 мм

• Время выполнения одного отсчета: 2 сек

• Диаметр лазерного пятна: 1 мм

• Погрешность измерений высоты неровностей: ±1 мм

• Длина волны лазерного дальномера: 635 nm

• Диапазон измерений температуры: -55°C ~ +85°C

• Погрешность измерения температуры ±0.5 °C (-10 °C ~ +85 °C)

• Чувствительность GPS приемника: 159 dBm

• Точность позиционирования (м): 3-5

• Питание: внешнее – 220 В, встроенный аккумулятор 12 В 7 Ач

• Габариты: 300 мм × 300 мм × 1200 мм

• Вес: 5 кг

Измеряемые величины:

• Высота неровностей поверхности

• Температура окружающего воздуха

• Координаты в точке измерения через систему GPS

• Текущая дата и время UTC через систему GPS

Параметры окружающей среды при эксплуатации прибора:

• Рабочие параметры:

Температура: -10 °C ~ +40 °C

Относительная влажность:< 90 %

• Условия хранения:

Температура: -20 °C ~ +65 °C

Относительная влажность:< 90 %

Заключение

Разработан и создан прибор для автоматизированного определения шероховатости поверхности. Использование бытового дальномера с цифровым интерфейсом RS-232 определило невысокую стоимость прибора. При необходимости повышения точности и скорости сканирования можно использовать профессиональный дальномер.

Список литературы

1. Fung A.K., Chen K.S. Microwave Scattering and Emission Models for Users. Artech House, 2010. 430 p.

2. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.

УДК: 528.88

ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ В ИНТЕРЕСАХ ПОДДЕРЖКИ РСЧС

А. А. Емельянов, Ю. В. Федоркова
АО «Российские космические системы»
e-mail: emelyanov_aa@ntsomz.ru
e-mail: fedorkova@ntsomz.ru

Сообщается о целевом применении российской орбитальной группировки Оператором российских космических средств ДЗЗ в интересах МЧС России. Изложены возможности Оператора по предоставлению спутниковых данных и продуктов их обработки в интересах оперативного предупреждения и ликвидации ЧС. Представлены возможности геосервисов Оператора, обозначена необходимость их интеграции с государственной системой РСЧС в целях решения ключевых задач по повышению эффективности в области мониторинга, контроля и предупреждения ЧС.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая информация, Оператор российских космических средств, российская орбитальная группировка, геоинформационные сервисы, предупреждение и ликвидация ЧС.

Использование данных ДЗЗ в решении задач оперативного мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) и катастроф является важнейшим и обязательным компонентом информационного обеспечения национальных служб реагирования на ЧС развитых государств. Оперативное применение космической информации обеспечивает мгновенный и регулярный обзор больших и удаленных территорий, что для России – самого большого по площади государства мира – является особенно актуальным.

С каждым годом космическая информации все шире используется в сфере предупреждения и ликвидации ЧС федеральными органами власти и в региональных структурах управления. За последние годы в МЧС России существенно расшилось использование спутниковой информации для реализации ключевых функций и полномочий.

Взаимодействие МЧС России и Роскосмоса осуществляется на основании Соглашения между двумя ведомствами в области космической деятельности, а также в соответствии с Положением о взаимодействии между НЦУКС МЧС России и Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы» в целях обеспечения материалами космической съемки в рамках международной Хартии «Космос и крупные катастрофы».

НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» выполняет функции Оператора российских космических средств (КС) ДЗЗ, создаваемых в рамках реализации ФКП России. НЦ ОМЗ обеспечивает функционирование и целевое применение орбитальной группировки путем реализации полного технологического цикла по планированию информационного ресурса космических аппаратов (КА) и наземной инфраструктуры, приему, регистрации, первичной и стандартной обработки информации российских и зарубежных КА, ведению единого каталога и архива данных Роскосмоса в целях обеспечения конечных потребителей данными ДЗЗ и продуктами их обработки.

В настоящее время около 40 % поставок данных с российских КА ДЗЗ Оператором приходится на МЧС России. Преимущественно это данные ДЗЗ низкого и среднего пространственного разрешения, которые используются в основном для выявления и уточнения обстановки, связанной с лесными пожарами, наводнениями и другими крупномасштабными опасными природными явлениями и процессами с

различной динамикой. Для мониторинга техногенных ЧС наиболее востребована космическая информация высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Данные высокодетальной съёмки позволяют с большей вероятностью и достоверностью идентифицировать и получать точные оценки степени разрушения объектов при стихийных бедствиях, после техногенных аварий и катастроф, характеризующихся сравнительно небольшими площадями и зонами поражения. 15 % передаваемых МЧС данных ДЗЗ Оператором имеет высокое и сверхвысокое пространственное разрешение.

В состав российской орбитальной группировки в настоящее время входят семь КА ДЗЗ – «Ресурс-ДК», «Метеор-М» №№ 1, 2, «Электро-Л» № 1, «Канопус-В» и «Ресурс-П» №№ 1, 2, позволяющие получать информацию ДЗЗ в видимом и инфракрасном диапазонах, включая дальнюю тепловую область спектра. Аппаратура среднего и низкого разрешения производит глобальную съёмку всей территории России ежесуточно, а также всего видимого диска Земли с периодичностью 0,5 часа. В течение года аппаратурой высокого пространственного разрешения (10 м и лучше) может быть отснята территория площадью свыше 100 млн. кв. км.

Однако существующая российская орбитальная группировка не может в полном объеме обеспечить потребности МЧС России в отечественной информации ДЗЗ. Полностью не удовлетворены в настоящее время потребности в важнейшей мониторинговой составляющей – космической радиолокационной съемке. Эти данные очень важны для территории России с длительным периодом снежного и облачного покрытия, а также с учетом освещенности высокоширотных территорий в зимний период. Недостаток российских средств ДЗЗ восполняется данными зарубежных космических систем, которые сейчас практически полностью занимают коммерческий рынок данных ДЗЗ в России.

В перспективе (2015–2030 гг.) предполагается наращивание и поддержание российской орбитальной группировки до уровня 20-25 КА, включающей в свой состав космические системы как сверхвысокого, так и среднего и низкого пространственного разрешения, в том числе радиолокационные, что даст возможность практически полностью обеспечить государственных потребителей материалами космической съёмки, а с учётом снятия ограничений на использование и распространение данных – обеспечить выход на коммерческий рынок геопространственных данных и информационных продуктов ДЗЗ.

В ближайшем будущем ожидается запуск КА «Канопус-В-ИК» с дополнительной аппаратурой МСУ-ИК-СР, работающей в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне, для оперативного мониторинга техногенных и природных ЧС в части детектирования очагов пожаров. Также в 2015 г. орбитальная группировка будет дополнена еще одним спутником детального наблюдения «Ресурс-П» № 3.

В перспективе ожидается запуск КА «Арктика-М» № 1, входящего в космическую систему «Арктика-М», состоящую из двух идентичных по своим характеристикам космических аппаратов. Система предназначена для обеспечения гидрометеорологических наблюдений арктического региона Земли с качеством и частотой обновления данных, аналогичным космическим аппаратам на геостационарных орбитах.

Для осуществления оперативного всепогодного круглосуточного мониторинга Земли в диапазоне широт от 90° с. ш. до 90° ю. ш. в интересах в социально-экономического развития страны, в т. ч. для предотвращения и мониторинга ЧС в ближайшие годы планируется увеличение состава российской орбитальной группировки за счет запуска пяти радиолокационных КА: запуск первого из них в составе космического комплекса «Кондор-ФКА» запланирован до 2018 г.

До 2020 г. на орбиту будет выведено еще три спутника серии «Метеор-М», предназначенных для получения космической информации в интересах оперативной гидрометеорологии, мониторинга климата и окружающей среды, в том числе околоземного космического пространства.

Таким образом, перспективное наращивание российской орбитальной группировки КА ДЗЗ к 2025 г. позволит обеспечить до 80 % информационного ресурса общемирового уровня качества, в частности, для решения задач, возложенных на МЧС России.

Развитие системы общедоступных геоинформационных сервисов на основе WEB- и Cloud-технологий является одним из приоритетных направлений деятельности НЦ ОМЗ, среди которых:

− эксплуатация Геопортала Роскосмоса, имеющего расширенные пользовательские функции доступа к продуктам ДЗЗ стандартных уровней обработки;

− создание территориально-распределенного банка базовых информационных продуктов ДЗЗ межведомственного использования, включающего в свой состав комплекс средств автоматизированного потокового формирования продуктов и предоставлению сервисов на основе собственных геопортальных решений.

Решение ключевых задач по повышению эффективности в области мониторинга, контроля и предупреждения ЧС требует интеграции геоинформационных сервисов и государственной системы РСЧС.

В целях расширения спектра информационных ресурсов государственной системы РСЧС данными с действующих российских КА и информационными продуктами ДЗЗ представляется целесообразным наладить взаимодействие существующих систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций с геоинформационными сервисами Оператора.

УДК 528.8.04, 528.852

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

К. А. Иванова, О. В. Маликова
ООО «Центр инновационных технологий»
e-mail: contact@novacenter.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой технологий комплексной обработки данных ДЗЗ и векторных карт в рамках единого геоинформационного пространства с целью мониторинга последствий чрезвычайных ситуаций, оперативного выявления критичных территорий, своевременной реакции на отрицательные воздействия, а также предотвращения негативных последствий.

Ключевые слова: тематическая обработка, классификация изображения с обучением, температурные карты, разновременной мониторинг, векторизация данных, тематические карты.

Введение

Космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают сбор данных в глобальном масштабе с высоким пространственным и спектральным разрешением, однако для достижения успеха необходима возможность не только доступа к массивам данных, но и их быстрая и качественная обработка.

Российская Федерация характеризуется огромными территориями и слабо развитой инфраструктурой, что неизбежно приводит к преобладанию методов мониторинга обстановки, основанных на использовании современных материалов ДЗЗ, а также разработке программно-аппаратных средств нового поколения.

Мониторинг чрезвычайных ситуаций (ЧС) и их последствий с использованием данных ДЗЗ служит для оперативного обнаружения изменений природных ландшафтов и обеспечения безопасности жизнедеятельности населения. Для каждого региона опасные природные явления обладают своими особенностями, связанными с территориальным положением, природными условиями, геологическим строением и антропогенными факторами. Все это объясняет необходимость обработки космических снимков в комплексе с векторными картами, цифровыми моделями рельефа, погодными данными и т. п.

Для обработки и анализа материалов космической съемки (оптических и радиолокационных), а также совмещения в едином геоинформационном пространстве разнородных данных на российском рынке существует инновационный программный комплекс IMAGE MEDIA CENTER (ПК IMC), разработанный российской компанией «Центр инновационных технологий». ПК IMC позволяет на основе материалов спутниковой съемки решать широкий спектр задач по мониторингу чрезвычайных ситуаций природного характера.

Основные этапы комплексной обработки данных для мониторинга ЧС

Обнаружение ЧС и их последствий, таких как пожары, гари или наводнения, возможно по многоспектральным данным, например с КА «Канопус-В», «БКА», «Ресурс-П», Landsat-8, WorldView-2 и др. Пространственное разрешение используемых материалов зависит от конкретной задачи и масштаба происшествия.

Технология выявления опасных процессов и явлений включает в себя полный цикл обработки пространственных данных и состоит из следующих этапов:

1. Предварительная обработка материалов ДЗЗ:

– формирование маршрутов съемки из исходных данных (при необходимости);

– геокодирование данных (по бортовым данным с использованием RPC-коэффициентов, ортотрансформирование с учетом ЦМР, уточнение привязки по опорным точкам);

– устранение регулярных/нерегулярных шумов, дефектов, артефактов;

– радиометрическая коррекция:

– цветовая/тоновая коррекция;

– повышение качества материалов (резкости, четкости, детальности);

– атмосферная коррекция.

2. Тематическая обработка данных ДЗЗ:

– формирование и анализ индексных изображений (например, NDVI, NDWI, NBR, TVDI и др.);

– кластеризация, классификация с обучением;

– анализ гиперспектральных данных (в т. ч. работа со спектральными библиотеками).

3. Векторизация результатов тематической обработки:

– наполнение векторных данных атрибутивной информацией;

– создание и назначение стилей отображения векторных объектов;

– формирование тематических и топографических классификаторов объектов (с учетом типа объекта, стиля и масштаба отображения, набором атрибутивных данных).

4. Автоматизация технологии обработки данных (в рамках ПК ИМС).

Мониторинг пожаров

Лесные пожары остаются одним из самых мощных природных катастрофических явлений. Своевременное обнаружение очагов возгорания и наиболее полное информационное обеспечение во многом определяют эффективность принимаемых мероприятий по предупреждению и ликвидации угрозы для экономически важных объектов и населения прилегающих территорий. Главными задачами космического мониторинга пожаров являются оперативное определение очагов пожаров и оценка площадей гарей.

Технология мониторинга пожаров и гарей была применена при обработке материалов с КА Landsat-8 на территорию Астраханской области. Сочетание засушливого климата зоны пустынь и интразональной пойменной зоны Волго-Ахтубинской поймы определяет разнообразие природных ландшафтов данной территории. Астраханская область обладает богатым биологическим потенциалом. В настоящее время на территории области существует сеть особо охраняемых природных территорий, которая состоит из 2 государственных природных заказников, 3 биологических заказников и 35 памятников природы.

На этапе предварительной обработки создается векторный слой маски облаков по каналу BQA для исключения из обработки зон с низкой вероятностью дешифрирования. По векторной карте ландшафтов РФ (составлена на основе «Национального Атласа России. Том 3. Природа») для исследуемой территории была определена ландшафтная зона – интразональная пойменная. Тематическая обработка осуществлялась методом классификации объектов на изображении по обучающей выборке для соответствующей зоны. В результате обработки были сформированы векторные объекты, насыщенные атрибутивной информацией, соответствующие очагам пожаров и гарям (рис. 1).

Для решения поставленной задачи мониторинга пожаров возможно применение других методов тематической обработки с целью дешифрирования и выявления требуемого класса объектов, например построения и анализа температурных карт.

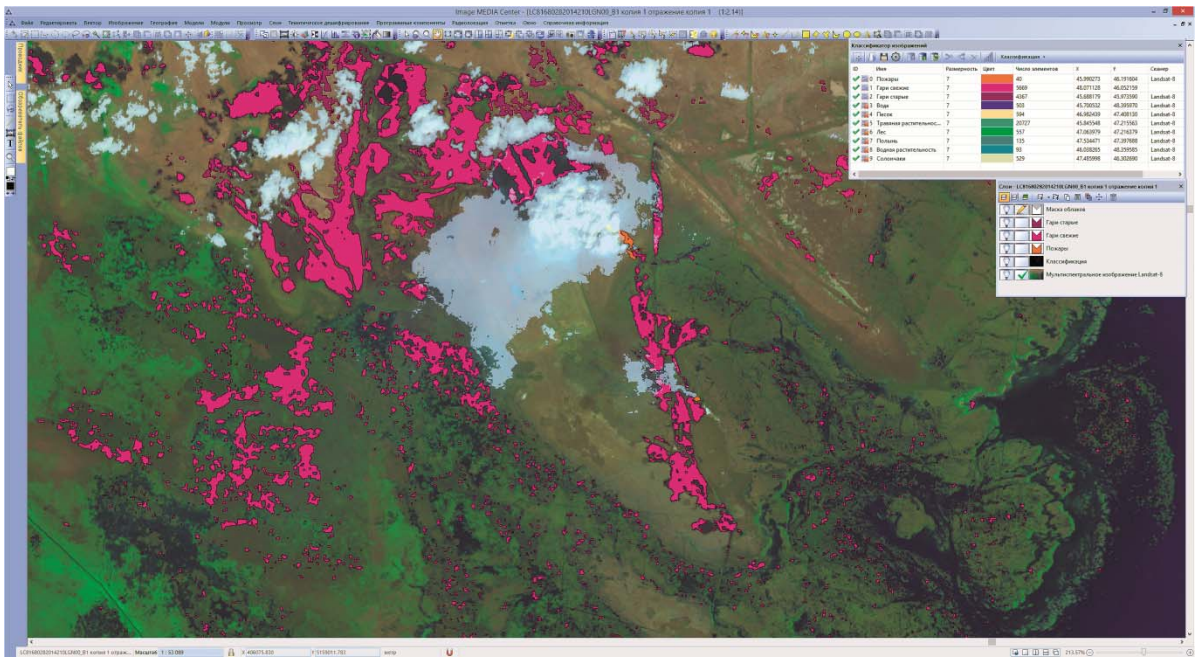


Рис. 1. Результат выявления очагов пожара и гарей по данным КА Landsat-8. Астраханская область

Для определения температуры поверхности по тепловым каналам КА Landsat-8 производятся вычисления спектральной интенсивности излучения, поверхностной яркостной температуры, спектрального коэффициента излучения, значений температур поверхности в градусах Цельсия. Визуальное представление результата осуществляется с применением универсальной температурной шкалы [–100; +100] (рис. 2). Области высоких температур классифицируются как очаги пожаров. Данные области векторизуются и наполняются соответствующей атрибутивной информацией.

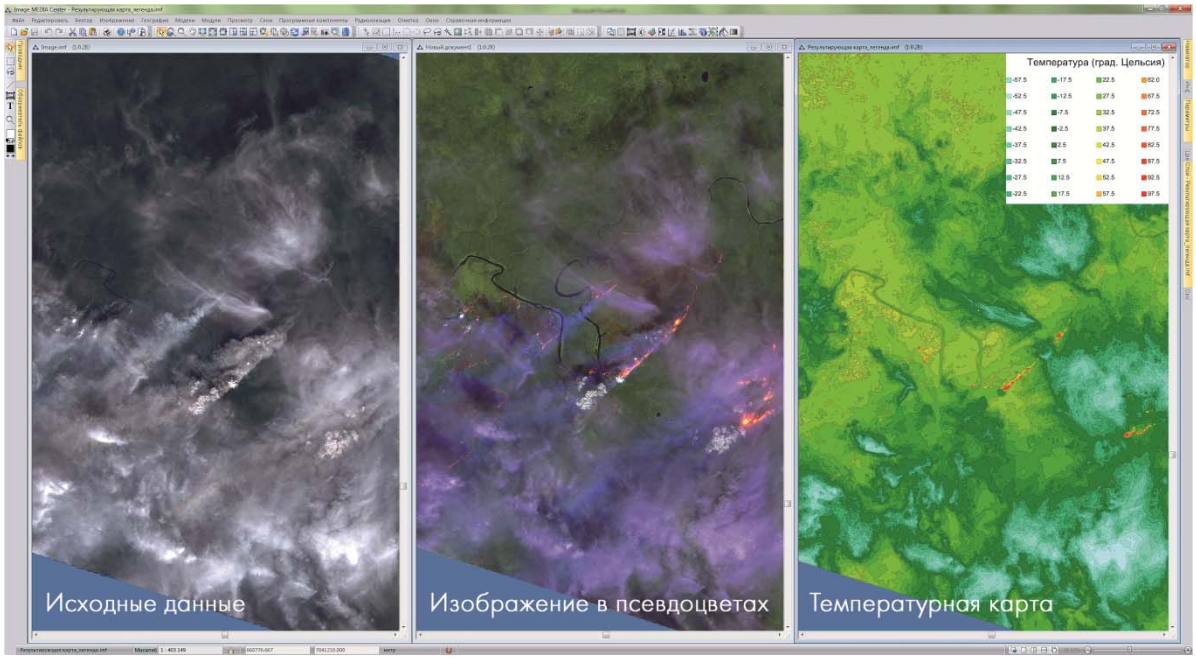


Рис. 2. Результат выявления очагов пожара по тепловым данным КА Landsat-8. Республика Саха

Мониторинг наводнений

Применение космического мониторинга наводнений позволяет получать оперативную и достоверную информацию по масштабам затопления и пострадавшим от наводнения участкам, в том числе населенным пунктам.

Технология мониторинга наводнений основывается на разновременном анализе данных КА Landsat-8 (рис. 3). Рассмотрена территория Хабаровского края, где в 2013 г. произошло крупное наводнение, вызванное интенсивными затяжными осадками, что привело к последовательному увеличению уровня воды в реке Амур.

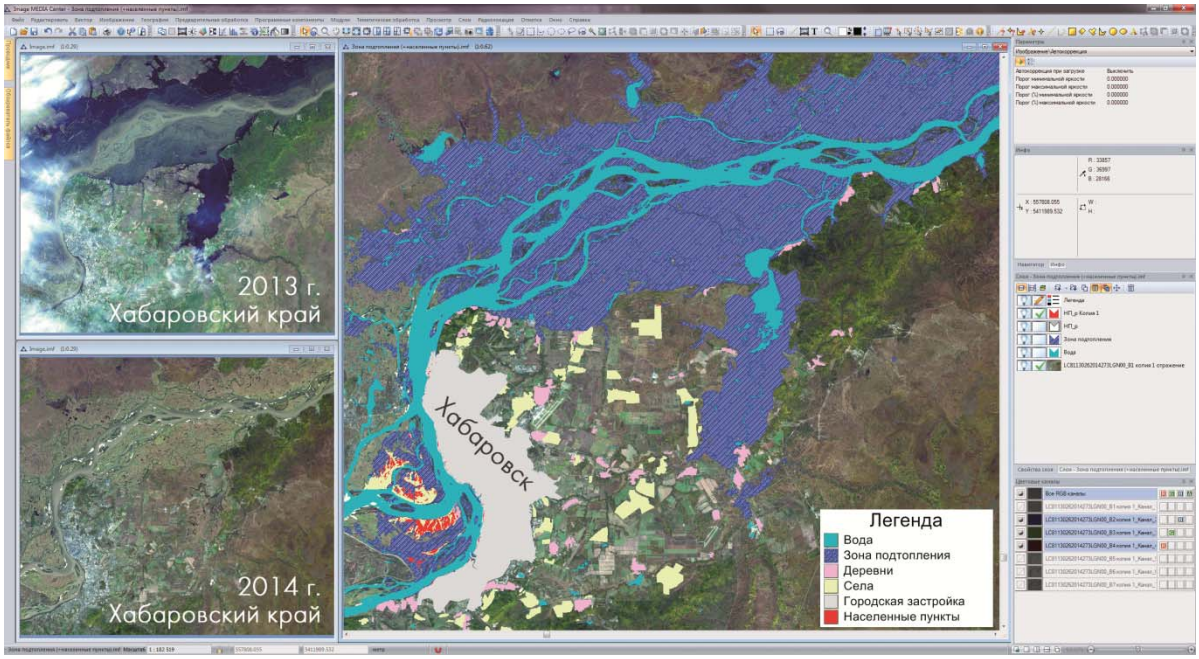


Рис. 3. Мониторинг наводнений по данным КА Landsat-8. Хабаровский край

На этапе тематической обработки для архивных и актуальных данных формируются векторные слои водных объектов с атрибутивной информацией. Далее производится выделение непосредственно зон затоплений, расчет площадей. Для оценки последствий наводнений осуществляется загрузка топографических карт и геопространственный анализ (пересечение векторных слоев зон затоплений и населенных пунктов). Результатом анализа является сводная информация о суммарной площади затопленных территорий и количестве пострадавших населенных пунктов.

Заключение

Технология комплексной обработки данных ДЗЗ и векторных карт позволяет решать задачи по обработке и анализу геопространственных данных в рамках единой системы, что значительно сокращает затраты на временные и стоимостные ресурсы. Автоматизированные алгоритмы обработки, реализуемые в ПК ИМС, позволяют анализировать не только качественные, но пространственные и временные изменения, происходящие на территории мониторинга.

Многофакторный анализ в единой геоинформационной среде позволяет своевременно выявлять критичные места, оперативно реагировать на отрицательные изменения и принимать управленческие решения для предотвращения негативных последствий в случае обнаружения ЧС.

УДК 504.5.06:622:528.8.044.2

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ SBAS ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ КУЗБАССА)

В. П. Потапов, Л. С. Миков
Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал)
e-mail: vadimptpv@gmail.com
e-mail: mikov@ict.sbras.ru

Рассмотрены вопросы оценки состояния и изменения земной поверхности в центральной части Кузбасса. Продемонстрировано применение многопроходной серии спутниковых радарных данных высокого разрешения за период с 2011 по 2014 г. с использованием метода интерферометрии малых базовых линий (SBaS) для оценки и выявления динамики смещений земной поверхности в горнодобывающих районах с помощью построенных карт вертикальных смещений.

Ключевые слова: радарные данные, интерферометрия малых базовых линий, карта вертикальных смещений, радарная интерферометрия, деформация земной поверхности.

Одним из результатов все более интенсивного освоения недр стало глобальное изменение экологической и геодинамической безопасности природной среды. Интенсивная добыча полезных ископаемых привела к увеличению нагрузки на недра и, как следствие, к перераспределению напряженно-деформируемого состояния весьма значительных объемов горной массы с неблагоприятными последствиями для окружающей природной среды [2]. Деформации земной поверхности угледобывающих регионов, возникающие вследствие неравномерных оседаний и горизонтальных сдвижений горных пород, достигают больших по протяженности территорий и являются источником аварийных ситуаций, которые, в свою очередь, могут нанести вред не только окружающей среде и режиму работы предприятия, но также и человеческим жизням.

На сегодняшний день Кузбасс – это крупнейший горнопромышленный регион в России. Его отличительной особенностью является высокая техногенная нагрузка, связанная с постоянным увеличением объемов угледобычи. Более того, на территории Кузбасса каждый год происходит более десяти тысяч геодинамических событий как природного, так и техногенного характера (промышленные взрывы). В июне 2013 г. и в августе 2014 г. на территории Кемеровской области было зарегистрировано два землетрясения с магнитудой 5,6 и 3,4 соответственно.

В настоящее время определение деформаций земной поверхности осуществляется, как правило, традиционными маркшейдерско-геодезическими методами, однако эти методы требуют крупных финансовых и временных затрат. Помимо того, оперативность получения информации на основе таких методов является достаточно низкой, так как для получения динамики развития деформационных процессов требуются выполнение постоянных серий наблюдений и постоянная постобработка их результатов [2]. Альтернативный способ измерений – использование относительно дешевых спутниковых радарных данных, которые позволяют выявить любые изменения (вертикальные и горизонтальные смещения) земной поверхности с миллиметровой точностью, произошедшие за период между съемками, а также произвести площадную оценку на территориях от нескольких десятков до тысяч квадратных километров.

Деформации поверхности могут быть вызваны различными видами антропогенных или природных процессов, например, с одной стороны, горными

работами или удалением грунтовых вод и, с другой, землетрясениями, вулканической активностью или оползнями. Величина такого деформационного процесса может составить несколько сантиметров в год. В зависимости от типа процесса деформации изменения могут происходить медленно с постоянной скоростью или внезапно (например, землетрясения). В любом случае крайне трудно, а иногда даже невозможно контролировать такие тонкие изменения с помощью оптических датчиков. Потенциал радиолокационного дистанционного зондирования для обнаружения незначительных значений смещений земной поверхности с помощью интерферометрии был исследован относительно давно [3]. В результате были разработаны три основных метода обработки радарных данных – дифференциальная интерферометрия (DinSAR), интерферометрия постоянных отражателей (PSI) и интерферометрия малых базовых линий (SBaS). Все эти методы основаны на интерферометрической обработке пар снимков (InSAR) [4].

Для осуществления площадной оценки деформаций земной поверхности был использован метод перекрестной интерферометрии малых базовых линий (SBaS). Данный метод, в отличие от классического метода радарной интерферометрии, предполагает обработку не одной пары изображений, а многопроходной серии радарных снимков. Все это позволяет выявить динамику изменений за период от нескольких месяцев до нескольких лет [2]. В Кузбассе спутниковые радиолокационные данные для определения смещений поверхности применяются впервые.

Исследования проводились на территории городов Ленинск-Кузнецкий, Полысаево, Белово. В ходе работы был сформирован массив из 13 радарных изображений высокого разрешения со спутника COSMO SkyMed (Италия) за период 2011–2014 гг.

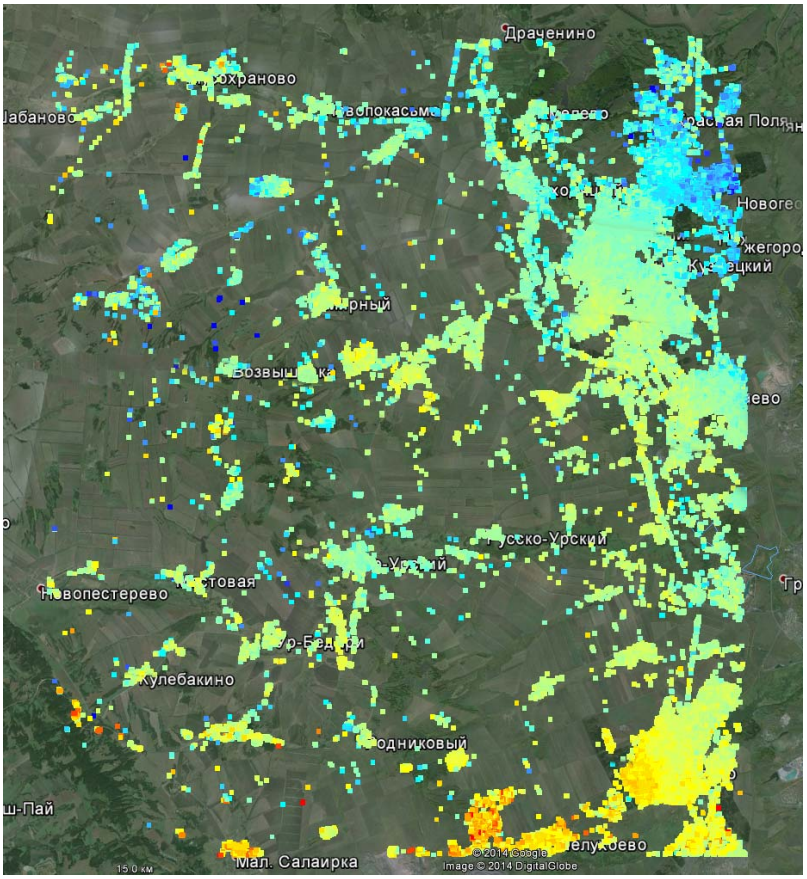


Рис. Карта вертикальных смещений (среднее значение в мм/год), полученная методом SBaS (по данным Cosmo-SkyMed 2011–2014 гг.). Р-н Ленинск-Кузнецкий-Полысаево-Белово

В ходе обработки исходных радарных изображений методом SBaS была построена карта вертикальных смещений (рисунок). Данная карта представляет собой векторный файл с 90592 точками, в каждой из которых можно посмотреть изменения вертикальных смещений в определенный промежуток времени и среднюю скорость изменения (мм/год). Синим цветом выделены точки с отрицательными вертикальными смещениями, означающие просадки земной поверхности, красным – поднятия земной поверхности, светло зеленым – стабильные участки без изменений. Полученные результаты показали, что в районе города Ленинск-Кузнецкого наблюдается постоянное опускание земной поверхности со средней скоростью около 16 мм/год, а в районе города Белово, наоборот, поднятия со скоростью около 18 мм/год.

Оценка вертикальных смещений по данным многопроходной космической радиолокационной съемки даже за такой длительный период показывает возможность решения проблемы определения деформаций земной поверхности для региона и целесообразность осуществления постоянного мониторинга с применением технологий радарной интерферометрии на территории угледобывающих городов Кузбасса. Кроме того, полученные результаты позволяют оценить влияние горного производства на окружающую среду. В дальнейшем спутниковый мониторинг вертикальных смещений может служить основой для последующей разработки природоохранных мероприятий.

Список литературы

1. Кантемиров Ю.И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии ее многопроходных вариаций PS и SBaS // Геоматика. 2012. № 1. С. 22–26.

2. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. … канд. техн. наук. Пермь, 2012. 146 с.

3. Soergel U. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Hannover: Springer. 2012. 277 c.

4. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodrıguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc IEEE 88(3). 2000. С. 333–382.

УДК 528.855, 537.876.23

АЛГОРИТМ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКА SMOS

А. Н. Романов, И. В. Хвостов
Институт водных и экологических проблем СО РАН
e-mail: ran@iwep.ru, e-mail: nii82@mail.ru

По данным спутника SMOS исследованы вариации радиояркостных температур подстилающей поверхности, включающей в себя участки солончаков. Показано, что радиоизлучение почвенного покрова зависит от термодинамической температуры, влажности, засоленности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновый диапазон, засоленные почвы, радиояркостная температура, коэффициент излучения.

1. Введение

В настоящее время площади, занятые засоленными почвами, исчисляются миллионами гектар [1, 2]. Для мониторинга процессов засоления является перспективным использование микроволновых методов зондирования [3]. Разработаны микроволновые методы дистанционной оценки температуры и объемной влажности почвенного покрова [4, 5]. С 2009 г. выполняется международный проект SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), основной целью которого является составление глобальных карт почвенной влажности и солености океана [6; 7]. Для повышения репрезентативности спутниковой информации возможно проведение совместных измерений излучательных параметров подстилающей поверхности в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах [8], а также использование результатов лабораторных измерений диэлектрических параметров засоленных и незасоленных почв [9].

В данной работе представлен алгоритм дистанционного определения влажности почвы, основанный на использовании спутниковых снимков SMOS, откалиброванных в единицах радиояркостных температур, и эмпирических зависимостей коэффициентов излучения засоленных и незасоленных почв от влажности. Для учета засоленности почвы использовались данные спутникового зондирования в микроволновом и инфракрасном диапазонах, наземные измерения температуры и влажности почв, лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов почв и воды, отобранных на тестовых участках.

2. Методика эксперимента

Исследования проводились на территории Кулундинской равнины. Радиояркостные температуры подстилающей поверхности определялись по снимкам спутника SMOS уровня обработки L1c [10], полученным на частоте 1.41 ГГц интерференционным радиометром MIRAS на горизонтальной поляризации при угле зондирования 42,5º. Данные SMOS уровня L1c привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 [11].

Пространственное распределение термодинамической температуры подстилающей поверхности оценивалось по данным радиометров MODIS/Terra (продукт MOD11A1) и MODIS/Aqua (продукт MYD11A1). Из сравнения наземных и спутниковых данных следует, что для почв с объемной влажностью $W = 0{,}1 \div 0{,}5$ в утренние и вечерние часы, соответствующие пролету спутника SMOS, модуль градиента температуры в слое 0–10 см не превышает 0,5 К/см. В рассматриваемых

условиях различие между температурой излучающего слоя $T_Э$ и определяемой по данным MODIS температурой на поверхности T не превышает 0,5 K, т. е. находится в пределах погрешности измерений радиометров MODIS.

На основе определенных спутниковыми радиометрами Miras и MODIS значений радиояркостных ($T_Я$) и термодинамических (T) температур рассчитывались коэффициенты излучения подстилающей поверхности по формуле $\chi_Н = T_Я/T$.

По данным лабораторных измерений диэлектрических характеристик почв рассчитывались коэффициенты излучения χ на горизонтальной поляризации для угла визирования 42,5º с относительной погрешностью не более 7 %. Объемная влажность W почвенных образцов определялась термостатно-весовым способом с относительной погрешностью не более 3 %.

По измеренным в лабораторных условиях значениям χ и W строились зависимости $W(\chi)$ для участков почв, попадающих в каждую геодезическую ячейку. Объемная влажность почвы рассчитывалась на основе зависимостей $W(\chi)$, где величины χ определялись по данным спутниковых измерений $T_Я$ и T.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 приведены карты-схемы пространственного распределения радиояркостных температур, построенные с использованием топографической основы и изображений со спутника Landsat и спутниковых снимков SMOS, сделанных около 6 часов утра 2 августа 2014 г. Для возможности интерпретации данных SMOS значения $T_Я$ пересчитывались в значения W с использованием данных MODIS (спутник Terra), и экспериментальных зависимостей $W(\chi)$, приведенных на рис. 2, *а*. Выбор аппроксимирующей функции осуществлялся по минимальной среднеквадратичной погрешности с помощью пакета прикладных программ «Origin 6.1».

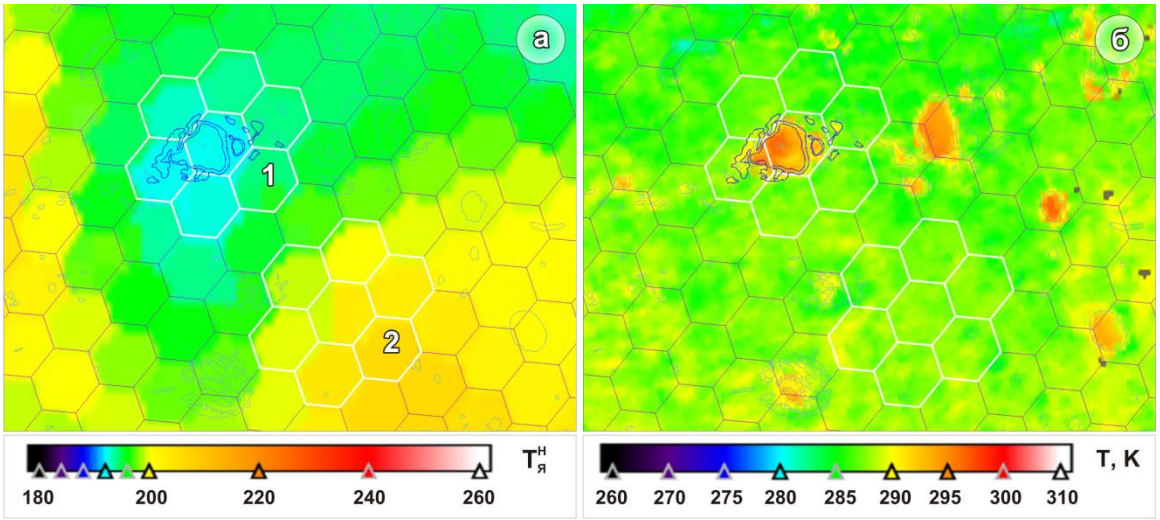


Рис. 1. Карта-схема пространственного распределения радиояркостных (а) и термодинамических (б) температур на тестовых участках: 1 – засоленные почвы, 2 – не засоленные почвы

Из анализа экспериментальных данных следует, что засоленные почвы с одной и той же влажностью, но разной засоленностью и типом почвенного засоления имеют разные радиоизлучательные характеристики.

Заметное влияние на радиоизлучение почвенного покрова оказывает температура. На рис. 2, *б* приведены зависимости $T_Я(T)$, построенные по данным лабораторных измерений для образцов незасоленной (1) и засоленной (2) почв, отобранных с участка

степи (W = 0,21) и поверхности солончака (W = 0,29). Значения $T_я$ (график 1) для незасоленной почвы зависят от T, при этом радиоизлучательные свойства почвы не изменяются и коэффициент излучения $\chi \approx 0{,}82$ в пределах погрешности не зависит от T. Зависимость $T_я(T)$ (график 2) для образца засоленной почвы, аппроксимированная полиномом второй степени, имеет вид

$$T_я = (1189 \pm 104) - (6{,}6 \pm 0{,}68)\, T + (0{,}011 \pm 0{,}0011)\, T^2,\ \sigma = 1{,}06.$$

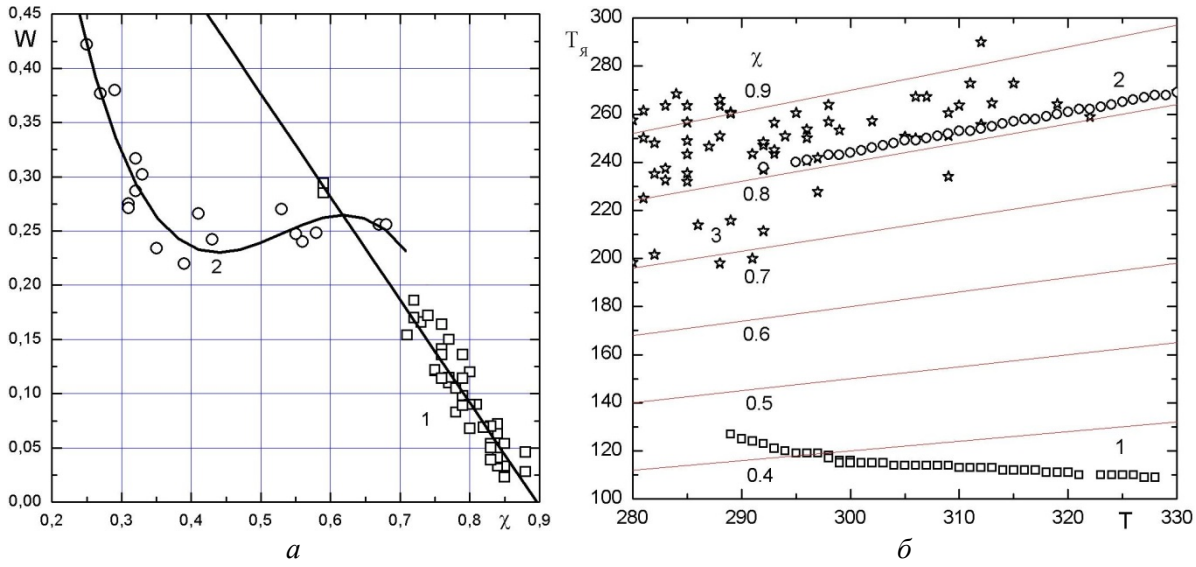


Рис. 2. Зависимости коэффициента излучения от объемной влажности почвы (*а*) и радиояркостной температуры от термодинамической температуры (*б*): 1 – незасоленная почва, 2 – засоленная почва, 3 – данные спутниковых радиометров Miras и MODIS

Использование зависимостей $T_я(T)$ с нанесенными изолиниями χ позволяет провести валидацию данных дистанционного зондирования. Экспериментальные точки, лежащие выше изолинии $\chi = 1$ (на рисунке не указаны), могут быть связаны с дефектами съемки, наличием на земной поверхности искусственных объектов с высокой термодинамической температурой (промышленные объекты, огненные факелы на нефтегазовых месторождениях и др.) или происходящими катастрофическими природными явлениями (лесные и степные пожары), попадающими в диаграмму направленности антенн спутникового радиометра.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что использование снимков SMOS, откалиброванных в единицах радиояркостных температур и снимков MODIS, откалиброванных в единицах термодинамических температур, позволяет рассчитать коэффициенты излучения подстилающей поверхности. Лабораторные зависимости $W(\chi)$, позволяют учесть физические свойства почв. Совместное использование данных SMOS, MODIS и зависимостей $W(\chi)$, позволяет определить объемные влажности почвы с учетом почвенного засоления.

Использование нескольких зависимостей $W(\chi)$ для одной геодезической ячейки при известной площади участков почвенного засоления позволяет учесть влияние засоленности при определении влажности почвы и тем самым повысить точность дистанционного определения влажности почвы.

Снимки SMOS получены в рамках проекта ESA № 4747 «Remote mapping of Siberian saline soils». Экспедиционное обследование территории выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-05-05018 и № 15-45-04060.

Список литературы

1. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Площади засоленных почв в земельном фонде России // Почвоведение. 2005. № 8. С. 930–944.

2. Редли М., Панкова Е.И. Результаты современных исследований засоленных почв в Европе // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1473–1485.

3. Романов А.Н. Дистанционная оценка степени деградации почв по их радиоизлучательным свойствам // Почвоведение. 2009. № 3. С. 355–363.

4. Hoareau N., Umbert M., Martínez J. et. all. On the potential of data assimilation to generate SMOS-Level 4 maps of sea surface salinity // Remote Sensing of Environment. Vol. 146. 25 April 2014. P. 188–200.

5. Wigneron J.-P., Schwank M., Baeza E.L. et. all. First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region // Remote Sensing of Environment. Vol. 124. September 2012. P. 26–37.

6. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P. et. all. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the GlobalWater Cycle // Hroceedings of IEEE. Vol. 98, No. 5. P. 666–687. May 2010.

7. Panciera R., Walker J.P., Kalma J., Kim E. A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels // Remote Sensing of Environment. Vol. 115, Issue 12.15 December 2011. P. 3343–3354.

8. Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review // Geoderma.Vol. 162, Issues 1–2. 15 April 2011. P. 1–19.

9. Романов А.Н., Хвостов И.В. К вопросу о валидации данных спутникового микроволнового зондирования в условиях почвенного засоления // Исследование Земли из Космоса. 2015. № 1. С. 65–73.

10. Gutierrez A., Castro R. (2010). SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1PP-0009. Issue 2.7. 31 May 2010.

11. Sahr K., White D., Kimerling A.J. (2003). Geodesic Discrete Global Grid Systems // Cartography and Geographic Information Science, 30. P. 121–134.

12. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ПРОДУКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРИБОРА OMPS КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА SUOMI NPP

Е. И. Сапрыкин, М. П. Шагаев
СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Новосибирск

В данной работе представлен краткий обзор основных алгоритмов, применяемых при мониторинге концентрации аэрозолей и озона, полученные прибором OMPS, установленном на космическом аппарате SUOMI-NPP.

Введение

Важнейшие климатические и экологические особенности Земли в решающей степени определяются наличием и свойствами ее газовой оболочки – атмосферы. Благодаря специфическому газовому составу, способности поглощать и отражать солнечную радиацию, озоновому слою, в котором задерживается основная часть коротковолнового излучения Солнца, благоприятному температурному режиму и присутствию водяного пара, атмосферу можно назвать одним из основных источников жизни на земле.

Одними из компонентов атмосферы, оказывающих влияние на качество воздуха и климатическую системы Земли, являются аэрозоли. Аэрозоли – это твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе. В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в виде дыма, тумана, мглы или дымки. Источниками аэрозолей могут быть лесные пожары, пустынные бури, извержения вулканов и пр. В связи с тем, что проводить наблюдения наземными измерениями по всему Земному шару затруднительно, а влияние пустынных бурь и лесных пожаров распространяется на большие расстояния, проводить полномасштабный мониторинг этих атмосферных составляющих возможно только путём спутниковых измерений. Ниже приведены примеры аэрозолей, как они выглядят на спутниковых изображениях.

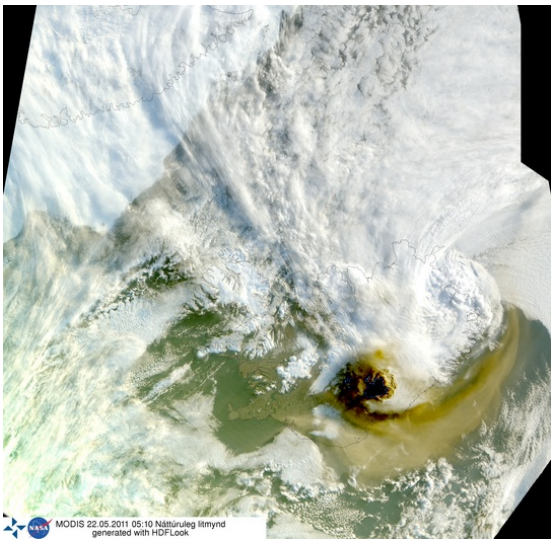


Рис. 1. Извержение вулкана Гримсвотн

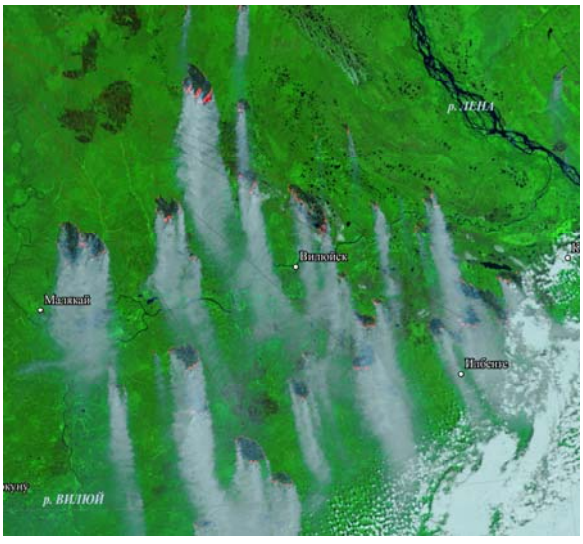


Рис. 2. Дымы от лесных пожаров в Якутии

Озон является одним из важнейших компонентов в атмосфере Земли, так как озоновый слой в стратосфере поглощает вредную ультрафиолетовую радиацию и ограждает от неё Земную поверхность. В тропосфере озон – главным образом результат антропогенного загрязнения, и поэтому более высокие его концентрации характерны

для городских областей. Озон в стратосфере уничтожается реакциями с хлором, полученным из хлорфторуглеродов (CFCs), что приводит к истощению озонового слоя и, как следствие, увеличению количества солнечной ультрафиолетовой радиации, достигающей поверхности Земли. Измерение концентрации озона – важная задача для экологов всего мира. Отдельные наблюдения за озоном проводились еще в 1920-х гг., но систематические измерения начались лишь 50 лет назад.

SUOMI-NPP – американский метеорологический спутник, управляемый NOAA, запущенный в 2011 г., на данный момент является одним из самых лучших метеорологических спутников. Благодаря высокому пространственному разрешению (12x12 км) в надире OMPC обеспечивает более точную оценку концентрации веществ, загрязняющих атмосферу, а также позволяет проследить их перемещение в атмосфере. Целями мониторинга атмосферы прибором OMPS являются наблюдение дымов от природных пожаров, аэрозолей, выбросы SO_2 при вулканических извержениях, прочие атмосферные загрязнения, а также уровень ультрафиолетового излучения подстилающей поверхности, которое представляет угрозу здоровью людей. Концентрация в атмосфере аэрозолей определяются по количеству рассеянного излучения ближайшего ультрафиолетового (УФ) диапазона. На основе этих данных рассчитывается аэрозольный индекс атмосферы (АИ), который представляет собой качественный показатель присутствия поглощающих ультрафиолет аэрозолей, таких как дым и минеральная пыль, а также восстанавливается профиль озона. Несмотря на то, что аэрозольный индекс – только качественный показатель присутствия поглощающих излучение аэрозолей, многие ученые успешно используют его в различных областях. Например, аэрозольный индекс был использован для определения основных источников загрязнения воздуха по всему земному шару, а также отслеживания распространения загрязнений через океаны и континенты. На сайте НИЦ «Планета» предоставлена визуализация данных с прибора OMPC в виде карт концентрации озона и аэрозольного индекса.

Физика ультрафиолетового излучения в атмосфере

Аппарат OMPS принимает рассеянное земной атмосферой излучение в интервале длин волн 270–500 нм. Так как озон имеет свойство поглощать излучение только в определенном спектре (рис. 3), для создания карт концентрации озона используется излучение с длинами волн короче 340 нм в области, где поглощение озоном ультрафиолета достаточно велико для получения достоверных результатов. Излучение с длиной волн более 340 нм используется для поиска и определения свойств аэрозолей, облаков, а также ряда газов (OClO, BrO, HCHO, NO_2) [2].

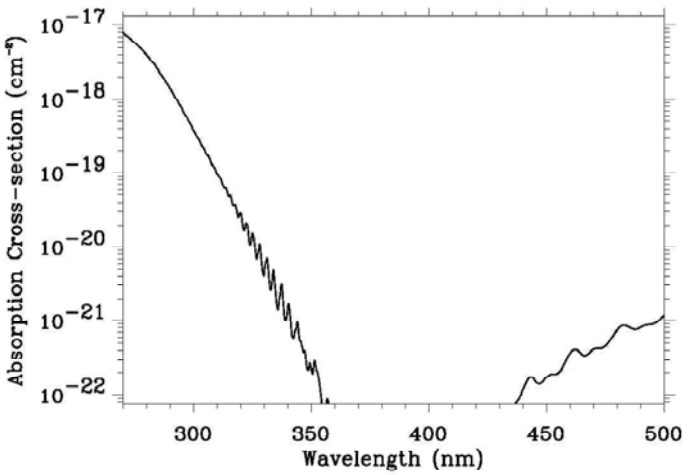


Рис. 3. Кривая интенсивности поглощения озоном УФ излучения

Поглощение озоном УФ излучения. Большая часть коротковолнового УФ излучения (порядка 90 %) поглощается и рассеивается в стратосфере, но малая часть излучения с длиной волны менее 295 нм достигает тропосферы и подстилающей поверхности. Из этого можно сделать вывод, что коротковолновое УФ излучение почти не рассеивается на аэрозолях и облаках в тропосфере.

Таким образом, обратное рассеянное излучение состоит из излучения от молекулярного Рэлеевского рассеяния в стратосфере с небольшим вкладом рассеяния на аэрозолях на некоторых видах облаков (перламутровые и серебристые), а также излучения от молекул NO или ионов Mg^{++}.

На рис. 4 изображена зависимость вклада рассеянного излучения от высоты (давления). Назовём эту зависимость функцией вклада в излучение. На изображении видно, что основная часть коротковолнового УФ излучения рассеивается на промежутке шириной в 16 км в районе 40 км от поверхности [2].

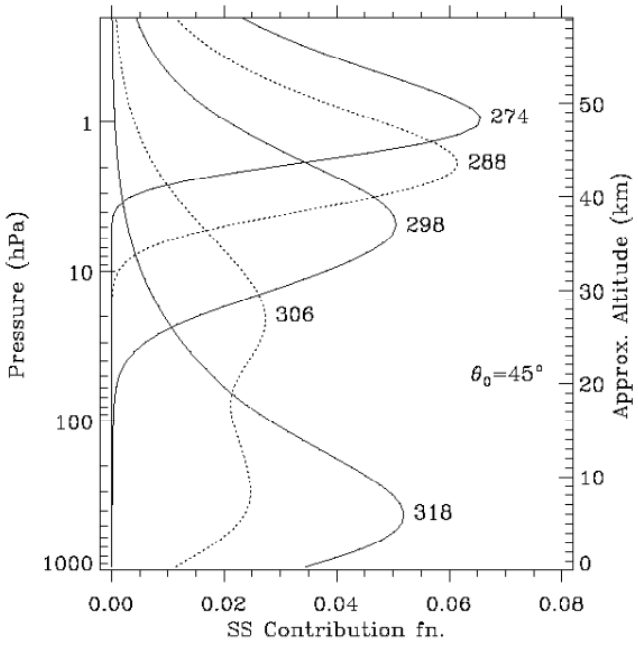


Рис. 4. Функции вклада в излучение в зависимости от длины волны

Из графиков видно, что на длине волны около 305 нм у функции появляется два пика. При увеличении длины волны стратосферный пик уменьшается, а тропосферный увеличивается. Так как более 95 % озона находится выше тропосферного пика, то количество излучения из тропосферы определяется полным столбом озона, тогда как излучение из стратосферы определяется только озоном, находящимся выше пика. Таким образом, излучение с длиной волны >310 нм подходит для измерения количества всего озона в атмосферном столбе, тогда как излучение с длиной волны около 300 нм даёт информацию об озоне в стратосфере.

Также необходимо отметить типы взаимодействий УФ в атмосфере: Рэлеевское молекулярное рассеяние, взаимодействие с газами атмосферы (кроме азота и кислорода), рассеяние в облаках, взаимодействие с аэрозолями и отражение от земной поверхности. Каждый из этих факторов вносит определенный вклад в спектр и интенсивность обратного излучения.

Алгоритм расчета озона TOMC-V8

Идея алгоритма была предложена еще в 1967, и в 1971 г. уже был реализован на космическом аппарате Nimbus-4. За прошедшие годы алгоритм был усовершенствован и доработан.

Алгоритм основывается на двух допущениях. Первое допущение, это то, что количество рассеянного излучения с длиной волны более 310 нм пропорционально количеству озона во всём атмосферном столбе. Второе допущение связано с тем, что модели взаимодействия излучения с атмосферой, в которой облака, аэрозоли и поверхность рассматриваются как Ламбертовы отражатели. Однако, касательно второго допущения, в некоторых специфических ситуациях необходим дополнительный контроль. То есть в некоторых случаях необходимо проводить полуэмпирическую коррекцию, основанную на более точных моделях переноса излучения, таким образом минимизируя ошибки.

Озон, озоновые и температурные профили. В целом рассеянное УФ излучение любой длины волны зависит от концентрации озона и температурного профиля. Хотя для излучения с λ = 317,5 нм эти эффекты слабы, их необходимо учитывать для повышения точности оценки содержания озона.

В алгоритме TOMS V8 для расчета общего количества озона используется набор профилей концентрации озона, которые соответствуют от широте и месяцу года. Также используется набор данных соответствия озонового и температурного профилей. В итоге имеем набор профилей, сочетающий в себе температуру, концентрацию озона, широту и время года (всего 1512 профилей).

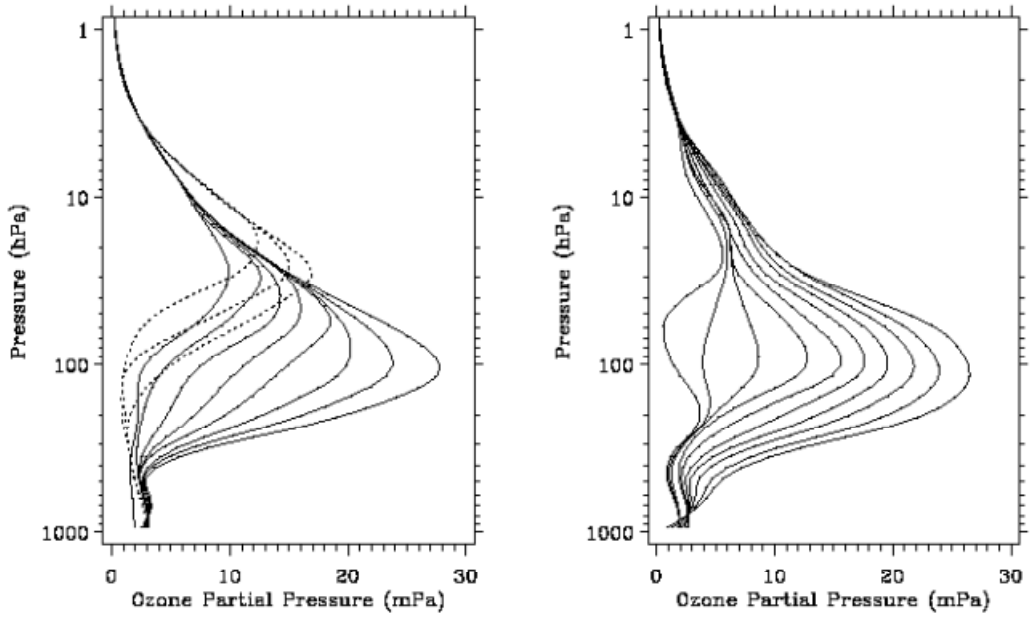


Рис. 5. Профили O3, используемые для генерации таблиц излучения. Слева показаны 3 профиля экваториальных широт (прерывистые линии) и 8 профилей со средних широт. Справа изображены 10 профилей околополярных и полярных широт

Обратная модель. В алгоритме для определения озона используется излучение двух длин волн: слабо поглощаемое излучение с λ = 331,2 нм для оценки эффективной поверхности отражения и излучение с λ = 317,5 нм, поглощаемое озоном для оценки общего его количества. Целесообразность такого подхода определяется тем, что, за исключением озона, взаимодействия в атмосфере у этих излучений идентичные.

Для решения обратной задачи дистанционного зондирования используются априорные данные. Эти данные представляют из себя набор из 1512 профилей, описанных выше. Для выбранной широты и времени года из этого набора выбираются определенные профили, вследствие чего создается наиболее правдоподобная математическая модель для связи обратнорассеянного излучения с длиной волны 317,5 нм и концентрацией озона.

Результаты работы алгоритма с использованием двух частот достаточно хорошие (ошибка < 2 %), однако ошибка увеличивается в приполярных областях. Такие ситуации фиксируются, когда появляется расхождение между измеренной и смоделированной яркостью. В таком случае проводится корректировка.

Расчет Озона. В алгоритме используются две длины волны.
На основе одной рассчитывается эффективное отражение сцены.

$$R = \frac{(Im - Ia)}{[Ir + Sb(Im - Ia)]},$$

где Im – измеренная яркость; Ia и Ir – смоделированные яркости над водной или земной поверхностью. Если R < 0,15, алгоритм считает, что облаков нет. В противном случае эффективное отражение от облаков рассчитывается отдельно.

Используя полученные R и fc, необходимо сопоставить яркость излучения с длиной волны 317,5 нм с смоделированной на основе априорных файлов. Для данных широты и месяца года подбираются от 3-х до 10-ти озоновых профилей и температурный профиль. В результате рассчитывается теоретическая величина излучения. Разница между измеренной и смоделированной интенсивностью излучения обычно не более 3 %, но при определённых углах солнца эта разница может доходить до 10 %. В таком случае проводится коррекция оценки общего атмосферного озона по формуле

$$\Omega ap = \Omega o - (\ln(Iap) - \ln(Io))\,{}^{d\ln(I)}/_{d\Omega},$$

где I_{ap} – смоделированная интенсивность, а Io – измеренная.

Валидация результатов алгоритма оценки общего озона в атмосфере. При сравнении результатов работы алгоритма по вычислению общего озона в атмосфере с данными наземных станций были получены следующие результаты (рис. 6 и 7).

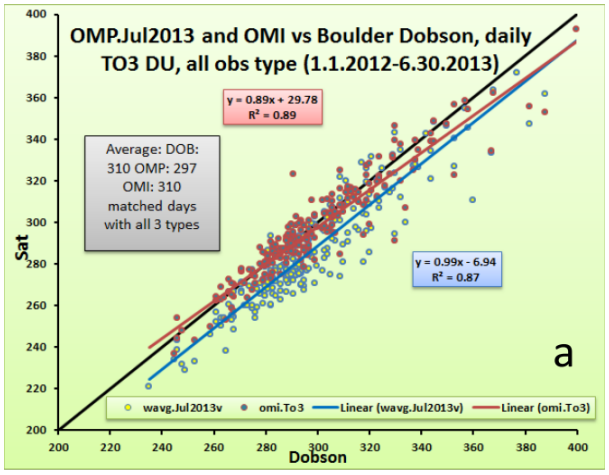


Рис. 6

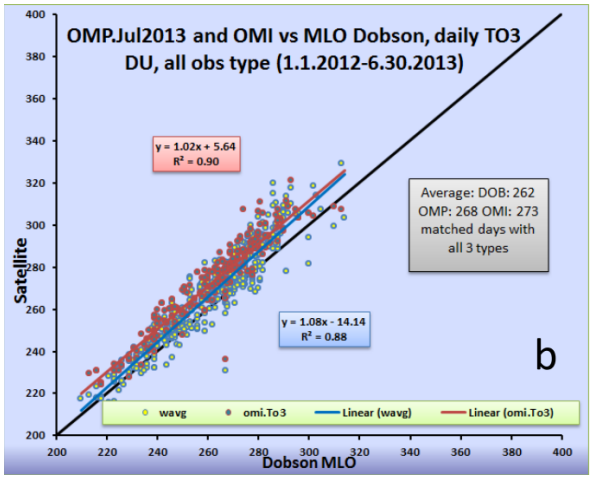


Рис. 7

Максимальная разница между значениями оценки по данным прибора OMPS и результатами измерений наземной станции – 12 DU, что попадает в оценку точности метода –3 %.

Аэрозольный индекс. Аэрозольный индекс определяется как спектральный контраст в УФ-области спектра, где поглощение озона очень мало. Аэрозольный индекс – это разность между отношением измеренных интенсивностей отраженного

излучения с длинами волн 360 нм и 331 нм и отношением интенсивностей, рассчитанных по теории Рэлеевского рассеяния частицами в атмосфере.

$$AI = 100\ [\ \log_{10}(I_{360}/I_{331})_{измер} - \log_{10}(I_{360}/I_{331})_{теор}].$$

Положительные значения АИ, как правило, означают наличие в атмосфере поглощающих аэрозолей, таких как дым, минеральная пыль или вулканические аэрозоли. Отрицательные значения АИ означают присутствие непоглощающих аэрозолей (например сульфаты и частицы морской соли) из природных и антропогенных источников. Нулевые значения характерны для облачности [3].

Использование аэрозольного индекса.

1. АИ применяется при атмосферной коррекции космических снимков.
2. Мониторинг источников аэрозолей.
3. Мониторинг дыма от лесных пожаров и вулканического пепла от извержений.
4. Мониторинг качества воздуха.
5. Используется в модели переноса излучения.
6. Используется для расчета энергетического баланса Земли.

Ниже приведен снимок прибора VIIRS со спутника SUOMI NPP и соответствующий ему монтаж аэрозольного индекса во время лесных пожаров в июле 2014 года на территории Красноярского края (рис. 8 и 9).

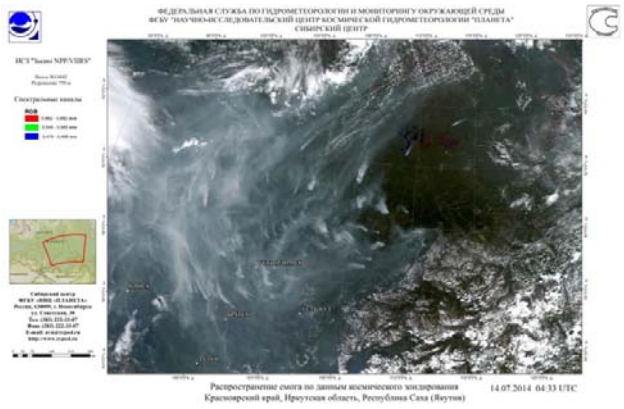


Рис. 8. Распространение смога во время лесных пожаров, Красноярский край

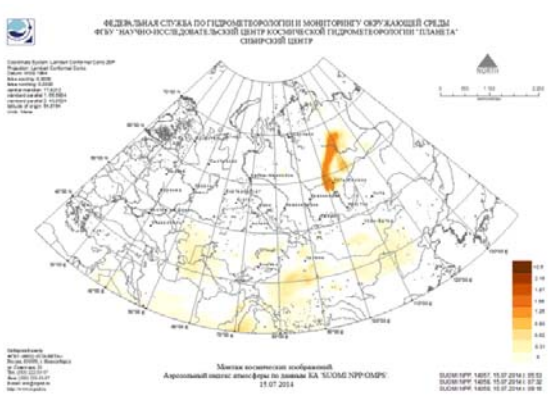


Рис. 9. Распределение аэрозольного и индекса

Карты распределения концентрации озона.

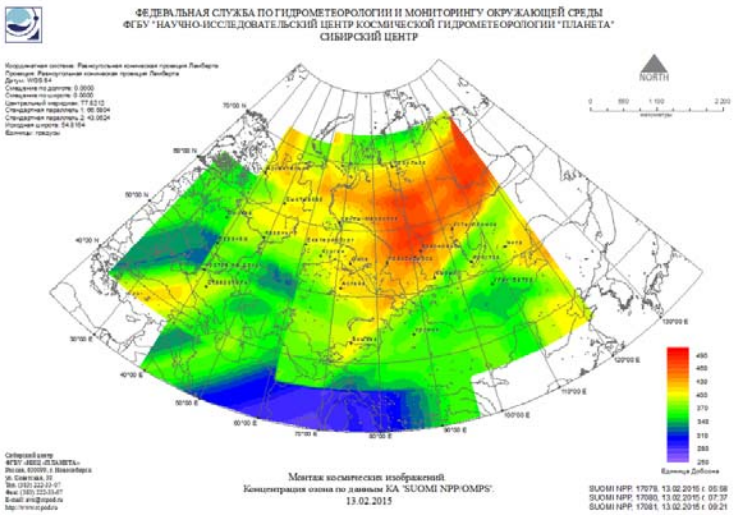


Рис. 10. Концентрация озона по данным КА 'SUOMI NPP/OMPS' от 13 февраля 2015 г.

Общие выводы

Карты концентрации озона и аэрозольный индекс – лишь малая часть возможных продуктов, которые можно получать со спутника SUOMI NPP. Представляется возможным создание карт распределения углекислого газа, дыма, аэрозольной оптической толщины и других. Однако основной проблемой можно назвать невостребованность такого рода продуктов, поскольку потенциальные заказчики о них просто не знают. Хочется надеяться, что данный семинар послужит толчком к распространению необходимой информации о нашей продукции.

Список литературы

1. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.

2. Pawan K Bhartia. OMI Algorithm Theoretical Basis Document Volume II. OMI Ozone Products. NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, USA. 2002.

3. Suraiya P. Ahmad, Omar Torres, Pawan K Bhartia, Gregory Leptoukh, Steve Kempler. Aerosol index from toms and omi measurements NASA // Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD Greenbelt, MD 20771, USA

4. Ортенберг Ф.С., Трифонов Ю.М. Озон: взгляд из Космоса. М.: Изд-во «Знание», 1990. 64 с.

УДК 504.064.37; 528.88

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ОХОТНИЧЬИХ РЕСУРСОВ

А. С. Скачкова
Компания «Совзонд»
e-mail: skachkova@sovzond.ru

Описываются подходы и технологии, разработанные компанией «Совзонд» в работах по картографированию среды обитания охотничьих ресурсов и ландшафтному дешифрированию по данным космической съёмки. Рассматривается применение описанных методик для картографического обеспечения схемы размещения, использования и охраны охотничьих угодий.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, последовательное дешифрирование, классы элементов среды обитания охотничьих ресурсов, открытые данные.

Введение

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 июля 2014 г. № 1216-р утверждена «Стратегия развития охотничьего хозяйства в Российской Федерации до 2030 года» [1]. Реализация стратегии предусматривает создание схемы размещения, использования и охраны охотничьих угодий субъектов Федерации и муниципальных образований (далее – Схема). Целью разработки Схемы является планирование в области охоты и сохранение охотничьих ресурсов. Схема включает в себя описательную, аналитическую и планировочную части, которые составляются специалистами-охотоведами. Одной из ключевых задач при разработке Схемы является качественная и количественная оценка среды обитания для различных видов животных. Оценка выполняется в соответствии с установленной методикой и требует наличия данных о распространении и площадях категорий и классов элементов среды обитания охотничьих ресурсов. Перечень классов и категорий также законодательно закреплён [2]. Основой для анализа могут служить очень разнородные материалы, в том числе материалы аэросъемки и космической съемки поверхности Земли. Ниже приводится описание разработанной в компании «Совзонд» методики картографирования среды обитания охотничьих ресурсов с применением данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли и иных материалов [3; 4; 5].

Составление карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов

Предлагаемый вышеупомянутым Приказом перечень категорий и классов содержит 13 категорий и 39 классов элементов среды обитания охотничьих ресурсов, которые могут рассматриваться биогеоценозы, или, в широком смысле, как ландшафты. Состав категорий и классов элементов среды обитания на целевой территории определяется по доступным литературным и картографическим материалам. Так, перечень был сведён к 7 категориям и 14 классам для Мегино-Кангаласского улуса, 8 категориям и 18 классам для Намского улуса.

Исходные данные

Список материалов, используемых для картографирования, также может изменяться, однако следует подчеркнуть, что во всех выполненных проектах были использованы открытые геоданные.

- Космические снимки Landsat 8 OLI-TIRS. Дешифрирование происходит в полуавтоматическом режиме по мультивременным композитам. По возможности даты

съёмки подбираются в пределах вегетационного периода или же с учётом таких характерных моментов, как межень или половодье (для дешифрирования пойменных комплексов), появление, опадание или пожелтение листвы у древесных пород.

- Набор данных по глобальному изменению лесного покрова Global Forest Change Dataset
- Цифровые модели рельефа SRTM, ASTER GDEM
- Данные OpenStreetMap (OSM) в формате Shp
- Данные ресурса ВЕГА-Science
- Публичная кадастровая карта Росреестра (в качестве справочного материала).

Как и для любых работ, связанных с дешифрованием космических снимков, возникает вопрос полевой верификации. Данные наземных исследований помогают значительно повысить точность составляемых карт и помочь в оценке результатов.

Порядок дешифрирования

Общим принципом дешифрирования является последовательное выделение целевых классов от наиболее простых к сложным (с точки зрения распознавания) с маскированием уже опознанных на каждом шаге обработки. Основное преимущество последовательного дешифрирования состоит в увеличении точности за счёт поэтапного удаления уже распознанных классов.

Для предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ использовалось программное обеспечение ENVI, для подготовки векторных слоёв, сведения исходных данных и результатов дешифрирования, создание итоговой карты – в ArcGIS.

В первую очередь были выделены населенные пункты, дороги, карьеры, составляющие территории, непригодные для ведения охотничьего хозяйства. Выделение их происходит визуально или же с использованием вспомогательных данных. Также простым классом для выделения являются водные объекты.

При выделении пойм используются цифровые модели рельефа, а также снимки на характерные даты. Далее в пределах поймы выделяются земли, покрытые различными типами растительности: пойменные комплексы с преобладанием леса, травянистой растительности, разреженной растительностью, смешанные кустарниковые комплексы, пашни.

Вне поймы все земли разделяются на покрытые и непокрытые лесом территории. Разделение лесов по типам производится путём классификации с обучением. Также выделяются классы молодняков и гарей (рис. 1). Набор эталонов для классификации создаётся по материалам наземных обследований с привлечением дополнительных картографических и литературных материалов.

Оставшиеся неклассифицированными территории заняты в основном сельскохозяйственные землями, болотами и некоторыми другими смешанными категориями. Основным дешифровочным признаком сельскохозяйственных земель принимается отсутствие растительности ($NDVI \leq 0$) в какой-либо момент вегетационного периода.

В итоге все результаты дешифрирования по категориям представляют собой неперекрывающиеся растры классификации. Они генерализируются и сводятся в единый растровый слой. Выходные данные могут быть представлены в виде ГИС, а также тематических карт или картосхем.

Направления использования

Ключевой задачей охотустройства является качественная оценка (бонитировка) категорий и классов с точки зрения их пригодности для обитания охотничьих ресурсов. При определении бонитета элементов среды обитания учитывались основные экологические факторы по трём группам: абиотические, биотические и антропогенные.

Для получения интегральной оценки территории, т. е. с учетом всего разнообразия факторов вычислялся средневзвешенный показатель качества угодий для обитания различных видов животных. Пример карт качества среды обитания для некоторых из видов охотничьих ресурсов приведен на рис. 2.

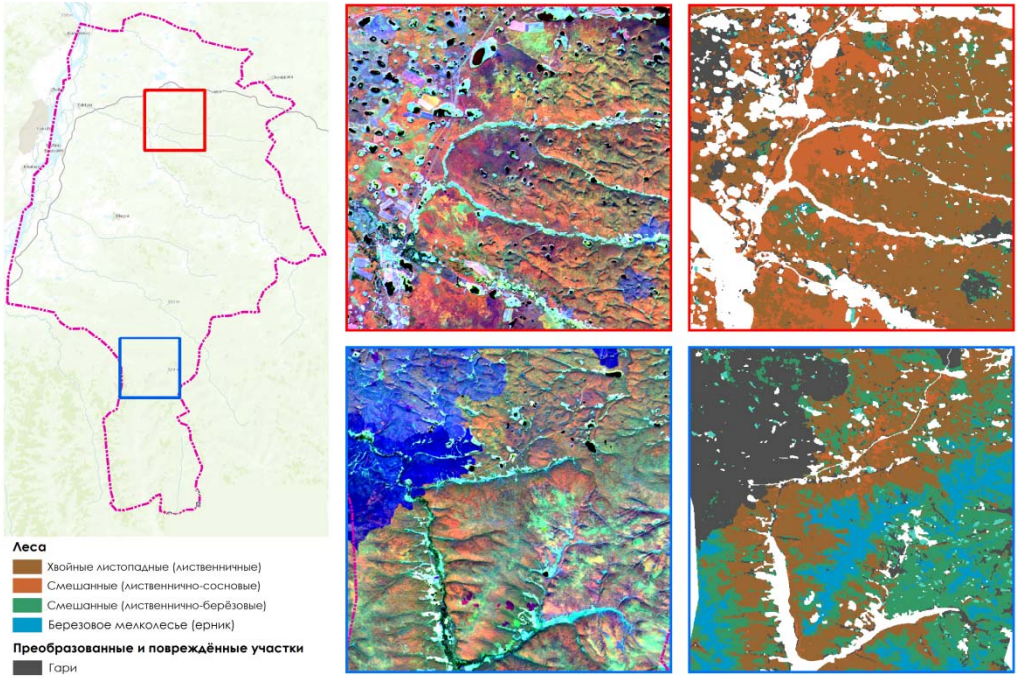


Рис. 1. Результаты дешифрирования породного состава лесов для территории Мегино-Кангаласского Улуса (справа) и исходные снимки для двух участков (соответствующие экстенты отмечены цветными прямоугольниками на схеме слева)

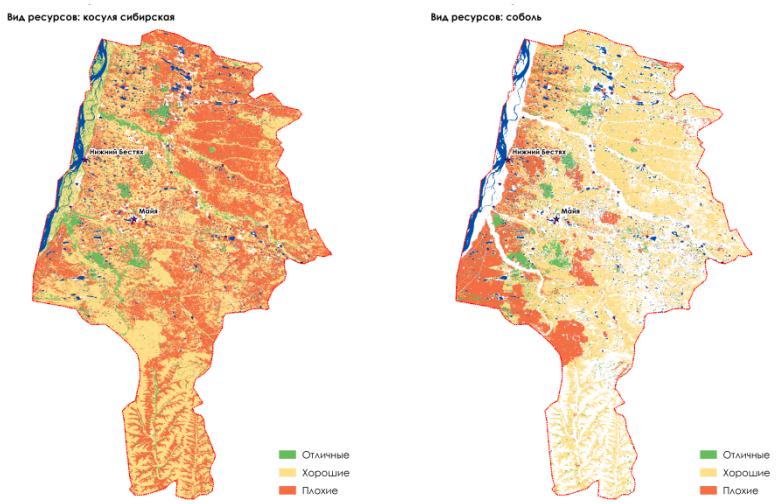


Рис. 2. Примеры картосхем качества условий среды обитания для косули сибирской (слева) и соболя (справа), Мегино-Кангаласский улус

Кроме того, с использованием подготовленных картографических материалов была проведена инвентаризация и уточнение границ охотничьих угодий; были выделены территории для создания новых закрепленных охотничьих угодий и зон охраны охотничьих ресурсов. В рамках разработки схемы дана характеристика

охотничьих ресурсов и оценен их потенциал; рассчитаны максимальные и хозяйственно-целесообразные численности охотничьих ресурсов.

Описанные в статье подходы к дешифрированию биогеоценозов применены для целей охотустройства на территории Республики Саха (Якутия) и Воронежской области. Однако возможности их использования намного шире: от классического приложения ДДЗ – учёта землепользования (Land Use / Land Cover) – до ландшафтного картографирования.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 июля 2014 г. № 1216-р об утверждении «Стратегии развития охотничьего хозяйствав Российской Федерации до 2030 г». 2014.

2. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 31 августа 2010 г. № 335 «Об утверждении порядка составления схемы размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории Российской Федерации, а так же требований к её составу и структуре». 2010.

3. Мышляков С.Г., Скачкова А.С., Величенко В.В. Особенности дешифрирования ландшафтов по мультиспектральным космическим снимкам для создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов // Геоматика. Москва: Совзонд, 2013. № 1. С. 53–62.

4. Мышляков С.Г. Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли // Создание региональных информационных систем мониторинга окуржающей среды на основе данных дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. ; ред. Е.А. Ваганов. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 317–321. ISBN 978-5-7638-3109-2.

5. Скачкова А.С., Мышляков С.Г., Величенко В.В. Методика ландшафтного картографирования с использованием ДДЗ для целей территориального охотустройства // Двенадцатая Всерос. открытая конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": тезисы конф. М.: ИКИ РАН, 2014.

УДК 517.443

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ВЕРСИЯ N-МЕРНОГО АЛГОРИТМА БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

В. С. Тутатчиков
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: vtutatchikov@mail.ru

Широкое применение в цифровой обработке сигналов получили алгоритмы одно-, двух- и трехмерного преобразования Фурье. Из-за возрастающей сложности и большого объема вычислений при увеличении размерности сигнала многомерное дискретное преобразование Фурье сводится к комбинации одномерных по всем координатам. В данной статье приведен общий алгоритм вычисления n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки, который требует меньше комплексных операций сложения и умножения, чем стандартный метод, и выполняется в 1,5 раз быстрее аналога в среде Matlab.

Ключевые слова: многомерное преобразование Фурье, параллельный алгоритм.

Введение

Широкое применение в цифровой обработке сигналов получили алгоритмы одно-, двух- и трехмерного преобразования Фурье [1, 2]. Из-за возрастающей сложности и большого объема вычислений при увеличении размерности сигнала многомерное дискретное преобразование Фурье сводится к комбинации одномерных по всем координатам. В данной статье приведен общий алгоритм вычисления n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки, которые требует меньше комплексных операций сложения и умножения, чем стандартный метод [3]. Проведено тестирование полученного алгоритма в двух- и трехмерном случае при сравнении со стандартным алгоритмом в среде Matlab [4].

1 Описание алгоритма

Рассмотрим сигнал f, который является n-мерным периодическим сигналом с периодом 2^s по всем n координатам со значениями в комплексном пространстве. Отсчеты задаются как $f_{x_1,...,x_n} = f(x_1,...,x_n)$, где $x_i, i = 1,...,n$ принимают значения $0,1,...,2^s - 1$. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) $F_{y_1,...,y_n} = F(y_1,...,y_n)$ для данного сигнала $f(x_1,...,x_n)$ задается формулой:

$$F(y_1,...,y_n) = \sum_{x_1=0}^{2^s-1} ... \sum_{x_n=0}^{2^s-1} f(x_1,...,x_n) e^{\frac{2\pi i(x_1y_1+...+x_ny_n)}{2^s}}, \quad (1)$$

где $y_i, i = 1,...,n$ принимают значения $0,...,2^s - 1$.

Преобразуем формулу (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} F^1(y_1,...,y_n) &= \sum_{b_1=0}^{1} ... \sum_{b_n=0}^{1} F^1(y_1^1 + 2^{s-1}b_1,...,y_n^1 + 2^{s-1}b_n) = \\ &= \sum_{b_1=0}^{1} ... \sum_{b_n=0}^{1} \sum_{a_1=0}^{1} ... \sum_{a_n=0}^{1} (-1)^{b_1+...+b_n} e^{\frac{2\pi i(y_1^1a_1+...+y_n^1a_n)}{2^s}} g^1_{a_1,...,a_n}(y_1^1 + 2^{s-1}b_1,...,y_n^1 + 2^{s-1}b_n) = \\ &= \sum_{b_1=0}^{1} ... \sum_{b_n=0}^{1} \sum_{a_1=0}^{1} ... \sum_{a_n=0}^{1} (-1)^{b_1+...+b_n} e^{\frac{2\pi i(y_1^1a_1+...+y_n^1a_n)}{2^s}} \cdot \\ &\cdot \sum_{x_1^1=0}^{2^{s-1}-1} ... \sum_{x_n^1}^{2^{s-1}-1} f(2x_1^1 + a_1,...,2x_n^1 + a_n) e^{\frac{2\pi i[(2x_1^1+a_1)(y_1^1+2^{s-1}b_1)+...+(2x_n^1+a_n)(y_n^1+2^{s-1}b_n)]}{2^s}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где координаты y_i^1 отсчетов конечных подсигналов $g^1_{a_1,\dots,a_n}$ пробегают 2^{s-1} значений; $x_i^1 = 0:2^{s-1}-1$, $i=1:n$; F^1 – БПФ исходного сигнала f. Для удобства обозначим $F^0 = F$ – исходный сигнал.

Продолжим такую же процедуру для каждого $g^1_{a_1,\dots,a_n}$, то есть представим сигнал $g^1_{a_1,\dots,a_n}$ в виде суммы подсигналов:

$$g^1_{a_1,\dots,a_n} = \sum_{\beta} g^2_{\beta_1,\dots,\beta_n}, \tag{3}$$

где координаты отсчетов конечных подсигналов $g^2_{\beta_1,\dots,\beta_n}$ пробегают 2^{s-2} значений.

Продолжая этот процесс, мы можем представить $F^v(y_1,\dots,y_n)$, где $v=1:s$, в виде суммы ДПФ сигналов, каждая из n координат отсчетов которых пробегает только два значения, то есть получаем следующую формулу для вычисления $F^v(y_1,\dots,y_n)$:

$$\begin{aligned}
&F^v(y_1,\dots,y_n) = \sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1} F^v\left(y_1^v + 2^{s-v}b_1 + 2^{s-v+1}c,\dots,y_n^v + 2^{s-v}b_n + 2^{s-v+1}c\right) = \\
&= \sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1}\sum_{a_1=0}^{1}\dots\sum_{a_n=0}^{1}(-1)^{b_1+\dots+b_n} e^{\frac{2\pi i\left((y_1^v+2^{s-v+1}c)a_1+\dots+(y_n^v+2^{s-v+1}c)a_n\right)}{2^s}} \times \\
&\times g^v_{a_1,\dots,a_n}\left(y_1^v + 2^{s-v}b_1 + 2^{s-v+1}c,\dots,y_n^v + 2^{s-v}b_n + 2^{s-v+1}c\right) = \\
&= \sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1}\sum_{a_1=0}^{1}\dots\sum_{a_n=0}^{1}(-1)^{b_1+\dots+b_n} e^{\frac{2\pi i\left((y_1^v+2^{s-v+1}c)a_1+\dots+(y_n^v+2^{s-v+1}c)a_n\right)}{2^s}} \times \\
&\times \sum_{x_1^v=0}^{2^{s-v}-1}\dots\sum_{x_n^v}^{2^{s-v}-1} F^{v-1}\left(2x_1^v + a_1 + 2^{s-v+1}c,\dots,2x_n^v + a_n + 2^{s-v+1}c\right)\times \\
&\times e^{\frac{2\pi i\left[\left(2x_1^v+a_1+2^{s-v+1}c\right)\left(y_1^v+2^{s-1}b_1+2^{s-v+1}c\right)+\dots+\left(2x_n^v+a_n+2^{s-v+1}c\right)\left(y_n^v+2^{s-1}b_n+2^{s-v+1}c\right)\right]}{2^s}},
\end{aligned} \tag{4}$$

где $v=1:s$ – номер шага разбиения $f(x_1,\dots,x_n)$ на подсигналы; $x_i^v, y_i^v = 0:2^{s-v}-1$, $i=1:n$, $F^s(y_1,\dots,y_n) = F(y_1,\dots,y_n)$ – искомое значение дискретного преобразования Фурье f.

Вычисление $F(y_1,\dots,y_n)$ можно распараллелить на независимые потоки вычислений. При наличии $2^q, 0<q<s$ потоков формула (4) примет вид:

$$\begin{aligned}
&F^v(y_1,\dots,y_n) = \sum_{p=1}^{q}\sum_{t=0}^{2^{p-1}-1}\sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1} F^v(y_1^v + 2^{s-v-p}b_1 + 2^{s-v-p+1}c + t2^{s-v-p+2}, y_2^v + \\
&+2^{s-v}b_2 + 2^{s-v+1}c,\dots,y_n^v + 2^{s-v}b_n + 2^{s-v+1}c) = \sum_{p=1}^{q}\sum_{t=0}^{2^{p-1}-1}\sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1}\sum_{a_1=0}^{1}\dots\sum_{a_n=0}^{1}(-1)^{b_1+\dots+b_n} \times \\
&\times e^{\frac{2\pi i((y_1^v+2^{s-v+1}c+t2^{s-v-p+2})a_1+(y_2^v+2^{s-v+1}c)a_2)+\dots+(y_n^v+2^{s-v+1}c)a_n)}{2^s}} \cdot g^v_{a_1,\dots,a_n}\left(y_1^v + 2^{s-v}b_1 + 2^{s-v+1}c + \right. \\
&\left.+t2^{s-v-p+2},, y_2^v + 2^{s-v}b_2 + 2^{s-v+1}c,\dots,y_n^v + 2^{s-v}b_n + 2^{s-v+1}c\right) = \sum_{c=0}^{2^{v-1}-1}\sum_{b_1=0}^{1}\dots\sum_{b_n=0}^{1}\sum_{a_1=0}^{1}\dots\sum_{a_n=0}^{1} \times \\
&\times(-1)^{b_1+\dots+b_n}\cdot\sum_{p=1}^{q}\sum_{t=0}^{2^{p-1}-1} e^{\frac{2\pi i\left((y_1^v+2^{s-v+1}c+t2^{s-v-p+2})a_1+(y_2^v+2^{s-v+1}c)a_2+\dots+(y_n^v+2^{s-v+1}c)a_n\right)}{2^s}} \cdot \sum_{p=1}^{q}\sum_{t=0}^{2^{p-1}-1}\sum_{x_1^v=0}^{2^{s-v}-1}\dots\sum_{x_n^v}^{2^{s-v}-1}\times
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\times F^{v-1}\left(2x_1^v + a_1 + 2^{s-v+1}c + t2^{s-v-p+2}, 2x_2^v + a_2 + 2^{s-v+1}c, \ldots, 2x_n^v + a_n + 2^{s-v+1}c\right)\times$$
$$\times e^{\frac{2\pi i\left(2x_1^v + a_1 + 2^{s-v+1}c + t2^{s-v-p+2}\right)\left(y_1^v + 2^{s-1}b_1 + 2^{s-v+1}c + t2^{s-v-p+2}\right)}{2^s}} \cdot e^{\frac{2\pi i\left(2x_2^v + a_2 + 2^{s-v+1}c\right)\left(y_2^v + 2^{s-1}b_2 + 2^{s-v+1}c\right)}{2^s}} \cdot \ldots \times \quad (5)$$
$$\times e^{\frac{2\pi i\left(2x_n^v + a_n + 2^{s-v+1}c\right)\left(y_n^v + 2^{s-1}b_n + 2^{s-v+1}c\right)}{2^s}}.$$

Результаты тестирования

Для тестирования данного алгоритма была написана программа на языке программирования C++. Тестирование проводилось на персональном компьютере с характеристиками:

- процессор: AMD FX-4170 4.2 GHz;
- оперативная память: 8 Гб;
- операционная система: Windows 7.

Было проведено сравнение со стандартным алгоритмом дискретного преобразования Фурье в среде Matlab 7.5.0 (R2007b) в двухмерном (табл. 1) и трехмерном (табл. 2) случае. Было проведено тестирование параллельной версии алгоритма (табл. 3) для различного количества процессов. Результаты тестирования указаны в секундах. Последняя колонка всех таблиц показывает ускорение алгоритма Кули-Тьюки по сравнению со стандартным способом вычисления многомерного БПФ.

Таблица 1

Размер сигнала	2D БПФ Matlab	2D БПФ по аналогу Кули-Тьюки	Ускорение C++
128*128	0,001	0,001	~1,0
256*256	0,005	0,004	~1,0
512*512	0,027	0,017	~1,6
1024*1024	0,125	0,087	~1,4
2048*2048	0,620	0,389	~1,6
4096*4096	2,634	1,637	~1,6
8192*8192	13,609	6,904	~2,0
16384*16384	-	20,383	

Таблица 2

Размер сигнала	3D БПФ Matlab	3D БПФ по аналогу Кули-Тьюки	Ускорение C++
32*32*32	0,002	0,002	~1,0
64*64*64	0,028	0,020	~1,4
128*128*128	0,282	0,188	~1,5
256*256*256	2,546	1,660	~1,5
512*512*512	-	14,736	

Таблица 3

Размер сигнала	Число процессов	2D БПФ по строчкам и столбцам	2D БПФ по аналогу Кули-Тьюки	Ускорение Кули-Тьюки
1024*1024	1	0,112	0,057	~1,6
	2	0,142	0,070	~1,0
	4	0,154	0,099	~0,8
	8	0,257	0,092	~0,7
	16	0,330	0,088	~0,5

Окончание табл. 3

Размер сигнала	Число процессов	2D БПФ по строчкам и столбцам	2D БПФ по аналогу Кули-Тьюки	Ускорение Кули-Тьюки
2048*2048	1	0,516	0,275	~1,7
	2	0,512	0,396	~1,2
	4	0,596	0,407	~1,1
	8	1,045	0,345	~0,9
	16	1,195	0,453	~0,8
4096*4096	1	2,193	1,355	~1,7
	2	2,399	1,194	~1,4
	4	2,393	2,098	~1,2
	8	4,412	1,946	~1,1
	16	3,946	1,912	~1,1
8192*8192	1	12,538	4,957	~1,7
	2	10,509	5,245	~1,4
	4	11,753	7,848	~1,2
	8	18,551	8,162	~1,1
	16	18,196	8,907	~1,2

Заключение

Модифицированный алгоритм n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки требует $\frac{2^n - 1}{2^n} N^n \log_2 N$ комплексных умножений и $nN^n \log_2 N$ комплексных сложений, где $N = 2^s$ – число отсчетов по одной из осей [5]. Стандартный алгоритм требует $nN^n \log_2 N$ комплексных умножений и $nN^n \log_2 N$ комплексных сложений. Модифицированный алгоритм требует меньшее количество комплексных операций сложения и умножения и в двух- и трехмерном случае выполняется в 1.5 раз быстрее аналога в среде Matlab.

Список литературы

1. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988. 488 с.

2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Связь, 1979. 416 с.

3. Tutatchikov V.S., Kiselev O.I., Noskov M.V. Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23, No. 3. Pp. 429–433.

4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

5. Старовойтов А.В. О многомерном аналоге алгоритма Кули-Тьюки // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2010. Вып. №1(27). С. 69–72.

УДК 528.8.04, 528.88

ГИС МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ МИРА

Е. С. Хазиева
МГУ им. М.В. Ломоносова
e-mail: savliz@yandex.ru

В настоящее время существует множество пространственных данных так или иначе отражающих состояние земельного покрова как на глобальном, так и на региональном уровне. В связи с наличием большого количества данных разного пространственного разрешения, тематических карт, отличающихся друг от друга по содержанию и подходам классификации, встает необходимость разработки методов и алгоритмов анализа данных из различных источников и создания единой геоинформационной модели для их дальнейшего анализа.

Ключевые слова: ГИС, земельный покров, данные ДЗЗ, ландшафты мира.

Несмотря на то, что в настоящее время существует множество баз данных, содержащих информацию о земельном покрове, для глобального анализа теоретически могут использоваться следующие наборы данных: UMD Land Cover Classification ((GLCF) за 1993 г. [18, 4], Global Land Cover 2000 [13, 1], Global Land Cover Climatology (MODIS) за 2010 г. [14], GlobCover за 2004 и 2009 гг. [15], MODIS Land Cover за 2001–2012 гг. [17, 1], (IGBP-DIS) DISCover land cover [8, 16]. Начиная с 2005 г., по данным Group on Earth Observation [12], вопросы использования разновременных данных глобального уровня стали активно обсуждаться и приобрели актуальность. Все вышеперечисленные данные были получены путем обработки сырых данных дистанционного зондирования с последующим тематическим анализом [5]. Так, например, данные UMD Land Cover Classification представляют собой материалы анализа данных NASA/NOAA в рамках проекта по созданию глобальной карты ландшафтного покрова. данные, полученные в рамках проекта, сопоставлялись со статистикой FAO (United Nations Food and Agricultural Organization). Несмотря на то, что ФАО представляет статистику для индивидуальных стран, а не в целом по глобальным регионам (как в результате классификации данных GLCF). представляется возможным сопоставить и оценить общую тенденцию корреляции данных ДЗЗ и статистической информации. Основной проблемой в данном сопоставлении является разная классификация, применяемая для земельных угодий в статистике и в типологии по ДЗЗ, так, наибольшая корреляция характерна лесам, лесистой местности и территориям с сомкнутостью полога более чем 40 % [4]. Глобальная карта земельного покрова Global Land Cover 2000 была получена путем создания мозаики из региональных участков. Данный набор был получен путем анализа и комбинирования различных источников, таких как данные SPOT VGT, радиолокационные данные и DMPS (The Defense Meteorological Satellite Program), полевые исследования, рассчитанные вегетационные индексы, DEM USGS [10].

В связи с тем, что данные были получены разными способами с применением различных подходов к классификации, было необходимо провести анализ данных для последующего сопоставления легенд. Существуют различные методики объединения легенд, некоторые исследователи используют специализированный язык перехода Land Cover Classification System LCCS [5, 6, 7], другие также применяют попиксельный анализ разновременных данных [2].

В нашем случае легенды данных UMD Land Cover Classification и Global Land Cover 2000 были генерализованы с использованием кодов описания типов земельного покрова в системе LCCS (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление различных легенд данных по земельному покрову

Генерализованная легенда		UMD Classification		LCCS	GLC2000		
№	***Тип***	***№***	***Класс***	***Тип***	***№***	***Тип***	***Соответствие (%)***
1	Evergreen Needleleaf Forest	1	Evergreen Needleleaf Forest	A12-A3.A20.B2.XX.D2.E1 и A12-A3.A10.B2.XX.D2.E1	4	Tree Cover, needle-leaved, evergreen	93,42551
2	Evergreen Broadleaf Forest	2	Evergreen Broadleaf Forest	A12-A3.A20.B2.XX.D1.E1 и A12-A3.A10.B2.XX.D1.E1 и A24-A3.A20.B2.XX.D1.E1	1	Tree Cover, broadleaved, evergreen	98,53853
					7	Tree Cover, regularly flooded, fresh water (& brackish)	
					8	Tree Cover, regularly flooded, saline water, (daily variation of water level)	
3	Deciduous Needleleaf Forest	3	Deciduous Needleleaf Forest	A12-A3.A20.B2.XX.D2.E2 и A12-A3.A10.B2.XX.D2.E2	5	Tree Cover, needle-leaved, deciduous	73,61846
4	Deciduous Broadleaf Forest	4	Deciduous Broadleaf Forest	A12-A3.A20.B2.XX.D1.E2 и A12-A3.A10.B2.XX.D1.E2	2	Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed	99,1174
					3	Tree Cover, broadleaved, deciduous, open	
5	Mixed Forest/Other Trees	5	Mixed Forest	A12-A3.A20.B2 и A24-A3.A20.B2	6	Tree Cover, mixed leaf type	13,80275
		6	Woodland		9	Mosaic: Tree cover / Other natural vegetation	
		7	Wooded Grassland		10	Tree Cover, burnt	
6	Shrubs	8	Closed Shrubland	A12-A4.A20.B3	12	Shrub Cover, closed-open, deciduous	36,06778
		9	Open Shrubland		11	Shrub Cover, closed-open, evergreen	
7	Herbaceous vegetation	10	Grassland	A12-A2.A20.B4	13	Herbaceous Cover, closed-open	77,21328
8	Cultivated and managed vegetation/agriculture	11	Cropland	A11 и A23	16	Cultivated and managed areas	82,02163
					17	Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other natural vegetation	
					18	Mosaic: Cropland / Shrub or Grass Cover	
9	Urban and Built	14	Urban and Built	B16 и A12-A1A14, A12-A2A14	22	Artificial surfaces and associated areas	68,35818
10	Barren/Snow and Ice	12	Bare Ground	B27-A2, B27-A3, B28-A2, B28-A3 B16 и A12-A1A14, A12-A2A14	19	Bare Areas	20,74633
					14	Sparse Herbaceous or sparse Shrub Cover	
					21	Snow and Ice (natural & artificial)	

В связи с наличием типов земельного покрова, которые имеют низкое соответствие (такие как кустарники, смешанные леса и другая растительность, открытая почва), полноценное использование данных UMD Land Cover Classification за 1993 г. и Global Land Cover 2000 не представляется возможным. Необходима разработка других подходов и методов для возможности анализа земельного покрова, начиная с 1990-х гг.

Для оценки подобной возможности был проведен анализ данных регионального значения, в лесостепной зоне Европейской части России. В данном случае в качестве ретроспективных данных использовался набор матриц NDVI (на основе AVHRR), обработанный в рамках проекта GIMMS [11].

Для создания схемы трансформации мы использовали в качестве эталонного примера данные о земельном покрове, полученные в проекте по созданию глобальной карты ландшафтного покрова. Методом пространственной классификации в ПО GeoMedia (Intergraph Corp.) было получено классифицированное изображение данных AVHRR NDVI за 1992 г. со следующими категориями (по классификации GLCF): сельскохозяйственные земли (croplands); луга (grasslands); луга в комплексе с лесной растительностью, зарастающие земли (Wooded grasslands/Shrublands); лиственные леса в сочетании со смешанными лесами (Deciduous Broadleaf Forest with Mixed forest.

Как на глобальном, так и на региональном уровнях в настоящее время наблюдается антропогенное влияние, которое коренным образом воздействует на структуру и функционирование окружающей среды [9]. Исходя из этого, становится необходимым выделить и оценить основные типы изменений земельного покрова. Используя методы классификации в ПО GeoMedia (Intergraph Corp.), были обработаны остальные снимки, и в итоге было получено четыре изображения с преобладающими типами ландшафтного покрова за 1981, 2000, 1993 и за 2006 г. В дальнейшем методом выявления изменений было получено единое изображение, отображающее следующие типы изменений, характерных для данной территории (рис. 1).

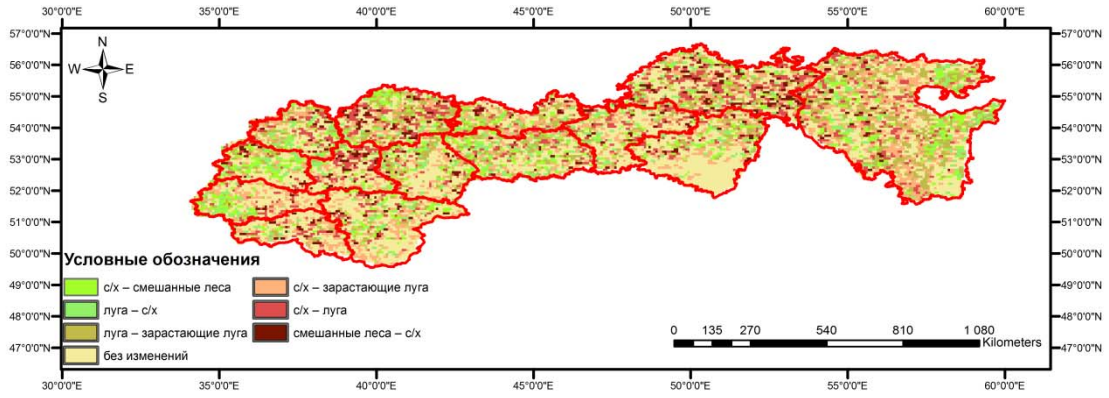


Рис. 1. Типы изменений земельного покрова на исследуемой территории

Для верификации было проведено сравнение результатов, полученных в ходе переклассификации данных ДЗЗ, со статистическими показателями Всероссийской Сельскохозяйственной переписи за 2006 г. и фондовыми материалами за 1981 г. Полученные значения ковариации между статистическими данным и данным ДЗЗ составляют для общей площади сельскохозяйственных угодий – 77,43, для фактически использующейся площади – 92,11. Ковариация в случае сопоставления со статистической информацией за 1981 г. составила 87,7 %.

Список литературы

1. Bartholomé E., & Belward A.S. (2005). GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth Observation data // International Journal of Remote Sensing, 26, 1959−1977.7

2. Chandra Giria, Zhiliang Zhub, Bradley Reeda (2005) // Remote Sensing of Environment, 94, 123–132.

3. Friedl M.A., McIver D.K., et al. (2002). Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // Remote Sensing of Environment, 83(1–2), 287−302.

4. Hansen M.C., Defries R.S., et al. (2000). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach // International Journal of Remote Sensing, 216–7, 1331–1364.

5. Herold M., Mayaux P., Woodcock C.E., Baccini A., Schmullius C. (2008). Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets // Remote Sensing of Environment, 112, 2538–2556.

6. Herold M., & Schmullius C. (2004). Report on the Harmonization of Global and Regional Land Cover Products // Workshop report at FAO, Rome, Italy, 14–16 July 2004. GOFC-GOLD report series, Vol. 20. URL: http://www. fao.org/gtos/gofc-gold/series.html

7. Jansen L.J.M. (2004). Thematic harmonisation and analysis of Nordic data sets into Land Cover Classification System LCCS terminology // In G. Groom (Ed.), Developments in strategic landscape monitoring for the Nordic countries ANP 2004. Vol. 705 (pp. 91–118). Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

8. Loveland T.R., Reed B.C., et al. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data // International Journal of Remote Sensing, 216–7, 1303−1330.

9. Mucher C.A., Wascher D.M., Klijn J.A., Koomen A.J.M., Jongman R.H.G. 2006. A new European Landscape Map as an integrative framework for Landscape Character Assessment // Proceedings of the European IALE Conference March 29-April 2, 2005, Faro, Portugal. IALE Publication Series 3. Pp. 233–243.

10.Sato H.P. and Tateishi R. 2002, Proposal for global land cover guideline legend based on FAO's LCCS // Asian Journal of Geoinformatics. Vol. 3, No. 2. Pp. 35–45.

11.Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E. and Saleous N., 2005. An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data // International Journal of Remote Sensing, 26(20): 4485–4498.

12.GEOSS (2005). The Global Earth Observation System of Systems GEOSS 10- Year Implementation Plan. [Electronic Resource]. – URL: http://www.earthobservations.org (date of access: 20.05.2015)

13.Global Land Cover 2000 [Electronic Resource]. – URL: http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php (date of access: 20.05.2015)

14.Global Land Cover Climatology (MODIS) [Electronic Resource]. – URL: http://landcover.usgs.gov/global_climatology.php (date of access: 20.05.2015)

15.GlobCover [Electronic Resource]. – URL: http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (date of access: 20.03.2015)

16.DISCover land cover http://daac.ornl.gov/ [Electronic Resource]. – URL: http://glcf.umd.edu/data/lc/ (date of access: 20.06.2014)

17.[2] MODIS Land Cover [Electronic Resource]. – URL: http://glcf.umd.edu/data/lc/ (date of access: 20.06.2015)

18.UMD Land Cover Classification [Electronic Resource]. – URL: http://glcf.umd.edu/data/landcover/ (date of access: 20.04.2015)

УДК 912.4, 004.4

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

О. Э. Якубайлик
Институт вычислительного моделирования СО РАН,
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

THE FORMATION OF REGIONAL SPATIAL INFRARUCTURE

O. E. Yakubailik
Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

В статье обсуждаются основные характеристики пространственных данных, их инфраструктура и ее основные компоненты. Рассматриваются пространственные метаданные и программно-технологическое обеспечение геопорталов, их сервисы. Обсуждаются технологии разработки прикладных геоинформационных веб-систем (геопорталов). Представлена архитектура программного обеспечения геопортала ИВМ СО РАН.

Ключевые слова: геопортал, веб-картография, геопространственные данные, геоданные, веб-ГИС, Интернет-ГИС, каталог пространственных метаданных, картографический веб-сервис, WMS-сервис.

Пространственные данные – цифровые данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении и свойствах, пространственных и непространственных атрибутах. Это данные о географических объектах, которые являются формализованными цифровыми моделями материальных или абстрактных объектов реального или виртуального мира.

Полное описание пространственных данных складывается из двух взаимосвязанных частей: позиционных данных и непозиционных данных – описаниях пространственного положения и тематического содержания данных, тополого-геометрических и атрибутивных данных (геометрии и семантики). Для учета временных аспектов используются пространственно-временные данные. Представление пространственных данных, модель пространственных данных – это способ цифрового представления пространственных объектов, тип структуры пространственных данных. Пространственные данные можно представить в виде регулярно-ячеистой, векторной и атрибутивной моделей. В регулярно-ячеистой модели вся изучаемая территория разбивается на элементы регулярной сетки или ячейки и подразделяется по типу значения на растровые модели и GRID модели. Векторная модель данных отображает пространственные данные, основываясь на векторах. Основными являются графические примитивы: точечный, линейный и полигональный.

Большие объёмы накапливаемых, обрабатываемых и используемых пространственных данных, развитие современных информационных технологий и Интернет изменили методы представления информации, поиска, доступа к ней, методы ее обработки, анализа и визуализации. В этом контексте важную роль играют метаданные – описательная информация о структуре и смысле данных, а также приложений и процессов, которые манипулируют данными.

Метаданные – данные о данных: каталоги, справочники, реестры, базы метаданных и иные формы описания наборов цифровых и аналоговых данных,

содержащие сведения об их составе, содержании, статусе (актуальности, обновляемости), происхождении (способах и условиях получения), местонахождении, качестве (полноте, непротиворечивости, достоверности), форматах и формах представления, условиях доступа, приобретения и использования, авторских, имущественных и смежных с ними правах на данные. Базы метаданных, в том числе в составе картографических данных и ГИС, могут служить средством инвентаризации информационных ресурсов, входить в существующие информационные системы и БД, а также использоваться при поиске и оценке источников пространственных данных.

Наряду с пространственными данными получили широкое развитие информационные технологии массового сбора, хранения, обработки и использования таких данных, как: данные ДЗЗ; цифровые карты и планы; цифровые пространственно-временные данные, получаемые глобальными системами спутникового позиционирования (GPS/ГЛОНАСС); данные полевых цифровых геодезических съемок; данные лазерной наземной и воздушной съемки. Это обусловило создание инфраструктуры пространственных данных (ИПД) с целью эффективной организации и управления ресурсами пространственных данных территории, доступа к картографическим (традиционным и цифровым) ресурсам, метаданным в различных схемах, имеющим координатную и/или географическую привязку и к внешним информационным объектам, доступным по стандартным протоколам. Под ИПД также понимают иерархически упорядоченную систему (информационную среду), построенную с использованием информационных технологий, основанную на общих стандартах пространственных данных и метаданных, а также сети географических информационных узлов (геопорталов и каталогов метаданных).

Формирование ИПД различного уровня ведется с разным успехом уже более 20 лет – глобальная, национальные, межгосударственные (европейская, стран Азиатско-Тихоокеанского региона, и т. д.), региональные, муниципальные, отраслевые, корпоративные, и проч. В каждом из подобных проектов решаются задачи по выявлению, формальному определению следующих основных компонентов ИПД –

- *базовые пространственные данные*, служащие основой координирования (позиционирования) всех иных пространственных и непространственных (атрибутивных, тематических);
- *пространственные метаданные* и механизмы доступа к данным – включают базы метаданных, размещенные в сети серверов, шлюзов и порталов, доступные через центры информационного обмена и облегчающие поиск данных среди множества хранилищ, фондов, БД, размещенных у их держателей, а также стандарты и программные средства создания баз метаданных и доступа к ним;
- *стандарты на пространственные данные*, включая стандарты на модели ПД, геодезическое обеспечение, системы пространственно-временных координат, форматы представления в базах ПД, обменные форматы, метаданные, точность и качество данных, цифровые карты и методы картографирования, классификаторы отдельных типов тематических данных вплоть до стандартов на понятийно-терминологический аппарат.

Сформировавшееся в настоящее время понимание ИПД позиционирует ее как информационно-телекоммуникационную систему, обеспечивающую доступ граждан, хозяйствующих субъектов, органов государственной и муниципальной власти к распределенным ресурсам пространственных данных, а также распространение и обмен данными в общедоступной глобальной информационной сети в целях повышения эффективности их производства и использования.

Одним из системообразующих элементов ИПД является геопортал. Геопортал – это программно-технологическое обеспечение для работы с пространственными

данными. Его основная задача – обеспечение пользователя средствами и сервисами хранения и каталогизации, публикации и загрузки пространственных (географических) данных, поиска и фильтрации по метаданным, интерактивной веб-визуализации, прямого доступа к геопространственным данным на основе картографических веб-сервисов.

В контексте ИПД геопортал – это программно-технологическое решение, функциональные возможности которого определяются его сервисами:

- *поисковые сервисы*, позволяющие искать наборы пространственных данных и геосервисы на основе соответствующих метаданных и отображать содержание метаданных;
- *сервисы визуализации*, предоставляющие, как минимум, возможности просмотра данных, навигации по изображениям, их скроллинга, масштабирования и графического оверлея данных, а также отображения легенд карт и соответствующей информации, содержащейся в метаданных;
- *сервисы для скачивания информации*, позволяющие копировать наборы пространственных данных или их фрагменты и, по возможности, обеспечивающие прямой доступ к данным;
- *сервисы преобразования данных*, дающие возможность трансформировать наборы пространственных данных с целью обеспечения их интероперабельности;
- *сервисы для вызова других (удаленных) сервисов*.

По выполняемым функциям геопорталы могут быть отраслевыми (Федеральная ГИС Территориального планирования, Публичная кадастровая карта, Система Россельхознадзора Деметра), корпоративными (геопортал Роскосмоса), научно-образовательными, инвестиционными, и проч.

Геопортал ИВМ СО РАН и его компоненты

Исследования и разработки для ИПД регионального уровня ведется в ИВМ СО РАН около 10 лет. Результатом работ стало создание комплекса программно-технологических решений для построения прикладных геоинформационных веб-систем (геопорталов). Разработана методика быстрой разработки прикладных геоинформационных веб-систем, создано соответствующее программно-технологическое, информационно-вычислительное обеспечение – сервисы и средства хранения, обработки и анализа пространственных данных (в том числе – спутниковых изображений), библиотеки прикладных программных и пользовательских интерфейсов, средства авторизации доступа в составе геопортала и каталог пространственных метаданных, система картографической веб-визуализации, служебные и прикладные веб-сервисы.

Сегодня геопортал ИВМ СО РАН – это комплекс программно-технологических решений, который состоит из следующих элементов:

- *Подсистема хранения данных*. Обеспечена поддержка всех форматов популярных ГИС (файл-сервер) и пространственных баз данных – PostgreSQL/PostGIS и проч.
- *Каталог ресурсов геопортала* – подсистема управления метаданными, база данных и набор программных библиотек (API) для различных операций с ресурсами на основе веб-сервисов по протоколу SOAP.
- *Подсистема администрирования геопортала «Управление данными»*. Основная задача – регистрация информационных ресурсов в каталоге, ввод и редактирование метаданных. Дополнительные функции связаны с разграничением прав доступа, импортом метаданных со сторонних WMS-ресурсов и их соответствующей регистрацией в каталоге, и проч.

- *Редактор стилевого оформления слоев и карт «ГеоЭкспресс»*. Windows-программа, предназначенная для создания и редактирования стилевого оформления карт. Формирует XML-описание стилевого оформления слоев и карт геопортала, сохраняет его в базе данных Каталога ресурсов.
- *Пользовательский веб-интерфейс каталога ресурсов (метаданных)*. Веб-приложение, предназначенное для навигации по зарегистрированным в системе информационным ресурсам и поиску среди них. Обеспечивает навигацию по каталогу ресурсов с учетом множественной классификации, фильтрации ресурсов по различным критериям, создание пользовательских наборов данных («Корзина»), и проч.
- *Пользовательский веб-интерфейс (подсистема) картографической веб-визуализации*. Веб-приложение для отображения карт и отдельных слоев геоданных портала через веб-интерфейс. Особо следует отметить возможность выбора различных фоновых картографических подложек – Яндекс, Google, 2ГИС, и проч. (более 40 шт.).
- *Подсистема управления веб-публикациями*. Если в первой редакции геопортала – это ряд сервисов на основе «1С-Битрикс», то сейчас – комплекс средств для формирования тематических разделов геопортала на основе системы управления веб-контентом Drupal.
- *Картографические веб-сервисы*. Доступ к данным на основе стандартов OGC – WMS/WMTS, WFS – данные геопортала доступны напрямую из стандартных ГИС.
- *Прикладные веб-сервисы* – адресный поиск, геокодирование, прокладка маршрутов, построение водотоков, и проч. Эти сервисы предназначены для работы в составе сторонних прикладных геоинформационных систем.

Комплекс программно-технологических решений на основе геопортала ИВМ СО РАН успешно зарекомендовал себя как программно-технологическая основа ресурсоемких информационно-аналитических систем регионального уровня для задач различной тематики – информационной поддержки отраслевого управления (в сфере здравоохранения, образования, транспорта), экологического мониторинга и оценки состояния окружающей природной среды, прогноза социально-экономического развития региона, централизованного информационного обеспечения картографическими данными. Заказчиками этих систем являются органы исполнительной власти. Разработки на основе этих технологий могут стать основой региональной ИПД Красноярского края.

Список литературы

1. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов / А.А. Кадочников, В.Г. Попов, А.А. Токарев, О.Э. Якубайлик // Журнал СФУ. Серия: Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 4. С. 377–386.

2. Матвеев А.Г., Якубайлик О.Э. Разработка веб-приложения для обработки и представления пространственных метаданных геопортала // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2(42). С. 48–54.

3. 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.

4. Программно-технологическое обеспечение геопортала ИВМ СО РАН / О.Э. Якубайлик, А.А. Кадочников, А.Г. Матвеев, А.С. Пятаев, А.В. Токарев // Информационные системы для научных исследований: сб. науч. ст.: тр. XV Всерос. объединенной конф. «Интернет и современное общество». Санкт-Петербург, 10–12 окт. 2012 г. СПб., 2012. С. 143–148.

5. Якубайлик О.Э., Попов В.Г. Технологии для геоинформационных Интернет-систем // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, № 6. С. 116–126.

Секция
«МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ РАЗЛИЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КУРГАННЫХ МОГИЛЬНИКОВ

Р. С. Багаутдинов[(1)], В. Н. Копенков[(2,3)], В. Н. Мышкин[(4)], В. В. Сергеев[(2,3)], С. А. Трибунский[(5)]
[(1)]Самарский государственный университет
[(2)]Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (Национальный исследовательский университет)
[(3)]Институт систем обработки изображений РАН
[(4)]Поволжская государственная социально-гуманитарная академия
[(5)]Ассоциация вузов Самарской области

В работе рассмотрены вопросы применимости космических снимков, полученных в результате дистанционного зондирования Земли для выявления археологических объектов – курганных могильников, широко распространенных в степных районах Самарской области. Сформулированы требования к космическим снимкам, предложены методы компьютерной обработки снимков, обеспечивающей повышение качества распознавания объектов человеком-оператором.

Ключевые слова: археологические объекты, курганные могильники, космические снимки Земли, компьютерная обработка.

Введение

Изучение памятников древней материальной культуры (археологических объектов) является предметом большого интереса для широкого круга историков, краеведов, археологов и других специалистов. Изучение научной литературы и архивных материалов, имеющихся в археологических лабораториях Самарского государственного университета, Поволжской государственной социально-гуманитарной академии, Самарского областного историко-краеведческого музея имени П.В. Алабина позволило нанести на карту Самарской области археологические объекты на степных территориях, прилегающих к населенным пунктам Березки, Новоберезовский, Дубовый Умет, Нефтегорск, Семеновка, Верхнесъезжее, Зуевка, Кулешовка и др. Большинство этих археологических объектов представляют собой курганные могильники [1; 2]. Они продолжают выявляться и в настоящее время, что дает основание утверждать, что территория области еще недостаточно изучена с точки зрения археологии, на ней имеется большое число до сих пор необнаруженных курганных могильников. К сожалению, полевые работы по выявлению археологических объектов при весьма низкой результативности являются чрезвычайно затратными по времени, трудоемкости и финансам. Поэтому представляет интерес исследование альтернативных решений этой задачи, основанных на новых информационных технологиях ДЗЗ и компьютерной обработки изображений [3].

Требования к характеристикам космических снимков

Для участков территории Самарской области, на которых выявлены археологические объекты (курганные могильники), был осуществлен подбор космических снимков – данных дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне длин волн – из следующих информационных источников:

- регионального банка данных космических снимков Самарской области [4],
- архива Центра приема и обработки космической информации СГАУ [5],
- архива Инженерно-технологического центра «СКАНЭКС» [6],
- архива Института космических исследований РАН [7].

В таблице перечислены подобранные изображения, полученные в период с 2007 по 2014 г. со спутников.

Таблица

Спутник	Страна-разработчик	Детальность снимков, метров	Число спектральных каналов (цветов)	Число пикселов на диаметр объекта
Terra	США	250	36	0,03–0,12
Aqua	США	250	36	0,03–0,12
SPOT-2	Франция	20	3	0,35–1,5
SPOT-4	Франция	20	3	0,35–1,5
IPS-P5	Индия	2,5	1	3–12
IPS-P6	Индия	25	4	0,3–1,2
UK-DMC	Великобритания	22	4	0,3–1,4
EROS-A	Израиль	2	1	3,5–15
EROS-B	Израиль	0,7	1	10–43
Аэрофото	Россия	0,3–0,4	1	20–60

Рис. 1. Фрагмент изображения со спутника IPS-P5

Курганные могильники, как правило, проявляются на земной поверхности как слабоконтрастные радиально-симметричные (дискообразные) объекты диаметром от 7 до 30 м. При известной детальности цифровых изображений несложно оценить число пикселов, приходящихся на диаметр объекта. На рисунке белыми окружностями отмечено положение двух известных курганных могильников. Эти могильники с трудом детектируются на данном изображении с разрешением 2,5 м в 1 пикселе.

Использование доступных цветных снимков на данную территорию (после процедур повышения разрешения изображений получаем изображение с разрешением 10 м в 1 пикселе) не позволяет определить местоположение могильников. Как видно из представленных на рис. 2 фрагментов, курганные могильники визуально не выявляются.

На основании визуального анализа изображений различного разрешения с целью обнаружения на них курганных могильников было выявлено, что обнаружение возможно в случае, если диаметр объектов превышает 5–7 пикселов изображения. Для более мелких объектов визуальное детектирование невозможно, либо неоднозначно, кроме того признак радиальной симметрии (описанный в статье далее) вычисляется с большой случайной погрешностью, что ведёт к росту ошибок ложного обнаружения. Получаем, что детальность космических снимков должна быть выше 0,5–0,7 метров.

Компьютерная обработка космических снимков

В части методов компьютерной обработки изображений используются алгоритмы выделения областей с радиально-симметричными вариациями функции яркости и адаптивного усиления контраста изображений в указанных областях.

Рис. 2. Фрагмент изображения со спутников SPOT-4 (слева) и UK-DMC (справа)

Локальные радиально-симметричные вариации функции яркости реализуются в режиме скользящего окна (размер окна должен быть таким, чтобы полностью охватывать радиально-симметричный объект).

Проведем от начала координат (см. рис. 3) в окне восемь лучей и сформируем восемь последовательностей дискретных значений яркости изображения:

$$\left\{x_i(1), x_i(2), \ldots x_i(n), \ldots x_i(R)\right\}_{i=1}^{8}, \tag{1}$$

где R – число значений, взятых по лучу, т. е. радиус рабочей области окна обработки.

Последовательности усредняются: $\bar{x}(n) = \sum_{i=1}^{8} x_i(n)$, $(1 \le n \le R)$, вычисляется погрешность отклонения от среднего: $D_i = \frac{1}{R}\sum_{n=1}^{R}\left[x_i(n) - \bar{x}(n)\right]^2$, $1 \le i \le 8$, и, наконец, средняя погрешность по всем лучам:

$$D = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} D_i \tag{2}$$

Очевидно, что величина, вычисляемая по формуле (2), равна нулю, если поле яркости изменяется одинаково по всем направлениям от центра окна и принимает некоторые ненулевые значения, если поле яркости изменяется иначе. В качестве индикатора локальной радиальной симметрии функции яркости используем:

$$S = \frac{1}{1 + kD}, \tag{3}$$

где k – эмпирически подбираемый коэффициент. Величина (3) будет принимать максимальное значение, если функция яркости в окне радиально симметрична, и убывать к нулю по мере возрастания асимметричности указанной функции.

Сформированное поле индикаторов локальной радиальной симметрии (по всему изображению) далее используется для адаптивного усиления контраста изображений на участках изображения с радиально симметричными вариациями яркости. Для этого предлагается простой алгоритм обработки изображения, который иллюстрируется схемой на рис. 4.

Исходное обрабатываемое изображение X поступает в процедуру вычисления поля индикаторов симметрии S и параллельно – на формирование сглаженного изображения – $\overline{X}$. Далее все три поля попиксельно объединяются для формирования выходного изображения Y:

$$Y = X + QS\left(X - \overline{X}\right), \tag{4}$$

где Q – коэффициент усиления контраста.

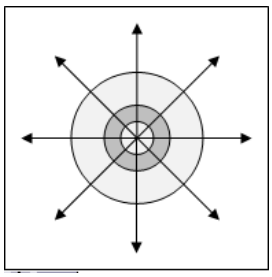


Рис. 3. Окно обработки

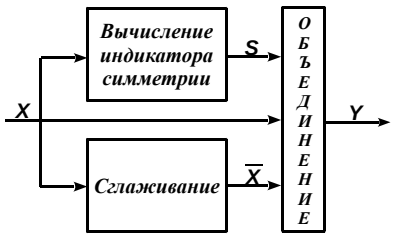


Рис. 4. Схема адаптивного усиления контраста

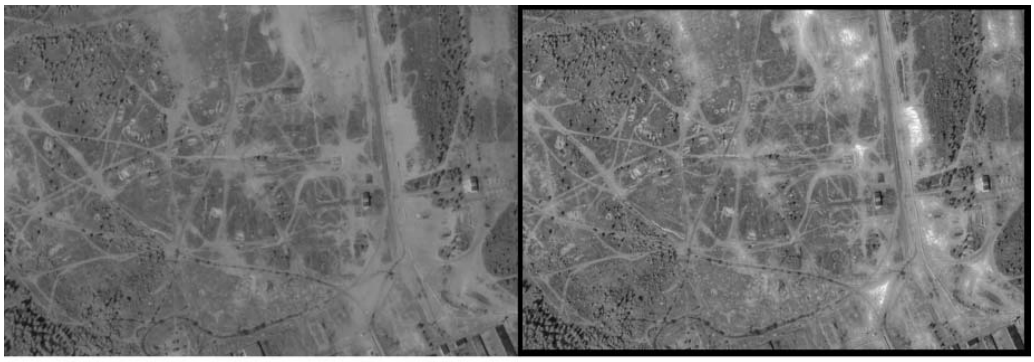


Рис. 5. Обработка данных с КА EROS-B

Рис. 6. Обработка аэрофотоснимка

Заключение

В настоящей статье рассмотрены вопросы применимости космических снимков, полученных в результате дистанционного зондирования Земли для выявления археологических объектов – курганных могильников. Показано, что космические снимки, обеспечивающие решение поставленной задачи, должны обладать пространственным разрешением не хуже 0,5–0,7 м. Желательно, чтобы эти снимки были многоканальными (цветными). Предложены методы компьютерной обработки снимков, обеспечивающей повышение их контраста в областях, содержащих радиально-симметричные объекты, и тем самым повышающей качество визуального выявления таких объектов человеком-оператором. В ближайшее время планируется провести ряд экспериментальных исследований, направленных на уточнение параметров алгоритма (R, k, Q), а также проверка работоспособности технологии при использовании цветных изображений. И окончательным результатом исследований,

основанных на настоящей работе, предполагается рассмотрение возможности решения задачи полностью автоматического распознавания археологических объектов.

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, грант 14-11-63006 а(р).

Список литературы

1. Мышкин В.Н., Скарбовенко В.А. Савроматские и раннесарматские погребения Самарского Заволжья // Краеведческие записки. Самара. 1996. № 8. С. 196–223.

2. Мышкин В.Н., Скарбовенко В.А. Ранние кочевники Самарского Поволжья: история и итоги изучения, 40 лет Средневолжской археологической экспедиции // Краеведческие записки. Самара. 2010. № 15. С. 87–100.

3. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И.Глумов, Н.Ю.Ильясова, В.В.Мясников, С.Б.Попов, В.В.Сергеев, В.А.Сойфер, А.Г.Храмов, А.В.Чернов, В.М.Чернов, М.А. Чичёва, В.А.Фурсов; под ред. В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.

4. Chernov A.V., Gashnikov M.V., Glumov N.I., Sergeyev V.V. Regional bank of samara region satellite images // Proceedings of 9-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-9-2008), Russian Federation, Nizhni Novgorod. 2008. Vol. 1. Pp. 162–165.

5. Автоматизированное формирование регионального банка космических снимков и его использование в геопорталах / Н.И. Глумов, В.Н. Копенков, Е.В. Мясников, А.В. Сергеев, А.В. Чернов, Н.В. Чупшев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. статей Т. 7, № 2. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: ООО «ДоМира», 2010. С. 129–138.

6. Белова О.А., Копенков В.Н. Применение космического мониторинга для решения задач природопользования в самарской области // Сб. тезисов докл. Всерос. конф. с междунар. участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов». Россия. Архангельск, 2013. 17–19 сент. С. 186–187.

7. http://www.ckp-rf.ru/ckp/3186/

8. http://www.scanex.ru/ru/data/index.html

9. http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=12

УДК 550.388.

О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

С. Ю. Белов
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Физический факультет
e-mail: Belov_Sergej@Mail.Ru

ON SOME CHARACTERISTICS OF THE SCATTERING OF THE EARTH SURFACE FOR REMOTE SENSING IN THE SHORT-WAVE BAND

S. Yu. Belov
Physics Department, M.V. Lomonosov MSU
e-mail: Belov_Sergej@Mail.Ru

Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум β_K ионосферного сигнала. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения параметра β_K новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный и одного порядка с известной когерентной методикой.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн поверхностью, методика измерения, дистанционное зондирование, КВ-диапазон, параметр рассеяния сигнал/шум, ионосфера.

Параметр β_K возвращённого, частично рассеянного ионосферного сигнала (ИС) представляет интерес как важная характеристика «возмущённости», «мутности» статистически неоднородной ионосферной плазмы, показатель надёжности работы ионосферных каналов связи и диагностических в том числе. Оперативная и надёжная оценка параметра β_K имеет общефизический интерес (радиофизика, геофизика, оптика и т. д.), конкретизация осуществлена для ионосферного случая. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли, поскольку параметр рассеяния формируется и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур.

Проблема измерения и учёта рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн важна для решения ряда задач, например при диагностике свойств среды с помощью методов, использующих этот радиодиапазон, когда на трассе происходит промежуточное отражение (рассеяние) от земной поверхности, что представляет интерес для геологоразведочных и экологических исследований.

Важнейшими аспектами при использовании средств космического базирования для целей природопользования и экологического мониторинга являются выбор рабочего диапазона зондирования и вопросы влияния сред на проходящее излучение. Выбор КВ диапазона позволяет учитывать подповерхностный слой (толщины порядка длины волны падающего излучения).

В фиксированной точке приёма на поверхности земли (в скалярном приближении) ИС, узкополосный случайный процесс E(t) представляет собой суперпозицию «зеркальной» $E_0(t)$ и рассеянной $E_P(t)$ по нормальному закону компонент:

$$\mathsf{E}(t) = \mathsf{E}_0(t) \;+\; \mathsf{E}_P(t) \;= E_{00}\cdot e^{i\cdot\left(\omega_0\cdot t-\varphi(t)\right)} + \mathsf{E}_P(t) = \tag{1}$$
$$= R(t)\cdot e^{i\cdot\left(\omega_0\cdot t-\Phi(t)\right)} = \left[E_C(t) + i\cdot E_S(t)\right]\cdot e^{i\cdot\omega_0\cdot t},$$

где $\varphi(t)$, $\Phi(t)$, $R(t)$, $E_m(t)$, m = c,s – медленные на периоде $T = \dfrac{2\cdot\pi}{\omega_0}$ случайные процессы; E_{00} = Const.

Параметр рассеяния определяется отношением:

$$\beta_k^2 = \frac{\text{мощность зеркальной компоненты}}{\text{мощность рассеянной компоненты}} = \frac{E_{00}^2}{2\cdot\overline{\mathsf{E}_P^2}}\ . \tag{2}$$

Здесь и ниже черта “ — ” означает статистическое усреднение. $E_C(t) = R(t)\cdot\cos\Phi(t)$ и $E_S(t) = R(t)\cdot\sin\Phi(t)$ – низкочастотные квадратуры ИС, $R(t)$ – огибающая, $\Phi(t)$ – суммарная фаза.

При этом индекс K = E4, R2, R4 означает экспериментально регистрируемые первичные случайные процессы и соответствующий метод их регистрации: E4 – когерентный; R2, R4 – некогерентные амплитудные.

Достаточно широко используется для оценки β_K (2) стандартный некогерентный R2-метод, основанный на соотношении [1]:

$$\frac{\overline{R^2}}{\left(\overline{R}\right)^2} = f\left(\beta_{R2}\right) = \frac{4}{\pi}\cdot\frac{\left(1+\beta_{R2}^2\right)\cdot\exp\left(\beta_{R2}^2\right)}{\left[\left(1+\beta_{R2}^2\right)\cdot I_0\left(\beta_{R2}^2/2\right)+\beta_{R2}^2\cdot I_1\left(\beta_{R2}^2/2\right)\right]^2}. \tag{3}$$

$I_n(x)$ – функция Бесселя n-го порядка от чисто мнимого аргумента.

Используя когерентный E4-метод, когда β_{E4} оценивается по эксцессу γ_{E4} квадратур [2, 3]:

$$\gamma_{E4}\left(\beta_{E4}\right) = \frac{\overline{E_m^4}}{\left(\overline{E_m^2}\right)^2} - 3 = -\frac{3}{2}\cdot\frac{\beta_{E4}^4}{\left(1+\beta_{E4}^2\right)^2}\ ; \quad \text{m=c,s.} \tag{4}$$

Следует заметить, что измеряемыми первичными параметрами являются отношения моментов $\overline{R^2}\Big/\left(\overline{R}\right)^2$, $\overline{E_m^4}\Big/\left(\overline{E_m^2}\right)^2$ соответственно. Естественно, соотношения (3), (4) получены с учётом определённых моделей структуры ИС. Исследования показали, что вероятностные свойства ИС (1) отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещённым спектром (РС-модель) [4–6], на основе которой получены выражения (3), (4). Априори заметим, что выражение (4) когерентной методики E4 обеспечивает на порядок более высокую относительную аналитическую точность оценки параметра β_K [7–9].

В настоящей работе предлагается новый некогерентный R4-метод определения β_{R4} по эксцессу γ_{R4} огибающей для РС-модели [2]:

$$\gamma_{R4}\left(\beta_{R4}\right) = \frac{\overline{R^4}}{\left(\overline{R^2}\right)^2} - 3 = \gamma_{R4}\left(\beta_{R4}\right) = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{\left(1+\beta_{R4}^2\right)^2}\cdot \tag{5}$$

Для сопоставления приведённых методов в смысле относительных погрешностей, допускаемых при вычислении β_K, обусловленных видом функциональных зависимостей $f(\beta)$, $\gamma_{E4}(\beta)$ и $\gamma_{R4}(\beta)$, получим выражения (6):

$$\varepsilon_k = \left|\frac{\Delta\beta_K}{\beta_K}\right| = \left|\frac{1}{\beta_K}\cdot\frac{dG_K}{dZ_K}\cdot\Delta\left(Z_K\right)\right| , \qquad (6)$$

где K = R2, E4, R4; $G_K = f, \gamma_{E4}, \gamma_{R4}$; $\Delta(Z_K)$ – абсолютные статистические ошибки измеряемых величин: $Z_K = \frac{\overline{R^2}}{\left(\overline{R}\right)^2}, \frac{\overline{E_m^4}}{\left(\overline{E_m^2}\right)^2}, \frac{\overline{R^4}}{\left(\overline{R^2}\right)^2}$.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения β_K :

$$\varepsilon_{R2}(\beta) = \frac{\pi}{8}\cdot\frac{\left[\left(1+\beta^2\right)\cdot I_0\left(\beta^2/2\right)+\beta^2\cdot I_1\left(\beta^2/2\right)\right]^3}{\beta^2\cdot\exp\left(\beta^2\right)\cdot I_1\left(\beta^2/2\right)}\cdot\Delta\left(Z_{R2}\right); \qquad (7а)$$

$$\varepsilon_{E4}(\beta) = \frac{\left(1+\beta^2\right)^3}{6\cdot\beta^4}\cdot\Delta\left(Z_{E4}\right); \qquad (7б)$$

$$\varepsilon_{R4}(\beta) = \frac{\left(1+\beta^2\right)^3}{4\cdot\beta^4}\cdot\Delta\left(Z_{R4}\right). \qquad (7в)$$

Статистическая ошибка $\Delta(Z_K)$ зависит от объёма выборки N и при одинаковых объёмах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание на погрешностях за счёт различия функциональных зависимостей (3) – (5), нормируем (7) на $\Delta(Z_K)$.

Графики зависимостей $\varepsilon_K^* = \frac{\varepsilon_K}{\Delta\left(Z_K\right)}$ для β_{R2} , β_{E4} и β_{R4} приведены на рисунке. ε_K^* будем ниже называть аналитической (относительной) погрешностью метода.

Экспериментальное распределение $W_Э(\beta)$ определяет диапазон изменения $\tilde{\beta}$.

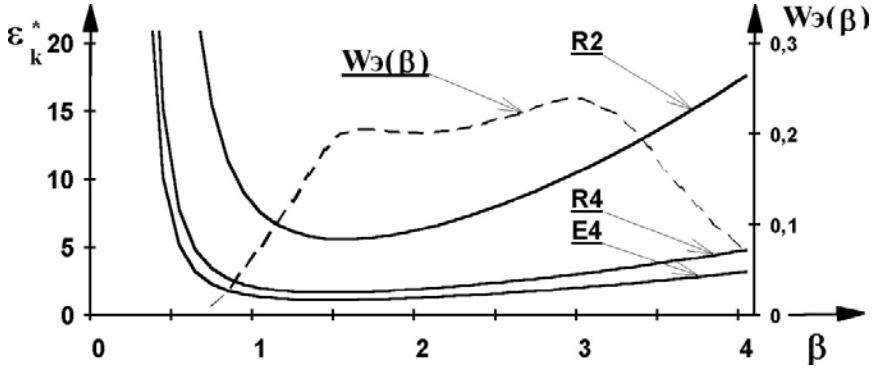


Рис. Графики зависимостей ε_K^*, K = R2, R4, E4 (сплошные линии) и экспериментальное распределение $W_Э(\beta)$ (пунктир) (слой F2, 4,5–9,5 МГц, единичный сигнал)

Из выражений (4) и (5) видно, что $\varepsilon_{E4}^* = \frac{2}{3}\cdot\varepsilon_{R4}^*$ – одного порядка и существенно (на порядок) превосходят точность измерения стандартной R2-методики [10–12]. В итоге, анализ аналитических погрешностей оценки параметра β_K позволил рекомендовать метод R4 вместо стандартного R2. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра β_K может быть достигнута с

помощью некогерентной аппаратуры, используя выражение (5) метода R4. Естественно, что за когерентной методикой Е4 остается возможность оптимизации статистической ошибки путём соответствующей специальной цифровой обработки ИС.

Список литературы

1. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн в ионосфере. М.: АН СССР, 1960. С. 480.
2. Белов С.Ю. Методы оценки параметра сигнал/шум в коротковолновом диапазоне радиоволн // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): сб. науч. тр. / под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. М.: МАКС-Пресс, 2010. № 16. С. 31–38.
3. Белов С.Ю. Численное моделирование в задаче тестирования метода дистанционной диагностики рассеивающей способности земной поверхности в КВ-радиодиапазоне // Материалы Междунар. молодежного науч. форума «Ломоносов – 2015» ; отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов [Электронный ресурс]. М.: МАКС-Пресс, 2015.
4. Белов С.Ю. О методах определения параметра сигнал/шум на примере распространения радиосигнала в канале Земля – Ионосфера // Материалы Междунар. молодежного науч. форума «Ломоносов-2013» / отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова [Электронный ресурс]. М.: МАКС-Пресс, 2013. С. 73–73.
5. Белов С.Ю. Дистанционная диагностика рассеивающей способности земной поверхности в декаметровом диапазоне радиоволн // XVI Междунар. симпозиум с элементами научной школы для молодежи «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 2009. Томск. С. 279–280.
6. Белов С.Ю., Белова И.Н. Выявление экологического риска при мониторинге поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн: сб. тр. II Всерос. науч. конф. «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. 461 с. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. С. 70–76.
7. Белов С.Ю., Белова И.Н. О параметре «возмущённости» неоднородного флуктуирующего дифракционного экрана // Междунар. симпозиум по атмосферной радиации и динамике «МСАРД–2015». СПб., 2015.
8. Белов С.Ю. Дистанционная диагностика рассеивающей способности земной поверхности в КВ-диапазоне // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: сб. материалов 6-й Междунар. науч.-практ. конф. Махачкала: ООО «Апробация», 2014. С. 43–43.
9. Belov S.Yu. New measurement method of estimation signal/noise parameter // European Geosciences Union General Assembly 2010 Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts. 2010. Vol. 12 P. 2233.
10. Белов С.Ю., Белова И.Н. Экспериментальная аппаратура когерентного приёма в задачах мониторинга поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн // II Междунар. науч. конф. молодых ученых «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства». Ереван, 2015.
11. Белов С.Ю., Белова И.Н. Функциональная схема экспериментальной аппаратуры когерентного приёма в задачах мониторинга поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн // III Междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп, 2015.
12. Белов С.Ю., Белова И.Н. Экологические аспекты применения дистанционного зондирования земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // IGCP 610 Междунар. конф. Международный проект ЮНЕСКО IGCP-610 «От Каспия к Средиземноморью: изменения окружающей среды и ответ человека в четвертичном периоде». Астрахань, 2015.

УДК 004.932.2

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В. В. Буряченко, А. А. Ткачева, А. И. Томилина
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет
им. академика М.Ф. Решетнева»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: buryachenko@sibsau.ru, tkacheva.ivt@gmail.com, nastomila@gmail.com

Для систем технического зрения, а также мобильных устройств, осуществляющих автоматизированную съемку местности в сложных условиях, характерно сильное дрожание камеры. В связи с этим необходимо выполнять компенсацию такого «дрожания», что позволит операторам более успешно осуществлять наблюдение за состоянием окружающей среды и разрабатывать алгоритмы, позволяющие обнаруживать объекты интереса как при съемке с мобильных устройств, так и при аэрофотосъемке, дистанционном зондировании Земли. Стабилизация видеопоследовательности осуществляется при помощи разработанных алгоритмов компенсации движения, фильтрации дрожания и стабилизации итогового изображения. В работе приведены оценки качества, основанные на метриках PSNR и ITF, показывавшие эффективность разработанной программной системы.

Ключевые слова: оценка движения, стабилизация видеопоследовательности, низкочастотная фильтрация.

Введение

В современных условиях системы технического зрения применяются для управления роботизированными устройствами в сложных условиях, для отслеживания объектов интереса при видеонаблюдении. При этом устройства, производящие видеосъемку, часто обладают плохим качеством записи, что объясняется плохими погодными условиями при съемке на открытой местности, сложным ландшафтом в труднодоступной местности, быстрым движением при видеосъемке. Поэтому для таких систем желательно использовать программные алгоритмы, позволяющие повышать визуальное качество изображения непосредственно при съемке или при постобработке видеопоследовательностей.

Разработка программной системы для стабилизации видеопоследовательностей в системах технического зрения отличается необходимостью применения алгоритмов, которые позволяют выполнять стабилизацию в реальном времени. Разработанное программное обеспечение «Fuzzy Video Stabilization» [3] состоит из пяти модулей, реализующих методы и алгоритмы стабилизации видеопоследовательностей, а также модулей, позволяющих осуществлять взаимодействие пользователя с программной средой (рис. 1).

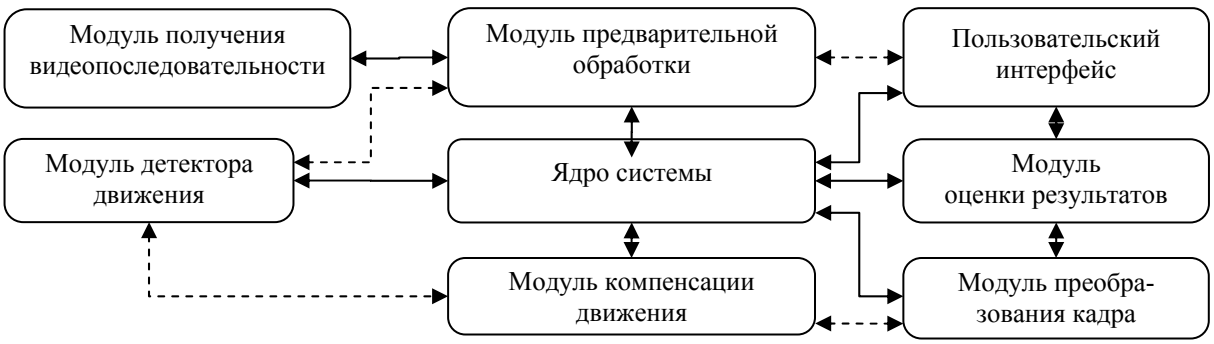


Рис. 1. Структурная схема экспериментального программного комплекса

Компенсация нежелательного движения

Для компенсации непреднамеренного движения необходимо найти стабилизированное положение кадра на основе известных глобальных векторов движения. Для этого в случае статической сцены требуется выбрать опорные кадры видеопоследовательности и относительно них провести компенсацию непреднамеренного движения в текущем кадре. Непреднамеренное движение соответствует высокочастотной компоненте. Поэтому алгоритм компенсации движения использует фильтр низких частот для удаления компоненты непреднамеренного движения [2].

Для динамических сцен, содержащих движение камеры, рассчитанный вектор глобального движения кадра может состоять из двух основных компонент: намеренное движение (например, панорамирование камеры) и непреднамеренное движение. Качественный алгоритм коррекции должен удалять только нежелательное движение, не затрагивая при этом преднамеренное движение камеры.

Предполагая, что нежелательное движение соответствует высокочастотной компоненте, алгоритм использует фильтр низких частот для удаления нежелательных компонентов движения. Сглаживающий вектор движения (*SMV*, Smoothing Motion Vector) получен путем низкочастотной фильтрации, которая сохраняет преднамеренное движение камеры. Предлагаемый метод вычисляет *SMV* в виде уравнения регрессии первого порядка по формуле

$$SMV_n = \alpha \cdot SMV_{n-1} + (1-\alpha) \cdot GMV_n, \quad (1)$$

где n – номер текущего кадра; $0 \le \alpha \le 1$ – варьируемый параметр.

Низкочастотная фильтрация

Низкочастотный фильтр первого порядка может быть использован в системах реального времени, его применение требует мало памяти. При этом сглаживание движения будет визуально удовлетворительным при выборе подходящего значения α. Параметр α можно рассматривать как фактор сглаживания: больший коэффициент сглаживания приводит к плавному движению, но к большей задержке при преднамеренном движении камеры. Предложена адаптивная подстройка параметра α, основанная на величине глобального смещения камеры на предыдущих тридцати кадрах, рассчитанной по формуле

$$\mathrm{Gd}iff_n = \sum_{i=n-30}^{n} |GLV_i - GLV_{i-1}|, \quad (2)$$

где n – номер текущего кадра; GLV_i – вектор глобального движения кадра i.

В качестве входных параметров для нечеткой модели, выполняющей подбор коэффициента сглаживания, служат:

а) сумма модулей глобальных векторов движения за предыдущие 30 кадров видеопоследовательности $Gdiff_n$;

б) число экстремумов в функции глобального движения кадра, которое показывает интенсивность дрожания камеры, за последние 30 кадров видеопоследовательности N_{ext}.

Оценка качества стабилизации

Для оценки качества стабилизации было проведено тестирование методом, предложенным в работах по стабилизации видеоматериала [1]. Для исходной видеопоследовательности и стабилизированного видеоматериала находится разница между предыдущим и текущим кадрами по метрике PSNR. Применение

пространственно-временного фильтра 2d_cleaner при стабилизации видеоматериала значительно улучшает качество, устраняя следы мелкого дрожания видеопоследовательности, от которого не удалось избавиться при стабилизации (рис. 2). PSNR-значение стабилизированной последовательности заметно выше, что показывает меньшую разницу между кадрами (более слабое «дрожание» кадра). Также при применении временного фильтра PSNR-значение видеопоследовательности увеличивается в пределах 30 %.

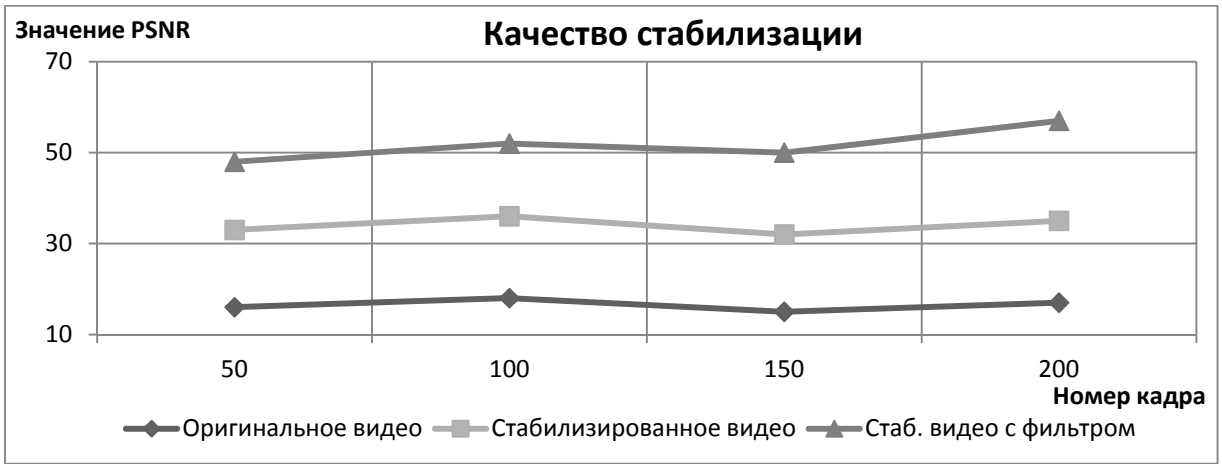


Рис. 2. PSNR разница между кадрами исходной, стабилизированной и обработанной временным фильтром 2d_cleaner видеопоследовательности (car_shake.avi)

Значение PSNR показывает, насколько одно изображение похоже на другое, что полезно для оценки качества стабилизации простым сравнением соседних кадров. Качество межкадрового преобразования ITF используется для объективной оценки эффективности алгоритма стабилизации: стабилизированная видеопоследовательность должна иметь более высокое значение *ITF*, чем исходная:

$$ITF = \frac{1}{N_{Frame}} \sum_{k=0}^{N_{Frame}} PSNR(k), \tag{3}$$

где N_{Frame} – количество кадров видеопоследовательности.

Результаты оценки качества стабилизации видеопоследовательностей, содержащих статические и динамические сцены, в сравнении с известными алгоритмами стабилизации приведены в табл. 1. Программные продукты, реализующие данные алгоритмы, доступны для использования и тестирования в демонстрационном режиме или с ограничениями по настройке параметров алгоритма и сохранению результатов работы.

Таблица 1

Сравнение эффективности алгоритмов стабилизации для статических и динамических сцен

Видеопоследовательность	Значение ITF, дБ			
	Deshaker	Warp-Stabilizer	Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths	Fuzzy Video Stabilizer
1.EllenPage_Juggling.avi	25,61	26,68	27,33	28,58
2. Gleicher4.avi	20,33	19,15	20,45	23,18
3. Sam_1.avi	20,09	20,27	20,58	22,20
1. road_cars_krasnoyarsk	22,31	21,48	25,2	25,91
2. SANY0025xvid.avi	23,53	22,7	22,74	23,79
3. lf_juggle.avi	26,65	24,41	26,15	28,06

Оценка качества стабилизации проводилась по метрикам PSNR и ITF, которые отражают, насколько соседние кадры видеопоследовательностей похожи друг на друга. Было проанализировано 5 видеопоследовательностей, содержащих статические сцены, и 9 видеопоследовательностей динамических сцен общей длительностью более 8000 кадров [3]. Значение ITF статических сцен повышается в среднем на 3 дБ, динамических сцен – на 4 дБ, что составляет 15 и 20 % соответственно.

Заключение

Предлагаемая система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества позволит повысить эффективность работы службы охраны благодаря возможностям улучшения визуального качества отображаемых данных и стабилизации видеопотока. Предложенные детектор движения и формат хранения видеоданных позволят более гибко управлять просмотром событий без необходимости выполнения расчета параметров движения при каждом просмотре видеоархива. При изменении масштаба от 100 до 30 % фактор движения, характеризующий точность определения движения, находится на схожем уровне, а при масштабе менее 15 % значительно ухудшается. Использование стабилизации видеопотока позволяет повысить качество нахождения движения в среднем на 2–7 % в зависимости от степени дрожания камеры, поскольку дрожание камеры оказывает значительное влияние на работу алгоритма. Также применение стабилизации видеопотока улучшает возможности визуального наблюдения для оператора.

Список литературы

1. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-directed video stabilization with robust L1 optimal camera paths // In Proc. CVPR. 2011. P. 225–232.

2. Favorskaya M.N., Jain L.C., Buryachenko V.V. Digital video stabilization in static and dynamic scenes // Intelligent Systems Reference Library. 2015.

3. Буряченко В.В., Зотин А.Г., Пахирка А.И. Система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // Программные продукты и системы. 2013. № 2. Тверь: ЗАО НИИ ЦПС, 2013. С. 191–197.

УДК 528.88, 004.65

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

П. В. Воронина[(1)], Е. А. Мамаш[(1)], Д. Л. Чубаров[(1)], В. А. Кихтенко[(1)], В. В. Смирнов[(1)], А. А. Хорошилов[(2)]

[(1)]Институт вычислительных технологий СО РАН
e-mail: voronina@ict.nsc.ru, elenamamash@gmail.com
[(2)]Новосибирский государственный университет

Проводится анализ температурных аномалий поверхности Земли на основе метода Robust Satellite Techniques (RST), использующего спутниковую информацию, полученную с сенсора MODIS. Результаты исследования территории, прилегающей к эпицентру Чуйского землетрясения (Алтай), показывают наличие температурных аномалий незадолго до сейсмического события, однако не позволяют судить об их приуроченности к этому землетрясению.

Ключевые слова: метод RST (Robust Satellite Techniques), дистанционное зондирование, MODIS, тепловые аномалии.

Введение

В процессе мониторинга природных процессов и решении задач рационального природопользования уделяется значительное внимание изучению температуры земной поверхности, в том числе по данным дистанционного зондирования Земли, ценность которых заключается в регулярности измерений и охвате труднодоступных регионов больших площадей. Применению метода Robust Satellite Technique (RST), предложенному Трамутоли [1] для исследования температурных режимов территорий и выявления температурных аномалий, к сейсмическим событиям, произошедшим в разные годы в Европе, Америке, Азии и Африке, посвящен ряд работ (например, [2–3]). Отмечается, что температурные аномалии в преддверии землетрясений могут распространяться на сотни квадратных километров, зачастую появляются за одну-три недели до события и сопровождаются повышением температуры земной поверхности.

Целью настоящей работы является применение метода RST для выявления температурных аномалий, приуроченных к Чуйскому землетрясению (Алтай) магнитудой 7,3, произошедшему 27 сентября 2003 г. Результаты детального геофизического исследования этого землетрясения изложены в работах в [4–6].

Метод RST для выделения аномалий

Метод RST применяется для выявления возможных тепловых аномалий, предшествующих сейсмической активности [7]. Этот подход является статистическим и позволяет на основе теплового инфракрасного излучения определить аномалии даже в присутствии сильно изменяющихся природных условий и условий наблюдения. Объяснение связи температурных аномалий с сейсмической активностью возникновением локального парникового эффекта вследствие изменения газового состава атмосферы при активации геологического разлома предложено Горным и др. [8]. Возможность реализации такого механизма в ряде случаев подтверждается наземными исследованиями [9].

Для выявления тепловых аномалий, сопряженных с землетрясением, рассматривается область R на поверхности Земли, охватывающая эпицентр и основные геологические структуры, вовлеченные в тектонические процессы, связанные с сейсмическим событием. В этой области по данным дистанционного зондирования определяются значения температуры поверхности Земли $T(r,t)$ в течение нескольких недель до и после события. В области R определяются индексы $\eta^t(r,t)$ и $\eta^s(r,t)$ по следующим формулам:

$$\eta^t(r,t) = \frac{\Delta T(r,t) - \langle \Delta T(r,t) \rangle_t}{\sigma_{\Delta T}(r)},$$
$$\eta^t(r,t) = \frac{\Delta T(r,t) - \langle \Delta T(r,t) \rangle_t}{\sigma_{\Delta T}(t)}.$$

Здесь используются следующие обозначения: $\langle T(r,t) \rangle_r$ – среднее по области значение температуры в момент времени t; $\Delta T(r,t) = T(r,t) - \langle T(r,t) \rangle_r$ – отклонение температуры в пикселе r в момент времени t; $\langle \Delta T(r,t) \rangle_t$– усредненное по времени отклонение температуры в пикселе r; $\sigma_{\Delta T}(r)$ – среднеквадратичное отклонение $\Delta T(r,t)$ от $\langle \Delta T(r,t) \rangle_t$; $\sigma_{\Delta T}(t)$ – среднеквадратичное отклонение $\Delta T(r,t)$ от $\langle \Delta T(r,t) \rangle_r$.

При выборе области и временного промежутка подходящих размеров индексы $\eta^t(r,t)$ и $\eta^s(r,t)$ позволяют исключить влияние вариаций температуры, вызванных климатическими процессами, неоднородностью рельефа и погодными условиями.

Данные, поступающие с метеорологических спутников, позволяют получать измерения температуры поверхности Земли несколько раз в сутки. Для использования метода RST рекомендуется использовать данные за один и тот же период года, накопленные за несколько лет, чтобы при усреднении по времени уменьшить влияние вариаций от года к году [7].

Результаты: выявление тепловых аномалий

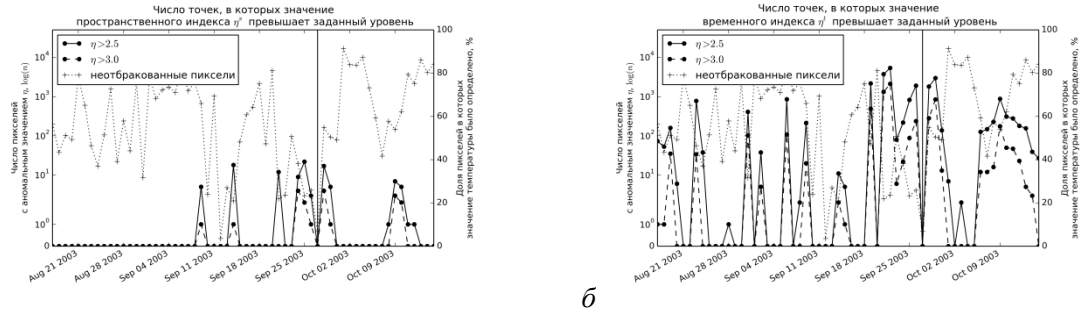
В настоящей работе возможность использования аномальных температурных отклонений поверхности суши как предвестников землетрясений изучалась для землетрясения, произошедшего 27 сентября 2003 г. на юге Республики Алтай, эпицентральная зона которого располагалась в южной части Алтае-Саянской складчатой области в районе Северо-Чуйского хребта, Чуйской, Курайской межгорных впадин и разделяющего их Чаган-Узунского приподнятого блока. Эта территория характеризуется повышенной сейсмической активностью.

В качестве исходных данных для метода RST использовались значения ночных температур поверхности из продукта MOD11A1, полученные на основе данных со спутника Terra за период с 17 августа по 15 октября в течение 2001–2003 гг. Эти данные представляют собой значения температур, восстановленные с помощью двухканального алгоритма Вана и Дозьера [10] по значениям интенсивности инфракрасного излучения, регистрируемого в каналах 31 (11 мкм) и 32 (12 мкм) сенсора MODIS. Содержащиеся в MOD11A1 данные пересчитаны на регулярную сетку в синусоидальной проекции с размером ячейки около 926 м. При хороших атмосферных условиях наблюдения алгоритм обеспечивает точность восстановления температуры в пределах 1°K. Для выбранной области исследования число ячеек, в которых ошибка оказалась менее 1°K, составило в среднем около 30 % в день, но число ячеек, где ошибка не превышала 2°K, уже свыше 57 %. Для вычисления индексов использовались только данные, удовлетворяющие этому условию. Эти данные мы далее будем называть *валидными*. Анализируемая область 48°–52°с. ш. и 86°–90° в. д. включает в себя эпицентральную зону землетрясения. Для выделения тепловых аномалий рассматривались уровни значений индексов 2,5 и 3,0. Расчёты выполнены с использованием системы hVault [11].

На рис. 1 отражено изменение числа аномальных пикселей на протяжении исследуемого периода. Число аномальных пикселей возрастает в те дни, в которых доля валидных данных опускается ниже 40 %, однако анализ зависимости значений индексов от количества валидных пикселей не показал значимой корреляционной связи между этими величинами. Пространственный индекс $\eta^s(r,t)$ указывает на наличие гораздо меньшего числа дней с аномальными пикселями, чем индекс $\eta^t(r,t)$, нормированный по времени. На рис. 2 отображено распределение значений индекса η^t

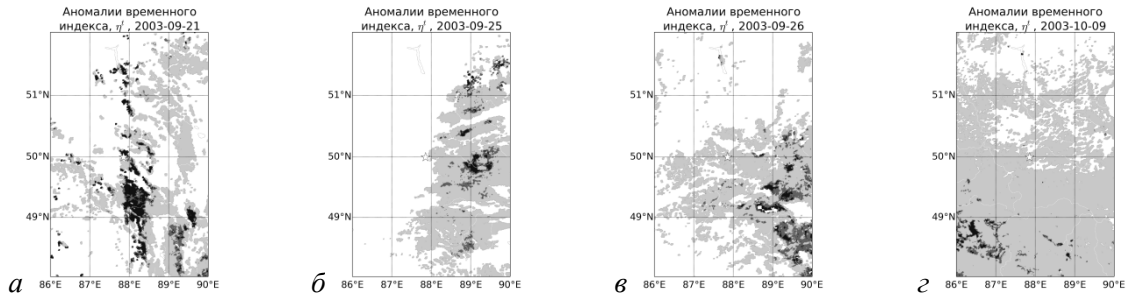
в области исследований в разные дни как до, так и после сейсмического события. Следует добавить, что локализация аномалий для индексов η^t и η^s совпадает. Почти все аномалии, обнаруживаемые в одной части области, на следующий день в этой части области уже не наблюдаются. Тем не менее некоторые аномалии наблюдались в одной и той же части области на протяжении нескольких дней.

Выявленные аномалии также обнаруживаются в распределении значений индексов η^t и η^s при изменении размера области исследований, подтверждающих, что результаты, полученные с использованием метода RST, мало зависят от размера области. На рис. 3 приведены графики изменения среднего и максимального значений соответствующих индексов по всей области исследований в течение года. Максимальные значения превышают уровень 2,5, выбранный нами для выявления аномалий на протяжении всего года. Кроме того, графики подтверждают, что метод позволяет исключить влияние сезонных колебаний температуры.



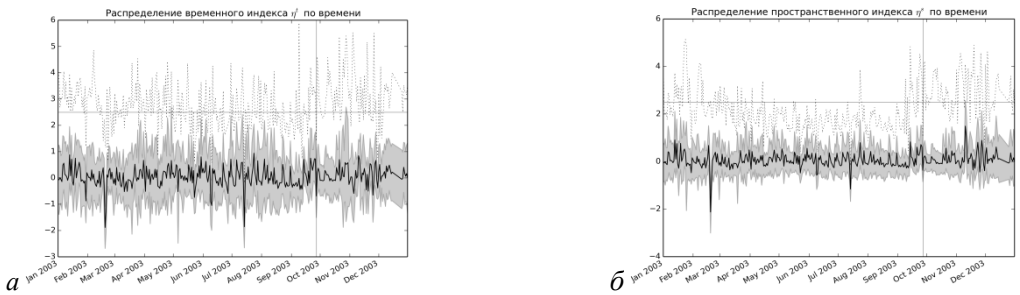
а *б*

Рис. 1. Количество аномальных: *а* – по пространству; *б* – по времени пикселей, а также доля валидных пикселей. Вертикальная линия соответствует дню землетрясения – 27 сентября



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Локализация аномалий температуры, выделенных с использованием индекса η^t, в дни до (*а–в*) и после (*г*) события. Светло-серый цвет – валидные данные, значение индекса не превышает 2,0; черный цвет – значение индекса свыше 2,5; белый цвет – данные отсутствуют или ошибка превышает допустимый уровень



а *б*

Рис. 3. Максимальное (пунктирная линия) и среднее значение индекса (сплошная линия) для индексов: *а* – $\eta^t(r, t)$; *б* – $\eta^s(r, t)$

Заключение

Выполненный анализ показал принципиальную возможность применения RST подхода для выявления аномалий температуры на территории с выраженными сезонными колебаниями температуры и рельефом, такой как территория Алтайских гор. Однако вопрос о том, обусловлена ли хотя бы одна из выявленных аномалий механизмом локального парникового эффекта, вызванного изменением газового состава атмосферы при активации геологических разломов, остаётся открытым. Ответ на этот вопрос может дать как исследование других сейсмических событий с использованием метода RST, так и дальнейшее изучение областей повышенной температуры, выявленных на территории, прилегающей к эпицентру Чуйского землетрясения.

Список литературы

1. Tramutoli V. Robust AVHRR Techniques (RAT) for environmental monitoring: theory and applications // Proc. SPIE. 1998. V. 3496. P. 101–113.
2. Tramutoli V. et al. A decade of RST applications to seismically active areas monitoring by TIR satellite observations // Proc. 2013 EUMETSAT Meteorol. Sat. Conf. 2013. 8 p.
3. Жуков Б.С. и др., Пространственно-временной анализ тепловых аномалий как предвестников землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 333–343.
4. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Докл. акад. наук. 2005. Т. 405. № 6. С. 804–809.
5. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная геомеханическая модель литосферы района подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 25–28.
6. Еманов А.А., и др. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 29–36.
7. Tramutoli V. et al. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas // Ann. di Geofis. 2001. V. 44. № 2. P. 295–312.
8. Tramutoli V. et al. On the possible origin of thermal infrared radiation anomalies in Earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques // Chem. Geol. 2013. V. 339. P. 157–168.
9. Горный В.И. и др. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
10. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. V. 34. № 4. P. 892–905.
11. Кихтенко В.А. и др. Инфраструктура для выполнения научно-исследовательских работ с использованием данных дистанционного зондирования в ИВТ СО РАН // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4. № 2. С. 3–7.

УДК 504.54, 502.31

БАССЕЙНОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ: НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ ТАГИЛ

Г. Х. Гайнутдинова
ОАО «Научно-производственная корпорация «РЕКОД»
e-mail: ggaynutdinova@rekod.ru

В статье предложен метод по оценке существующей геоэкологической ситуации с использованием бассейнового подхода. Сочетание бассейнового подхода с использованием ГИС-технологий позволяет количественно оценить антропогенную нагрузку каждого компонента техногенной системы на окружающую среду с учетом степени устойчивости природной системы к антропогенному воздействию.

Ключевые слова: бассейновый подход, геоинформационные системы, цифровая модель рельефа, окружающая среда, геоэкологическая ситуация.

Цель исследования заключается в оценке интенсивности современного антропогенного воздействия на окружающую среду (ОС) посредством использования данных дистанционного зондирования земли (ДДЗ) и географических информационных систем (ГИС-технологий).

Основные задачи сводятся к следующему: 1) проведение функционального зонирования исследуемой территории; 2) выявление негативных факторов, воздействующих на ОС, и установление их характера; 3) определение степени антропогенной нарушенности рассматриваемой территории с учетом устойчивости ОС к антропогенной трансформации.

Объектом изучения является геоэкологическая ситуация бассейна реки Тагил.

Исходными материалами для работы послужили ДДЗ Земли, получаемые по результатам дешифрирования космических снимков, в том числе цифровая модель рельефа (ЦМР). Топографической основой послужила карта Свердловской области М 1:1 000 000.

В качестве программного обеспечения использованы лицензионные пакеты: WhiteboxGIS, Quantum GIS, ENVI и Image Media Center.

Методика оценки геоэкологической ситуации

В основе работы лежит методика проведения оценки геоэкологической ситуации с помощью определения границ водосборных бассейнов [1], которая базируется на использовании ГИС-технологий.

С целью оценки геоэкологической ситуации рассматриваемой территории была поставлена задача: определить степень антропогенной трансформации состояния природной среды в пределах природных границ. В качестве операционно-территориальной единицы (ОТЕ) был выбран водосборный бассейн.

Построение водосборных бассейнов осуществилось с использованием ЦМР (рисунок), позволяющие определить направления стока на территорию, обусловленную уклоном рельефа. ЦМР представлена в виде матрицы, каждая точка которой характеризуется координатами (широтой, долготой) и высотой. Была выбрана модель рельефа Shuttle Radar Ttopographic Mission (SRTM3) с разрешением 3 угловые секунды (90 м), что соответствует топографическим картам М 1:100 000, М 1:500 000.

В качестве программного обеспечения для построения водосборных бассейнов и моделирования дренажной сети выбрана программа WhiteboxGIS [2]. Построение дренажной сети осуществлялось с использованием метода D8 (Direction 8), или метода

одиночного направления стока. Согласно методу D8 поток из 8 смежных ячеек поступает в самую нижележащую ячейку [3]. Полученная дренажная сеть сопоставлялась с топографической картой района исследования. Для построения водосборного бассейна использовался модуль Watershed.

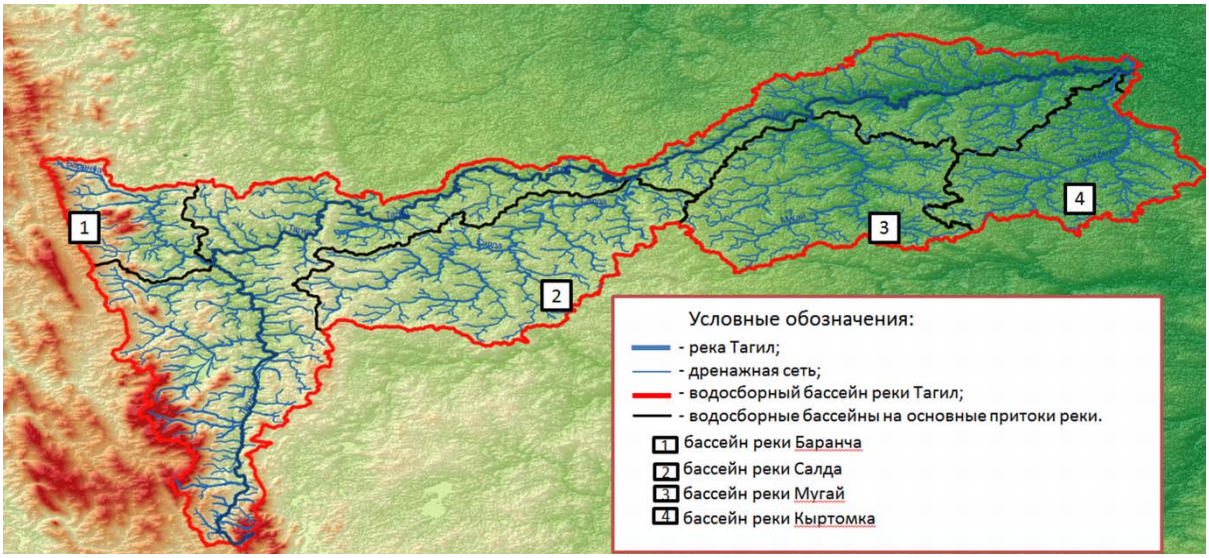


Рис. Цифровая модель рельефа реки Тагил

Определение сложившейся геоэкологической ситуации базируется на проведении экологической оценки состояния геосистемы [4]. Наиболее сложным является учет исходных показателей, которые характеризуют весь комплекс геосистемы, принимая в расчет все взаимосвязи компонентов ОС и значимость каждого из них.

Учет существующей хозяйственной деятельности рассматриваемой территории осуществлялся с проведением функционального зонирования, а именно: дифференциации территории по типу и характеру использования. В результате была создана геопространственная база данных функционального использования земли. Исходными данными послужили снимки Landsat-8 на 2014 г. и топографическая карта Свердловской области.

На первом этапе проводилась корректировка оцифрованной топографической карты на территорию бассейна по результатам визуального дешифрирования снимков Landsat-8. На втором этапе создана геопространственная база данных по функциональному использованию территории. На данном этапе проводилось автоматическое дешифрирование снимков программами ENVI и Image Media Center.

Методика проведения экологической оценки антропогенной нагрузки

Для оценки антропогенной нагрузки и воздействия хозяйственной деятельности на состояние ОС большое значение имеет выбор оценочных критериев. Различным типам функционального использования земель были присвоены баллы (по результатам экспертных оценок), отражающие воздействия каждого землепользования на геосистему.

Типизация техногенных систем и возможность их воздействия на геоэкологическую ситуацию создана с учетом предложенных ранее В. И. Мозжериным [1] и Р. Х. Сунгатуллиным [5] показателей (таблица).

Таблица

Типизация техногенных систем и возможное их влияние на геоэкологическую ситуацию

Категории земель		Экспертная оценка антропогенной нагрузки на среду (баллы)	Основные виды возможных антропогенных воздействий на ОС
Земли особо охраняемых территорий и объектов	Заповедники, национальные парки и т.д.	1	Локальные и незначительные загрязнения геосистемы
Земли лесохозяйственного назначения	Смешанные и хвойные леса	1	
	Вырубки, просеки		Сокращение биологического разнообразия территории, изменение ландшафта
Земли сельскохозяйственного назначения	Пашни (пахотные земли)	4	Загрязнение поверхностных вод, активация эрозии почв, изменение стока поверхностных вод, изменение свойств грунтов
	Садово-огородные участки	2	
	Пастбищные луга	3	Нарушение почвенно-растительного слоя, загрязнение поверхностных и подземных вод, активация процессов оврагообразования, эрозия почв
	Животноводческие фермы, птицефабрики, зверосовхозы	3	Интенсивное загрязнение почвенного покрова, вод, изменение стока поверхностных вод
Селитебные земли	Городская застройка	6	Изъятие земельных ресурсов, разрушение почвенного покрова, суффозия, загрязнение воздушного бассейна, изменение рельефа, изменение условий формирования уровня подземных вод, изменение поверхностного стока, угнетение биологических ресурсов, загрязнение и захламление отходами
	Поселки сельского типа	4	
	Кладбища	3	
	Свалки	4	
	Аэропорты, посадочные полосы	4	
Земли промышленного назначения	Коммуникации (ЛЭП, газопровод, нефтепроводы)	3	Уплотнение грунтов, изменение условий питания вод, физическое загрязнение среды
	Заводы и фабрики	5	Загрязнение подземных, поверхностных вод, воздушного бассейна, изменение стока вод, уплотнение и образование техногенных грунтов
Земли для пользования недрами	Карьеры, разрабатываемые месторождения	6	Преобразование рельефа местности и нарушение ландшафта, изъятие полезных ископаемых, изменение условий питания и разгрузки подземных вод, образование и размещение крупнотоннажных отходов (вскрышной породы)

Окончание табл.

Категории земель		Экспертная оценка антропогенной нагрузки на среду (баллы)	Основные виды возможных антропогенных воздействий на ОС
Земли транспорта	Железные дороги	6	Загрязнение почв, вод, изменение поверхностного и подземного стока, просадка грунтов
	Автодороги шоссейные	5	
	Автодороги грунтовые	4	
Земли водного фонда	Реки и водоемы	1	Изменение уровня подземных вод, условий формирования вод, изменение поверхностного стока
	Водохранилища, каналы, дамбы, плотины	1	

Оценка антропогенной нагрузки на природные компоненты окружающей среды принимают значения от 1 до 6, возрастая по степени увеличения воздействия от слабого или незначительного (незначительного изменения естественного состояния природных компонентов ОС), среднего или умеренного (средней степени загрязнения) до сильного (значительного нарушения природных компонентов ОС).

Парагенетические части бассейновых геосистем (водораздел – склон – пойма) обладают разной степенью устойчивости к антропогенному воздействию, которые активизируют экологически неблагоприятные процессы [1]. Различным типам местности присвоены баллы, которые отражают степень устойчивости к оказываемому антропогенному воздействию. Так, наиболее устойчивой к воздействию является пойма (3 балл устойчивости), средней устойчивостью характеризуются склоновые комплексы и низкий балл устойчивости принадлежит водоразделам и террасовым комплексам.

Заключение

Практическая значимость вышеизложенной работы заключается в том, что она открывает новые возможности внедрения данных дистанционного зондирования, гидрологических и картографических методов в экологические исследования, результаты которых могут использоваться для выделения наиболее неблагополучных территорий и в прогнозе деградации природных компонентов ОС.

Список литературы

1. Мозжерин В.И. Река Казанка и её бассейн. Казань: ИД МеДДоК, 2012. 280 с.

2. Lindsay J.B. (2014). The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and Open-Access GIS // Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16–18 April. URL: https://whiteboxgeospatial.files.wordpress.com/2014/04/john-lindsay-gisruk-paper.pdf (дата обращения: 10.07.2015).

3. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. № 54 (11). P. 1593–1600.

4. Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ / О.П. Ермолаев, М.Е. Игонин, А.Ю. Бубнов, С.В. Павлова. Казань: «Слово», 2007. 411 с.

5. Сунгатуллин Р.Х. Комплексный анализ геологической среды (на примере Нижнекамской площади). Казань: Изд-во Мастер-Лайн, 2001. 140 с.

УДК 528.88

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

А. С. Голюков, С. Т. Им, В. И. Харук
ФГБУН Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
e-mail: jedirevan@ya.ru
e-mail: stim@ksc.krasn.ru
e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

На основе гравиметрии (спутник GRACE), альтиметрии (спутники TOPEX/POSEIDON, Jason-1 и Jason-2/OSTM), климатических и наземных данных исследованы аномалии водной массы оз. Байкал и бассейна р. Селенга. Установлено возрастание засушливости в бассейне Селенги, выявлен тренд снижения уровня Байкала в начале 21-го столетия.

Ключевые слова: Байкал, бассейн р. Селенга, GRACE, альтиметрия, водный баланс, изменения климата.

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения уровня и температуры воды Байкала связывают с изменениями климата [1]. Согласно прогнозам [2] в текущем столетии будет наблюдаться дальнейшее возрастание температуры (воздуха и воды) и аридности климата. Сток р. Селенга (бассейн ~447000 км^2, большая часть которого находится в Монголии) составляет примерно 50 % общего стока в Байкал (с вариациями от 30 до 60 %; [3]). Среднегодовой сток Селенги составляет ~ 29 км^3/год (9,7 км^3/год на российско-монгольской границе). В основном её сток определяется снеготаянием в весенний период; второй пик стока наблюдается в августе-сентябре.

Цель данной работы – оценка воздействия изменений климата на аномалии водной массы оз. Байкал и бассейна р. Селенга.

В работе использованы данные дистанционного зондирования (гравиметрическая съёмка GRACE, радиолокационная альтиметрия – TOPEX/POSEIDON, Jason-1 и Jason-2/OSTM), климатические переменные и наземные исследования. Оценка динамики водной массы проводилась по данным GRACE (с 2002 по 2014 г.; пространственное разрешение 1°, что соответствует ~180×69 км^2 на широте 52°). Исходные данные доступны на сайте (http://grace.jpl.nasa.gov) и представляют месячные аномалии водного эквивалента массы (АВЭМ, см). Уровень поверхности Байкала определялся по данным радиолокационной альтиметрии (1992–2014 гг.). Обработка проводилась в программных пакетах Erdas Imagine и ESRI ArcGIS. Климатические переменные получены на сайте http://www.cru.uea.ac.uk; величина пикселя 0,5°. Индекс сухости SPEI, позволяющий оценивать интенсивность и длительность засух, рассчитывался как разность между количеством осадков и потенциальной эвапотранспирации (http://sac.csic.es/spei). Статистический анализ проводился в пакетах Statsoft Statistica и Microsoft Excel. Корреляционные связи между среднегодовым стоком Селенги и уровнем Байкала оценивались для гидрологического года, теплого (июнь-август), холодного (сентябрь-май) и годового периодов.

Байкал и бассейн р. Селенга

Минимальные значения уровня Байкала и годовой сток Селенги связаны корреляционной зависимостью ($r = -0,73$; $p < 0,03$). Установлена значимая связь среднего уровня Байкала с индексом сухости в бассейне р. Селенга ($r = 0,75$; $p < 0,01$). В период с 2004 по 2014 г. происходило уменьшение уровня оз. Байкал (на 0,012 см/год: $R^2 = 0,5$; $p < 0,1$; рис. 1).

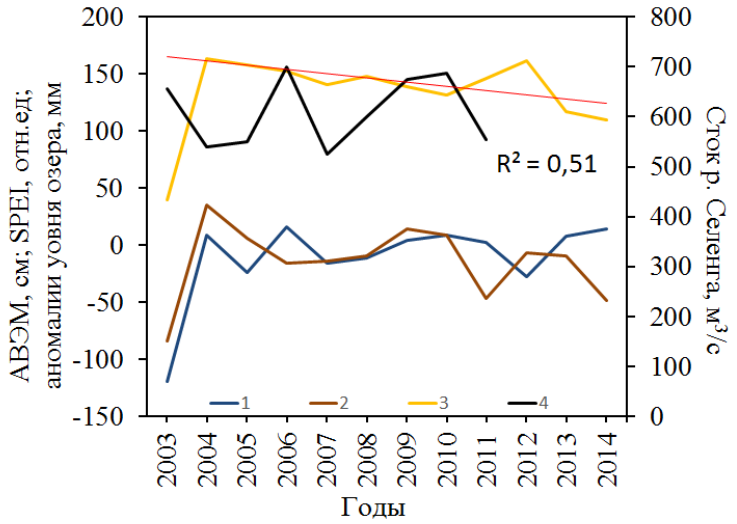


Рис. 1. Динамика климатических и гидрологических переменных (территория оз. Байкала, летний период). 1, 2 – динамика аномалий водного эквивалента массы (АВЭМ) и индекса сухости SPEI; 3 – уровень Байкала; 4 – годовой сток Селенги. Масштабирующие коэффициенты по переменным: 10, 50, 300, 1 (для 1–4, соответственно)

Среднемесячные температуры с марта по сентябрь достоверно ($p < 0{,}05\ldots0{,}001$) повысились на ~1°C (в 2000–2013 гг. по сравнению с 1950–1999 гг.; рис. 2). В указанный период значительно возросла засушливость климата, особенно в холодный период, когда происходит накопление водной массы ($p < 0{,}001\ldots0{,}007$; рис. 3, *в*).

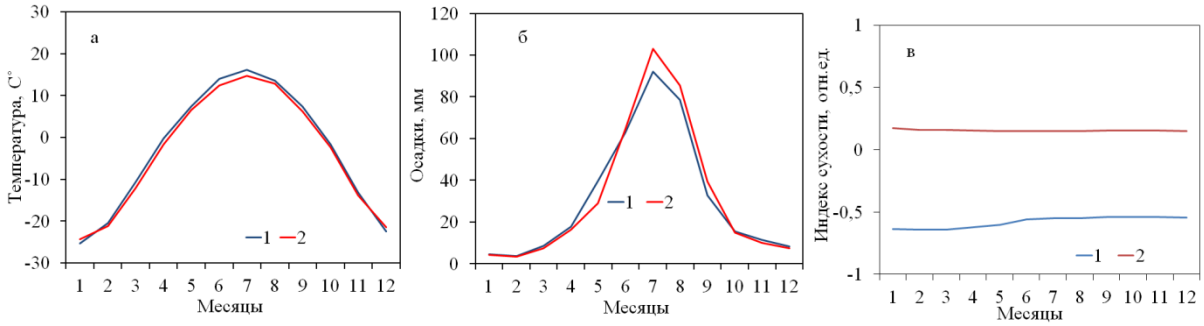


Рис. 2. Климатограммы бассейна р. Селенга. 1 – 2000–2013 гг.; 2 – 1950–1999 гг.

В бассейне р. Селенга наблюдалось возрастание среднегодовых (1985–2009 гг.) и летних (1985–2002 гг.) температур воздуха и эвапотранспирации (рис. 3); в уровне осадков изменений не выявлено.

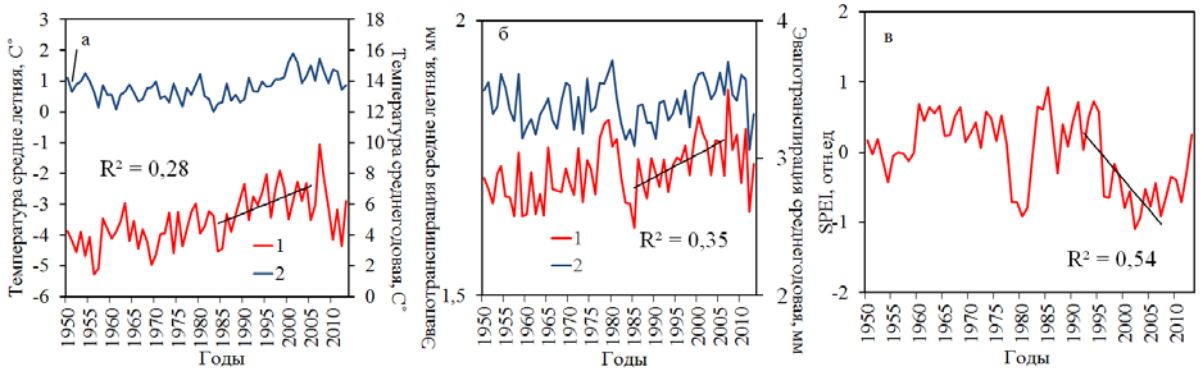


Рис. 3. Динамика климатических переменных бассейна р. Селенга. *а* – температура; *б* – эвапотранспирация; *в* – индекс сухости SPEI (1 – среднегодовые, 2 – средне летние величины). Тренды обозначены прямыми

Годовой сток р. Селенга зависит от средней летней температуры ($r = –0,69$; $p < 0,05$) и эвапотранспирации за гидрологический год ($r = –0,7$; $p < 0,04$). Средний уровень Байкала значимо связан с индексом сухости в бассейне Селенги ($r = 0,75$; $p < 0,008$), а также аномалиями водной массы бассейна Селенги ($r = 0,74$; $p < 0,009$). Данные гравиметрической съемки GRACE коррелируют с годовыми осадками ($r = 0,78$; $p < 0,005$), индексом сухости ($r = 0,77$; $p < 0,005$) и с уровнем оз. Байкала ($r = 0,79$; $p < 0,004$).

Заключение

В XXI столетии наблюдается тренд снижения уровня оз. Байкал, что связано с возрастанием засушливости в бассейне р. Селенга, основного источника водной массы Байкала. Гравиметрическая съёмка GRACE представляет адекватный метод дистанционной оценки водного баланса водоёмов и водосборных бассейнов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-24-00112.

Список литературы

1. Hampton SE. et al. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia // Global Change Biology 14. 2008. P. 1947–1958.

2. Christensen JH et al. Regional climate projections. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Cambridge University Press. 2007. P. 847–940.

3. Sergey R. et al. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environ Earth Science. 2014. DOI 10.1007/s12665-014-3106-z.

4. Bereznykh T. et al. Changes in the summertime atmospheric circulation over East Asia and formation of long-lasting low-water periods within the Selenga river basin // Geogr. Nat. Resour. 3. 2012. P. 61–68.

5. Cheinway H. et al. A Preliminary Analysis of Lake Level and Water Storage Changes over Lakes Baikal and Balkhash from Satellite Altimetry and Gravimetry // Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 22. No. 2. 2011. P. 97–108.

УДК 537.874.2.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОТРАЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЫ

П. Н. Дагуров
Институт физического материаловедения СО РАН
e-mail: dpn@bsc.ipms.ru

APPROXIMATE METHOD OF CALCULATION OF SPHERICAL WAVE REFLECTION FROM TWO-LAYER MEDIUM

P. N. Dagurov

Предложен метод расчета коэффициента отражения и преломления волны от точечного источника двухслойной среды с плоскими границами раздела. Получены формулы для изменения амплитуды волны при отражении и преломлении двухслойной средой. Показано, что учет сферичности волны необходим при произвольном соотношении между высотой источника над слоем и толщиной слоя

Ключевые слова: сферическая волна, отражение, преломление, микроволны, слоистая среда.

Введение

Проблемы взаимодействия волн со слоистыми средами представляют большой интерес для различных областей волновой физики и приложений. В задачах дистанционного зондирования Земли земные покровы часто можно считать слоистыми. Это такие покровы, как почва со слоистой структурой влажности, снег, лед [1–4]. Общие вопросы взаимодействия волн со слоистыми средами рассмотрены в классической монографии [5]. Наиболее простым вариантом слоистой среды является двухслойная среда в виде однородного плоского слоя конечной толщины, лежащего на однородном полупространстве. Для отражения плоской волны от двухслойной структуры существует известное решение, основанное на суммировании всех волн, испытавших отражения. Обычно это решение и используется в различных задачах, связанных с взаимодействием волн с двухслойной средой. Для сферической волны подобное геометрооптическое решение в известной литературе отсутствует.

Цель работы заключается в определении коэффициента отражения сферических волн от двухслойной среды в приближении геометрической оптики.

Отражение сферической волны в приближении геометрической оптики

Геометрия задачи показана на рис. 1. В точке A в среде 1 в воздухе ($\varepsilon_1 = 1$) на высоте h_A над поверхностью слоя расположен точечный источник монохроматических волн с комплексной амплитудой $exp(ikr)/r$ (k – волновое число, r – расстояние от источника). В точке B на высоте h_B находится приемник излучения. Расстояние между антеннами вдоль верхней границы раздела равно d. Двухслойная среда образована диэлектрическим плоским слоем 2 с диэлектрической проницаемостью ε_2 толщиной b, лежащим на полупространстве 3 с диэлектрической проницаемостью ε_3.

Найдем коэффициент отражения от двухслойной среды. Будем полагать, что выполняется условие h_A, $h_B >> \lambda$ (λ – длина волны), и используем лучевой подход. По аналогии с решением для плоской волны представим поле отраженной волны в точке наблюдения в виде суммы всех волн, испытавших различное число отражений и преломлений. На рис. 1 показаны три волны: волна, отражённая от верхней границы 12 между средами 1 и 2; волна, прошедшая (преломившаяся) в слой через границу 12, отразившаяся от нижней границы 23 и затем прошедшая границу 21; волна, прошедшая в слой и вышедшая из него после двух отражений от нижней границы и одного

отражения от верхней границы. В отличие от плоской волны углы падения и, соответственно, преломления для разных волн в слое, а также и амплитуды этих волн имеют различные значения, что не позволяет суммировать волны простым способом, используя свойства геометрической прогрессии [5].

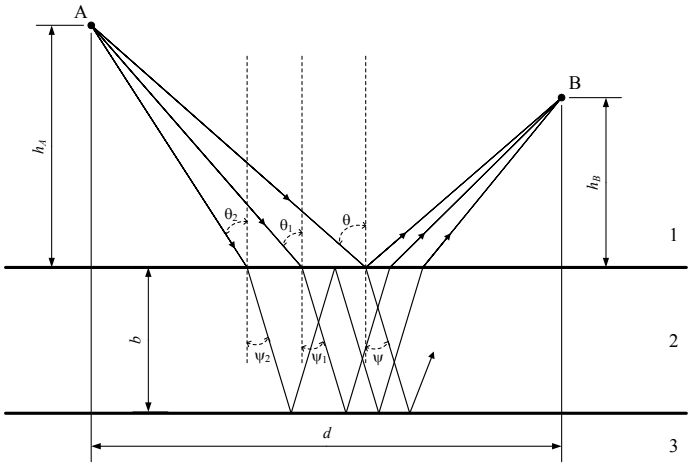


Рис. 1. Геометрия задачи об отражении сферической волны от двухслойной среды

Расстояние r_0, которое проходит волна, отраженная от верхней границы раздела под углом θ и сам угол θ, определяются соотношениями

$$r_0 = \frac{h_A + h_B}{\cos\theta}, \ \theta = arctg\frac{d}{h_A + h_B}. \tag{1}$$

Найдем угол θ_j, под которым на слой падает j-я волна, проходящая в слой и испытывающая затем j отражений от нижней границы слоя и (j – 1) отражений от верхней границы. Из геометрии задачи и закона Снеллиуса, связывающего угол падения θ_j и угол преломления ψ_j для j-й волны, получим уравнения для определения θ_j, которые решаются численно,

$$(h_A+h_B)\operatorname{tg}\theta_j + 2bj\operatorname{tg}\psi_j = (h_A+h_B)\operatorname{tg}\theta, \qquad \psi_j = \arcsin\frac{\sin\theta_j}{\sqrt{\varepsilon_2}}. \tag{2}$$

Расстояние r_j, пройденное рассматриваемой волной от точки A до точки B, является суммой расстояний, пройденных волной в средах 1 и 2, а её фаза φ_j определяется из соотношения

$$\varphi_j = k\left(\frac{h_A+h_B}{\cos\theta_j} + \frac{2jb\sqrt{\varepsilon_2}}{\cos\psi_j}\right). \tag{3}$$

Поле j-й волны имеет вид

$$E_j = T_{12j}(R_{23j})^j(R_{21j})^{j-1}T_{21j}\frac{\exp(i\varphi_j)}{r_{je}}, \tag{4}$$

где T_{12j} и T_{21j} – коэффициенты прохождения волны из первой среды во вторую, и из второй среды в первую, соответственно; R_{21j} и R_{23j} – коэффициенты отражения волны в слое 2 от первой среды и третьей среды соответственно.

В формуле (4) через r_{je} обозначено эквивалентное расстояние, которое отличается от геометрического расстояния, пройденного j-й волной. В работе [5] в приближении

геометрической оптики получено выражение для амплитуды преломленной сферической волны в среде 2, которое можно представить в виде

$$|E| = \frac{1}{r_1}\sqrt{\frac{h_1 tg\alpha_1}{h_1 tg\alpha_1 + h_2 tg\alpha_2}\frac{h_1}{h_1 + \frac{h_2}{\sqrt{\varepsilon_2}}\left(\frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}\right)^3}}|T_{12}|\,. \qquad (5)$$

В формуле (5) r_1 – расстояние от источника до точки входа луча в среду 2; h_1, h_2 – расстояния от источника и точки наблюдения во второй среде до поверхности раздела соответственно; α_1, α_2 – углы падения и преломления.

Обобщение формулы (5) с помощью метода зеркальных изображений на случай отражения от двухслойной среды приводит к следующему выражению для эквивалентного расстояния

$$r_{je} = \frac{h_A}{\cos\theta_j}\sqrt{\frac{(h_A + h_B)tg\theta_j + 2jbtg\psi_j}{h_A tg\theta_j}\frac{h_A + h_B + \frac{2jb}{\sqrt{\varepsilon_2}}\left(\frac{\cos\theta_j}{\cos\psi_j}\right)^3}{h_A}}\,. \qquad (6)$$

Учитывая, что h_A, $h_B >> \lambda$, далее в качестве коэффициентов отражения и прохождения через границу двух однородных сред будем использовать коэффициенты Френеля.

Независимо от поляризации для коэффициентов прохождения имеем соотношения

$$T_{12j} = 1 - R_{21j}\,, \quad T_{21j} = 1 + R_{21j}\,.$$

Поле волны, отраженной от границы раздела сред 1 и 2 с коэффициентом отражения R_{12}, имеет вид

$$E_0 = R_{12}\frac{\exp(ikr_0)}{r_0}. \qquad (7)$$

Используя соотношения (4) и (7), получим результирующий коэффициент отражения

$$R = \frac{E_0 + \sum_1^\infty E_j}{\exp(ikr_0)/r_0}. \qquad (8)$$

Анализ показывает, что при удалении источника или приемника от границы раздела выражение (8) переходит в известную формулу для коэффициента отражения для плоской волны

$$R = \frac{R_{12} + R_{23}\exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}\cos\psi)}{1 + R_{12}R_{23}\exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}\cos\psi)}. \qquad (9)$$

Отметим, что в формулах (8) и (9) поляризация излучения учтена в коэффициентах отражения R_{12} и R_{23}.

Расчеты и обсуждение результатов

Для проверки решения были проведены численные расчеты для двухслойной модели «лёд – вода» на длине волны 23 см. Диэлектрическая проницаемость льда для

L-диапазона микроволн была принята равной 3,2, а воды 80. Было установлено, что наблюдается быстрая сходимость ряда по отраженным волнам. Результаты суммы из четырех членов во всех случаях с графической точностью совпадают с результатами, полученными при суммировании большего числа членов ряда. Это объясняется быстрым уменьшением амплитуд отраженных волн с увеличением числа отражений внутри слоя, несмотря на то, что нижней границей является вода, обеспечивающая высокий коэффициент отражения. При большой высоте источника или приемника по сравнению с толщиной слоя результаты для сферической волны совпадают с результатами для плоской волны. Это видно из рис. 2, где показаны результаты расчетов для высот источника и приемника 20 м и толщине слоя льда 1 м. На рис. 3 показаны аналогичные кривые для высот источника и приемника 2 м. Из них следует, что применение формулы для плоской волны в данном случае приведёт к существенным ошибкам.

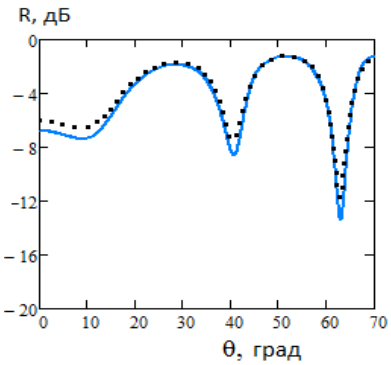


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения на слой (горизонтальная поляризация); $h_A = h_B$ = = 20 м, b = 1 м; сплошные линии – сферическая волна, точки – плоская волна

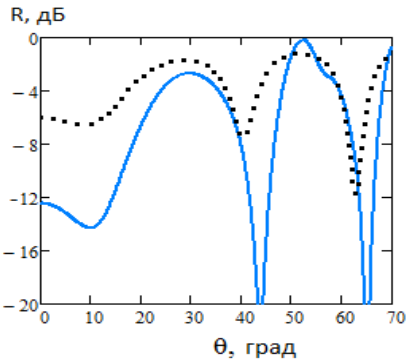


Рис. 3. Зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения на слой (горизонтальная поляризация); $h_A = h_B$ = = 2 м, b = 1 м; сплошные линии – сферическая волна, точки – плоская волна

Заключение

В работе в лучевом приближении решена задача об отражении сферической волны от двухслойной среды. В результате численных расчетов установлено, что при толщине слоя, сравнимой с высотой источника над слоем, наблюдаются существенные различия между предложенным решением и известным решением для плоской волны. Полученные результаты могут быть использованы при наземной бистатической радиолокации земных покровов и для других приложений.

Список литературы

1. Nievinski F.G., Larson K.M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation – Part I: formulation and simulation // IEEE Trans. Geosci. Remote S. 2014. V. 52. N. 10. P. 6555–6563.

2. Rees W.G. Remote Sensing Of Snow And Ice. Taylor and Francis // CRC Press. 2006. 285 p.

3. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой / П.Н. Дагуров, А.В. Дмитриев, Ж.Б. Дымбрылов, Т.Н. Чимитдоржиев // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.

4. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования / Т.Н. Чимитдоржиев, П.Н. Дагуров, А.И. Захаров [и др.] // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 1. С. 80–87.

5. Вариации поля микроволн при отражении от снежных и ледовых покровов / П.Н. Дагуров, А.В. Дмитриев, Т.Н. Чимитдоржиев [и др.] // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, №8/2. С. 44–47.

6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.

УДК 528.81, 537.874

ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ МИКРОВОЛН, ОТРАЖЕННЫХ И РАССЕЯННЫХ СЛОИСТОЙ СРЕДОЙ

П. Н. Дагуров[(1)], А. В. Дмитриев[(1)], С. И. Добрынин[(2)], Т. Н. Чимитдоржиев[(1)]
[(1)]Институт физического материаловедения СО РАН
[(2)]Бурятский филиал Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
mail: dpn@ipms.bscnet.ru

Показано, что слоистая структура земных покровов наряду с вариациями амплитуды вызывает заметные вариации фазы отраженных и рассеянных микроволн, которые необходимо учитывать при интерпретации данных дистанционного зондирования. Приведены результаты расчетов фазы волн, отраженных и рассеянных от некоторых двухслойных покровов.

Ключевые слова: зондирование, микроволны, отражение, рассеяние, фаза.

Введение

Наряду с амплитудой, основной характеристикой радиоволны является его фаза, пропорциональная пути, пройденному волной. Свойства фазы, точнее, разности фаз, изначально использовались в радионавигации и в последние десятилетия нашли широчайшее применение в глобальных навигационных спутниковых системах. На измерениях разности фаз построены различные радиоинтерферометры, используемые для радиоастрономических наблюдений.

Интерферометрические методы нашли широкое применение в микроволновом дистанционном зондировании Земли. При интерпретации данных зондирования интерферометрическим радарами основой информативной характеристикой является интерферометрическая фаза радиолокационного сигнала, рассеянного земной поверхностью. Используемые до последнего времени расчетные методы практически не учитывают зависимость фазы радиолокационного сигнала от физических и геометрических свойств почвенных покровов, в частности от слоистой структуры приповерхностной почвы. Обычно при анализе работы интерферометрических радаров используется следующее выражение для интерферометрической фазы сигнала [1]:

$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}, \qquad (1)$$

где слагаемое φ_{topo} возникает вследствие рельефа, компонента φ_{def} описывает влияние деформаций земной поверхности за время между пролетами спутника, составляющая φ_{atm} возникает из-за неоднородности атмосферы, слагаемое φ_{noise} обусловлено шумами приемно-передающего оборудования.

В формуле (1) не учитывается зависимость фазы сигнала от изменения отражательных свойств поверхности, которая может быть обусловлена слоистой структурой влажности почвы, влиянием замерзания верхнего слоя почвы и другими факторами. Между тем, вариации фазы могут существенно уменьшить точность метода дифференциальной интерферометрии, используемой для определения деформаций и подвижек земных покровов и сооружений на них [2]. Целью работы является оценка влияния слоистости почвы на фазу отраженных и рассеянных микроволн на примере простейших двухслойных почвенных структур.

Фаза коэффициента отражения двухслойной среды

Предварительно остановимся на поведении фазы коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от плоской границы раздела двух однородных сред, т. е. фазы коэффициентов отражения Френеля. Эти коэффициенты входят в

коэффициент излучения, используемый в микроволновой радиометрии. Кроме того, они в той или иной форме используются в моделях обратного рассеяния микроволн от однородной среды с шероховатой поверхностью. Как известно, фаза коэффициента отражения Френеля при отражении от любой диэлектрической среды и независимо от угла падения, в отличие от амплитуды, при горизонтальной поляризации имеет постоянное значение 180^o. При вертикальной поляризации при угле падения меньше угла Брюстера она равна либо 0, в противном случае фаза равна 180^o. Расчеты показывают, что и в случае поглощающей среды фаза слабо зависит от действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. На рис. 1 приведены зависимости фазы коэффициента Френеля при горизонтальной поляризации для влажной почвы в зависимости от ее объёмной влажности для частоты 1,4 ГГц, полученные с использованием данных [3].

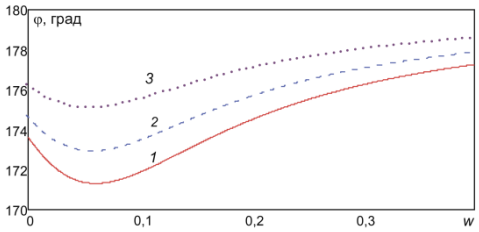


Рис. 1. Зависимости фазы коэффициента отражения от объемной влажности *w* при различных углах падения θ (кривая 1 – θ = 0^o, 2 – θ = 40^o, 3 – θ = 60^o)

Приведенные зависимости показывают, что увеличение влажности почвы до значения порядка 5 % приводит к неглубокому минимуму аргумента коэффициента отражения и при дальнейшем увеличении влажности значение аргумента растет и стремится к 180^o. Изменения аргумента в зависимости от изменений влажности не превышают $4–6^o$.

В действительности случай однородной почвы является идеализацией. Более общей является ситуация, когда влажность изменяется по глубине и почва является слоистой средой. Слоистость может носить непрерывный или дискретный характер в зависимости от особенностей почвы. В работах [4–6] было установлено существенное влияние параметров двухслойной почвы на фазу отраженного сигнала. Задача формулируется следующим образом. На почве, занимающей полупространство с одним значением влажности, лежит слой толщиной d с другим значением влажности. Границы раздела между средами являются плоскими. Для расчета фазы используется известная формула для коэффициента отражения от двухслойной среды [7].

На рис. 2 представлены результаты расчета фазы коэффициента отражения при нормальном падении волны с частотой 1,4 ГГц на слой толщиной d = 2 см. Расчетные данные показывают, что слоистость почвы приводит к заметным изменениям фазы коэффициента ослабления, достигающим десятков градусов в диапазоне изменений объемной влажности от 0 до 0,4. Зависимости в общем случае имеют нерегулярный вид, что обусловлено интерференционным характером формирования отраженной волны. Наименьшие изменения фазы наблюдаются в случае, когда верхний слой имеет постоянную влажность 0,3. Это объясняется тем, что глубина скин-слоя для почвы с этой влажностью оказывается немногим больше 2 см.

Фаза волны при обратном рассеянии от двухслойной среды с шероховатыми границами раздела

Геометрия задачи показана на рис. 3. Из среды 1 (атмосфера) на слой 2 с шероховатыми границами раздела, лежащий на полупространстве 3, падает плоская

электромагнитная волна единичной амплитуды. Среды 2 и 3 имеют комплексные диэлектрические проницаемости ε_2 и ε_3 соответственно. Полагаем, что неровности являются стационарными случайными функциями горизонтальных координат с нулевым средним значением, так что границы раздела среднем являются плоскостями с расстоянием между ними d (средняя толщина слоя). Также будем считать флуктуации малыми, т. е. среднеквадратичное отклонение неровностей много меньше длины волны.

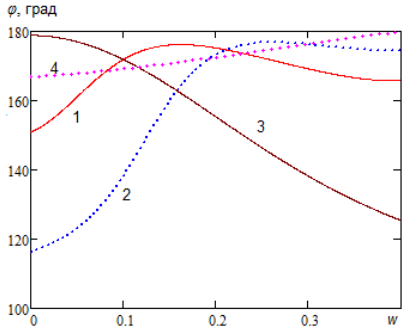


Рис. 2. Зависимости фазы коэффициента отражения от объемной влажности для слоистой почвы при d = 2 см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3) соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

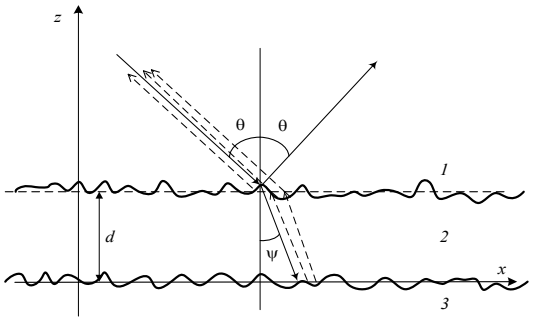


Рис. 3. Геометрия задачи об обратном рассеянии

Найдем поле обратного рассеяния. Как показано на рис. 3, это поле является суммой волн, испытавших различное число отражений и преломлений. Во-первых, это волна, рассеянная верхней граничной поверхностью 12 между средами 1 и 2; затем волна, прошедшая (преломившаяся) в слой через границу 12, рассеянная от нижней границы 23 и затем прошедшая границу 21 и т. д. Поскольку неровности малы, будем полагать, что коэффициенты прохождения определяются формулами Френеля (борновское приближение). Введем понятие коэффициента обратного рассеяния по полю от шероховатой поверхности, равного отношению напряженности рассеянного поля, к напряженности падающего поля. Тогда коэффициент обратного рассеяния от слоя с шероховатыми границами можно представить в виде

$$r = r_{12} + T_{12} r_{23} T_{21} e^{2ik_2 d/\cos\psi} \sum_{n=0}^{\infty} \left(r_{21} r_{23} e^{2ik_2 d/\cos\psi} \right)^n , \qquad (2)$$

где r_{12} и r_{23} – коэффициенты обратного отражения по полю от верхней и нижней поверхностей, соответственно; T_{12} и T_{21} – коэффициенты прохождения через верхнюю границу; k_2 – волновое число в слое; θ_2 – угол преломления, определяемый законом Снеллиуса.

Используя формулу для бесконечной геометрической прогрессии, получим

$$r = \frac{r_{12} + (r_{12}^2 + 1 - R_{12}^2) r_{23} e^{2ik_2 d/\cos\psi}}{1 + r_{12} r_{23} e^{2ik_2 d/\cos\psi}}, \qquad (3)$$

где R_{12} – коэффициент отражения Френеля от второй среды.

Коэффициент обратного рассеяния (3) фактически представляет собой суммарное поле некогерентного рассеяния неровностями поверхности отдельного пиксела радарного изображения. Это поле иногда бывает равным нулю, что приводит к спекл-шумам. Однако большей частью поле каждого пиксела имеет конечную амплитуду и, соответственно, определенную фазу. В выражениях (2), (3) значения модулей r_{12} и r_{23} существенно меньше единицы и члены ряда быстро убывают по величине, поэтому для анализа ограничимся двумя первыми членами ряда

$$r = r_{12} + r_{23}(1 - R_{12}^2) e^{2ik_2 d/\cos\psi}. \qquad (4)$$

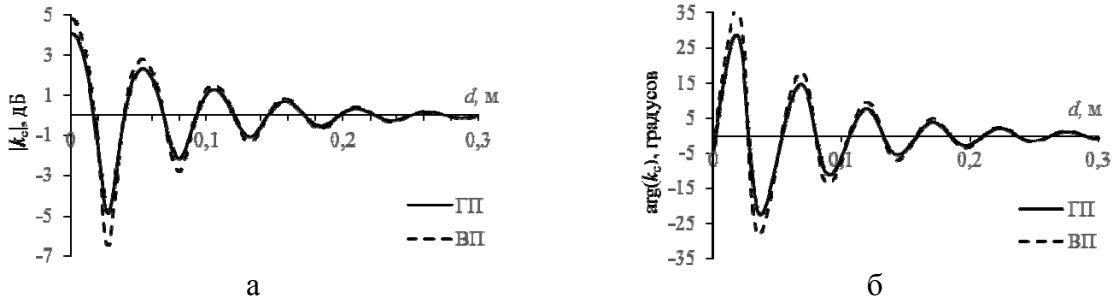
Разделив обе стороны равенства (4) на $r_{12,}$ получим коэффициент k_c, показывающий влияние слоистости на поле обратного рассеяния

$$k_c = 1 + \frac{r_{23}}{r_{12}}(1 - R_{12}^2) e^{2ik_2 d/\cos\psi}. \qquad (5)$$

Данный относительный коэффициент обратного рассеяния является случайной величиной, поскольку r_{12}, r_{23} – случайные величины и для оценок необходимо заменить их отношение какой-то детерминированной (усредненной) величиной. Выберем для оценок в качестве такой величины отношение коэффициентов отражения Френеля при перпендикулярном падении, поскольку именно перпендикулярные к направлению падающей волны участки неровностей должны вносить основной вклад в обратное рассеяние. Тогда формула (5) примет вид

$$k_c = 1 + \frac{\left(\sqrt{\varepsilon_3} - \sqrt{\varepsilon_2}\right)\left(\sqrt{\varepsilon_2} + 1\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon_3} + \sqrt{\varepsilon_2}\right)\left(\sqrt{\varepsilon_2} - 1\right)}(1 - R_{12}^2) e^{2ik_2 d/\cos\psi}. \qquad (6)$$

На рис. 2 приведены построенные по формуле (6) зависимости модуля и аргумента коэффициента k_c от толщины слоя на длине волны 23,5 см для горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризаций.



а б

Рис. 4. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента k_c от толщины слоя. $\theta = 45^0$; $\varepsilon_2 = 4{,}444 + 1{,}085i$; $\varepsilon_3 = 14{,}749 + 3{,}6i$

Наибольшее влияние слоистости почвы на изменения амплитуды и фазы отраженного сигнала проявляется в том случае, когда на влажной почве находится сравнительно сухой слой. По сравнению с однородной почвой амплитуда сигнала может изменяться в пределах от –7 до +5 дБ, а фаза от –30 до +35 градусов. Эти вариации фазы могут являться источником заметных ошибок при использовании

метода дифференциальной интерферометрии и, следовательно, их необходимо учитывать при его практическом применении.

Заключение

В работе представлены возможные вариации фазы микроволн при отражении и рассеянии от двухслойной влажной почвы. Установлено, что слоистость почвы может приводить к заметным изменениям фазы. Полученные результаты для двухслойной почвы могут служить основой для анализа многослойной среды и непрерывной слоистости. Сделан вывод о необходимости учета вариаций фазы для метода дифференциальной интерферометрии.

Список литературы

1. Kampes B.M. Radar Interferometry. Persistent Scatterer Technique. Springer, 2006. 221 p.

2. Lanari, R., Casu, F., Manzo et al. (2007). An overview of the Small BAseline Subset algorithm: A DInSAR Technique for surface deformation analysis // Pure and Applied Geophysics. 2007. V. 164. P. 647–661.

3. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., M. C. El-Rayes M. C., Wu L. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. 23, No. 1. P. 25–34.

4. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В, Дымбрылов Ж.Б., Чимитдоржиев Т.Н. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.

5. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Базаров А.В., Балтухаев А.К., Дымбрылов Ж.Б. Вариации амплитуды и фазы коэффициента отражения микроволн от влажно-слоистой почвы // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 5(51). С. 117–120.

6. Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Быков М.Е., Дмитриев А.В., Балданов Н.Д., Мухорин Е.А., Мильхеев Е.Ю. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 1. С. 80–87.

7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.

УДК 528.8.04, 528.88

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИФИКАТОРОВ В ЗАДАЧЕ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. В. Дмитриев[(1)], В. В. Козодеров[(2)]
[(1)]ФГБУН «Институт вычислительной математики РАН»
e-mail: yegor@mail.ru
[(2)]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
e-mail: vkozod@mail.ru

THE PERFORMANCE OF CLASSIFIERS IN THE TASK OF THEMATIC PROCESSING OF HYPERSPECTRAL IMAGES

E. V. Dmitriev[(1)], V. V. Kozoderov[(2)]
[(1)]«Institute of Numerical Mathematics RAS»
e-mail: yegor@mail.ru
[(2)]Lomonosov Moscow State University
e-mail: vkozod@mail.ru

Проводится анализ эффективности методов спектральной классификации в задаче гиперспектрального дистанционного зондирования почвенно-растительного покрова. Обсуждаются особенности реализации метрических классификаторов, параметрических байесовских классификаторов и многоклассового метода опорных векторов. Демонстрируются результаты классификации гиперспектральных аэроизображений указанными методами и приводятся данные сравнительного анализа. Показаны преимущества использования нелинейных классификаторов. Демонстрируются близость результатов некоторых модификаций метода опорных векторов и байесовской классификации.

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

Одним из наиболее важных этапов тематической обработки аэрокосмических изображений является классификация наземных объектов на основе спектральных характеристик отражательной способности. Качество получаемого результата определяется многими факторами, такими как состояние атмосферы, качество и разрешающая способность измерительной аппаратуры, качество коррекции и предварительной обработки, точность геопривязки и наземных данных. В данной работе исследуется зависимость качества распознавания наземных объектов от выбора классификатора.

Сформулируем задачу построения алгоритма классификации с обучением. Обозначим через X множество признаков, а через Y – множество наименований классов. В рассматриваемом случае признаками являются измеряемые спектральные яркости или связанные величины, получаемые на их основе. Пусть имеется априорная информация в виде конечного множества пар элементов множеств X и Y: $X^N = \{x(i), y(i)\}_{i=1}^N$, где N – число пар. Необходимо построить алгоритм $s = a(x)$ (где $x \in X$, $s \in Y$), который приводит к наилучшему в заданном смысле результату на множестве X^N. Процесс оптимизации параметров алгоритма называют обучением, а множество X^N – обучающем множеством. В данной работе к сравнению предлагаются метрические классификаторы (МК), параметрические байесовские классификаторы (БК) и метод опорных векторов (МОВ) [1].

МК применяются в предположении, что каждому распознаваемому объекту может быть поставлена в соответствие некоторая «эталонная» спектральная

характеристика отражательной способности. Обучение МК состоит из следующих этапов. Выбирается метрика ρ в пространстве признаков. На основе X^N для каждого класса рассчитываются положения центроидов – средних значений соответствующих признаков. Рассчитываются расстояния между признаками и центродидами соответствующих классов. Для каждого класса по полученным расстояниям строятся квантили уровня 0,95-0,99, производится фильтрация признаков наиболее удаленных от соответствующих центроидов (попадающих в критическую область) и выполняется перерасчет положения центроидов. Данная операция необходима, поскольку данные измерений могут содержать отдельные выбросы. Далее рассчитываются значения максимально возможных расстояний $\rho_{\max}$ до центроида каждого класса. Алгоритм классификации измерения $x \in X$ можно представить в виде

$$a(x) = \begin{cases} y(i), & k\left(\min\limits_i \rho(x, c_i)\right) \le \rho_{\max}(i), \\ \text{NaN}, \end{cases}$$

где i – номер класса; $c_i \in X$ – вектор с координатами соответствующего центроида; k – коэффициент масштабирования; NaN обозначает объекты вне множества Y (класс «нераспознанные объекты»).

БК применяется в предположении, что признаки являются случайными величинами. Действительно, измеряемые спектральные характеристики излучения отраженного от распознаваемых объектов могут быть представлены как совокупность элементарных оптически однородных компонент. Так, например, если элементу разрешения гиперспектрального прибора соответствует участок лесного полога, то даже при однородном породном и возрастном составе измеряемый спектр будет зависеть от объемного распределения листвы и ветвей, вариаций отражающей способности листьев, ветвей и подстилающей поверхности, и соотношения указанных элементов. Поскольку на практике нет точной информации о процентном соотношении элементарных компонент и их взаимном пространственном расположении, то формирование спектра пикселя гиперспектрального прибора имеет существенно случайный характер.

Общий вид алгоритма БК представляется выражением

$$a(x) = \arg\max_{y \in Y} P_y p_y(x),$$

где P_y – априорная вероятность класса y; $p_y(x)$ – функция плотности вероятности для данного класса. БК является оптимальным, поскольку полученное решение имеет наименьшую полную вероятность ошибки. Обучение БК состоит в получении оценок априорных вероятностей классов и распределений признаков внутри классов.

Определение P_y является своеобразным процессом настройки «жесткости» отбора признаков, производимой классификатором для того или иного класса. Для ограниченных дискриминантных поверхностей происходит преобразование с сохранением формы – гомотетия. Так, например, если данный класс дискриминируется эллиптической поверхностью, то увеличение априорной вероятности данного класса эквивалентно приводит к пропорциональному увеличению всех его осей. Часто P_y задаются эмпирически на основе некоторых предположений о возможности присутствия объекта на рассматриваемой сцене. Более общим подходом является оценка P_y по результатам текстурной классификации. Это позволяет с меньшей вероятностью допустить грубую ошибку при распознавании основных типов объектов. Для пикселей, которые были классифицированы на основе текстурного анализа с предположительно низкой точностью, P_y задаются одинаковыми для всех классов.

Параметрический подход предполагает, что функция плотности вероятности известна с точностью до параметров – $p_y(x) = \varphi(x, \theta)$, т. е. задано параметрическое семейство распределений Φ^θ. В этом случае, если выполнены условия регулярности, оптимальное значение вектора параметров θ можно оценить исходя из принципа максимального правдоподобия.

Если предполагается, что оцениваемые плотности вероятностей принадлежат семейству нормальных распределений (т. е. $p_y(x) \in N(\mu_y, \Sigma_y)$, μ_y – вектор математических ожиданий, Σ_y – ковариационная матрица признаков класса y), то получаемый алгоритм называют нормальным БК

$$a(x) = \arg\max_{y \in Y} \left(\ln(P_y) - \frac{1}{2}(x - \hat{\mu}_y)^T \hat{\Sigma}_y^{-1} (x - \hat{\mu}_y) - \frac{1}{2} \ln(\det(\hat{\Sigma}_y)) \right).$$

Если ковариационные матрицы всех классов равны ($\Sigma_y = \Sigma, \ \forall y \in Y$), то получаем линейный нормальный БК

$$a(x) = \arg\max_{y \in Y} \left(x^T \alpha_y + \beta_y \right),$$

где $\alpha_y = \hat{\Sigma}^{-1} \hat{\mu}_y$, $\beta_y = \ln(P_y) - \frac{1}{2} \hat{\mu}_y{}^T \hat{\Sigma}^{-1} \hat{\mu}_y$.

В реальности оптимальная дискриминантная поверхность как правило плохо аппроксимируется одним гиперэллипсоидом, но может быть приближена их совокупностью. Для этого вместо многомерного нормального распределения необходимо использовать модель гауссовских смесей

$$p_y\left(x \mid \{w_i, \mu_i, \Sigma_i\}_1^{\mathrm{K}}\right) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{N_x}}} \sum_{i=1}^{\mathrm{K}} \frac{w_i}{\sqrt{\det(\Sigma_i)}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i) \right],$$

где K – число компонент смеси, w_i, μ_i и Σ_i – соответственно, весовой коэффициент, вектор математических ожиданий и ковариационная матрица i-й компоненты смеси для класса y. Для оценки параметров w, μ, Σ используется EM-алгоритм.

Признаки, находящиеся далеко от значений в обучающей базе данных, скорее всего будут относиться к некоторой иной, неизвестной группе объектов. Таким образом, необходимо использовать только поверхности, ограничивающие некоторую конечную область в признаковом пространстве. Для этого в алгоритме БК дополнительно применяется условие

$$\max(p_y) < P_{\min},$$

что позволяет ввести класс "нераспознанные объекты". В этом случае квадратичный нормальный классификатор будет использовать только гиперэллипсоиды в качестве дискриминантных поверхностей.

Бинарный МОВ позволяет найти максимально удаленные параллельные гиперплоскости, разделяющие заданную пару классов, проходящие через область граничных точек (опорных векторов) распределения признаков этих классов. Определим множество меток классов как $y \in Y = \{-1, +1\}$ и запишем уравнения разделяющих гиперсплоскостей в виде $(w, x_i) - w_0 = y_i$. Тогда оптимизационная задача МОВ с "мягким" зазором может быть представлена в виде

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

где параметры $\xi_i \geq 0$ представляют собой штрафы за ошибочную классификацию граничных точек.

Обучение состоит в получении оценок параметров гиперплоскостей $w=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i y_i x_i$ и $w_0=(w,x_s)-y_s$, где x_s и y_s – признаки и наименования классов опорных векторов, а параметры λ_i находятся из решения оптимизационной задачи

$$\begin{cases} -L(\lambda)=-\sum_{i=1}^{N}\lambda_i+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\lambda_i\lambda_j y_i y_j (x_i,x_j)\to \min\limits_{\lambda}; \\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i y_i=0 \quad \text{и} \quad 0\leq\lambda_i\leq C, \quad i=1,...,N. \end{cases}$$

Алгоритм линейной классификации на основе МОВ имеет вид

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

причем следует отметить, что суммирование ведется только по опорным векторам, так как в противном случае $\lambda_i=0$.

МОВ легко обобщается на случай нелинейных разделяющих поверхностей с помощью преобразования скалярного произведения. В этом случае $w_0=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i y_i K(x_i,x_s)-y_s$ и 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 используются следующие функции $K(x,y)$: $K(x,y)=((x,y)+1)^2$ – квадратичное ядро и $K(x,y)=\exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right)$ – гауссовское ядро.

Для обобщения МОВ на случай многих классов решается серия задач бинарной классификации между различными группами классов. Для формализации таких задач строится модельная матрица $M=\left(m_{ij}\right)$, столбцы которой соответствуют некоторому бинарному классификатору МОВ. Элементы матрицы принимают значения: 1 – объект, –1 – альтернатива, 0 – прочие объекты, не участвующие в классификации. В данной работе используется стратегия «один против всех». В этом случае диагональные элементы матрицы *M* равны 1, а остальные равны –1. Алгоритм классификации имеет вид

$$a(x)=\arg\min_{y_i}\frac{\sum_{j=1}^{L}\left|m_{ij}\right|g(y_i,s_j(x))}{\sum_{j=1}^{L}\left|m_{ij}\right|},$$

где L – число моделей; $s_j(x)$ – результат бинарной классификации согласно модели, соответствующей столбцу j матрицы M ; g – функция потерь.

Для сравнения эффективности указанных методов использовались данные авиационной гиперспектральной съемки территории Тверского лесхоза. Подробное описание тестового участка и характеристик прибора приводится в работе [2]. Признаковое пространство было редуцировано до размерности 6. Методика и результаты отбора наиболее информативных спектральных каналов представлены в работе [3].

В таблице приведены значения взаимного сравнения указанных выше методов. В качестве меры близости использовалась доля совпадающих наименований объектов. На рисунке представлены результаты распознавания наиболее различающимися методами 7 основных классов данной сцены: водная поверхность, асфальтобетонное покрытие, почвогрунты, луговая растительность, сосна, береза, осина. Для визуальной валидации приведено изображение в инфракрасном канале (рисунок, *а*), где указанные классы имеют хороший контраст.

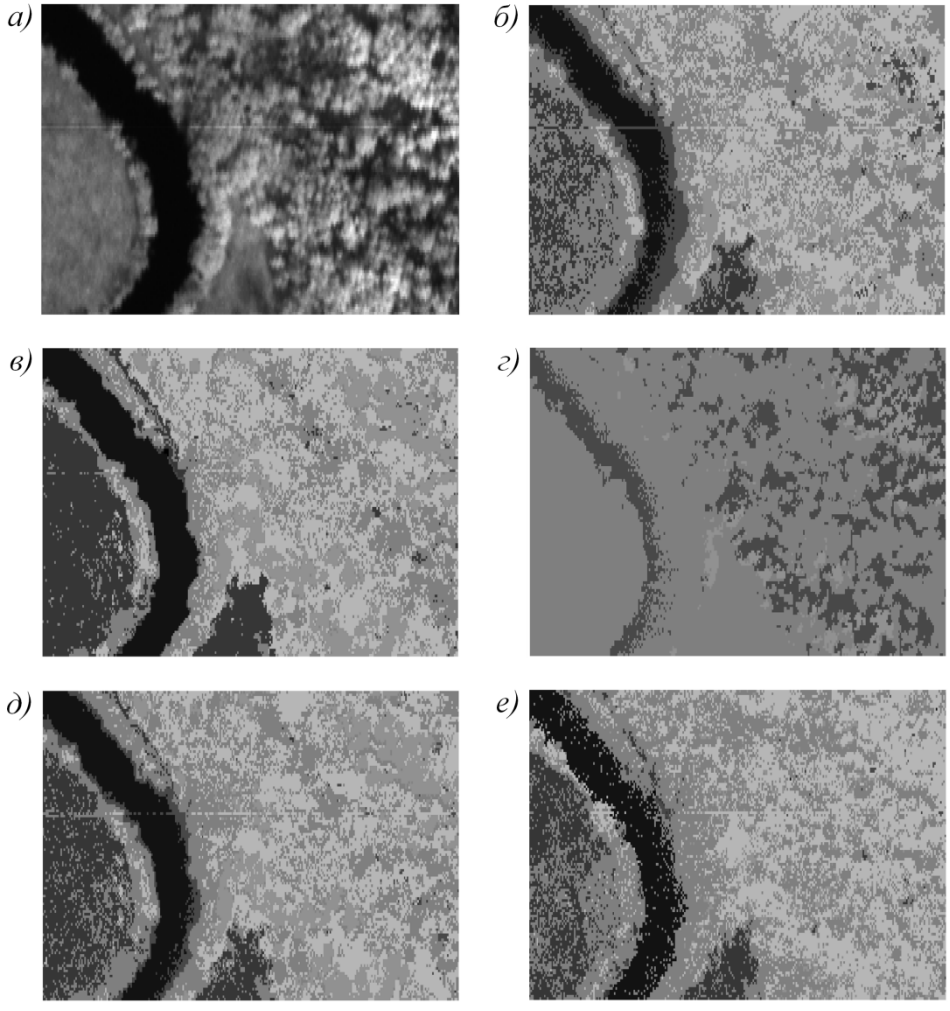


Рис. Результат классификации гиперспектрального изображения с помощью различных методов: *а* – изображение в спектральном канале ближнего инфракрасного диапазона; *б* – метрический классификатор (евклидово расстояние); *в* – МОВ с гауссовским ядром; *г* – МОВ с линейным ядром; *д* – БК на основе модели гауссовских смесей; *е* – линейный нормальный БК

Наибольшую схожесть имеют БК на основе нормального распределения и гауссовских смесей, МОВ с гауссовским и квадратичным ядром. Указанные методы также показывают наибольшую точность классификации. Результаты МОВ показывают лучшую точность классификации луговой растительности по сравнению с БК, однако при этом несколько меньшую точность при классификации породного состава древостоев. Также для МОВ имеются незначительные случаи ложной классификации асфальто-бетонного покрытия.

Линейный МОВ (рисунок, *г*) оказывается практически непригодным для решения задачи классификации и является наихудшим из рассмотренных методов. МК (рисунок, *б*) также приводит к существенным ошибкам и может быть использован только для классификации на «качественном» уровне. В отличие от линейного МОВ линейный БК показывает приемлемые результаты. Это происходит, в частности за счет введения ограничения на апостериорную вероятность. Тем не менее линейный БК дает значимо меньшую точность по сравнению с нелинейными модификациями МОВ и БК.

Таблица

Схожесть результатов классификации различными методами

	МК(евкл.)	БК(г.см.)	БК(лин.)	БК(норм.)	МОВ(лин.)	МОВ(кв.)	МОВ(г.)
МК(евкл.)	1	0,7	0,59	0,7	0,39	0,62	0,64
БК(г.см.)	0,7	1	0,6	0,92	0,34	0,74	0,76
БК(лин.)	0,59	0,6	1	0,61	0,38	0,56	0,55
БК(норм.)	0,7	0,92	0,61	1	0,35	0,75	0,76
МОВ(лин.)	0,39	0,34	0,38	0,35	1	0,31	0,28
МОВ(кв.)	0,62	0,74	0,56	0,75	0,31	1	0,85
МОВ(г.)	0,64	0,76	0,55	0,76	0,28	0,85	1

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты N 14-05-00598, 13-01-00185 и 14-07-00141).

Список литературы

1. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В. Методы обработки многоспектральных и гиперспеткральных аэрокосмических изображений: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2013. 224 с.

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

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 519.24

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА

Б. С. Добронец, О. А. Попова
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: BDobronets@sfu-kras.ru, OlgaArc@yandex.ru

Рассматривается численный вероятностный анализ как способ обработки и представления данных для построения процедур агрегации больших массивов данных. Для агрегации данных применяется гистограммный подход. На основе агрегированных данных для выявления зависимостей между входными и выходными характеристиками рассматриваются теоретические и практические аспекты обработки гистограммных временных рядов и регрессионного моделирования.

Ключевые слова: численный вероятностный анализ, гистограммные временные ряды, регрессионное моделирование, агрегация данных.

Введение

Одним из способов решения проблемы анализа данных больших объемов является применение разнообразных процедур предобработки данных. Например, *агрегирование* больших данных на группы по некоторым параметрам, что особенно эффективно, когда характеристики групп представляют больший интерес для аналитика. Суть процедуры агрегирования составляют процедуры, когда первоначальный набор данных сводится к наборам данных меньшего объема, сохраняя при этом имеющиеся в них информацию.

Суть процедуры агрегирования составляют методы, позволяющие первоначальный набор данных свести к наборам данных меньшего объема, сохраняя и обнаруживая при этом полезные знания в соответствии с возможностями используемых методов. Другими словами, агрегация представляет собой процедуру «сжатия» информации.

С другой стороны, агрегация может рассматриваться как процесс преобразования данных с высокой степенью детализации к более обобщенному их представлению за счет вычисления так называемых агрегатов – значений, получаемых в результате применения данного преобразования к некоторому набору фактов, связанных с определенным измерением.

Агрегирование информации по пространственному признаку с помощью гистограмм позволяет более точно представить измеренную информацию. Такая агрегация называется *распределенной* агрегацией [1; 3].

Второй способ агрегации называется «*временной»* и возникает, когда переменная наблюдается, например раз в секунду или в минуту [3], но должна быть проанализирована на более низкой частоте, скажем за день. В этом случае, использование средних значений или интервального анализа приводит к потере информации.

Эти две ситуации описывают распределенную и временную агрегации соответственно. В каждом из этих случаев представление данных в виде плотностей вероятности является более информативным представлением, чем другие способы.

Одним из эффективных инструментов для численных операций над гистограммами в настоящее время является Численный Вероятностный Анализ (ЧВА) [5]. Отличительной особенностью ЧВА является наличие развитых арифметических операций над гистограммными переменными, возможность вычисления функций от случайных аргументов – построение *вероятностных расширений*. В рамках ЧВА

решаются различные задачи численного анализа: решение систем линейных алгебраических уравнений и нелинейных уравнений со случайными коэффициентами, задачи интерполяции, аппроксимации и оптимизации. Важной особенностью ЧВА является возможность работы с эпистемическими неопределенностями (epistemic uncertainty) в данных, представленных гистограммами второго порядка [4].

Гистограммный подход к представлению временных рядов

Гистограммный временной ряд (ГВР) описывает ситуации, когда в течение каждого момента времени известны гистограммы, аппроксимирующие функции плотности исследуемого параметра. Важно отметить, что прогноз ГВР будет представлять собой аппроксимацию функции плотности вероятности изучаемого процесса.

Для построения численных процедур прогнозирования определим гистограммный временной ряд как последовательность плотностей вероятности представленных в виде гистограмм P_i. Для исследования гистограммных временных будем использовать численный вероятностный анализ [2].

Метод расщепления. Далее рассмотрим подход построения прогноза ГВР, основанного на расщеплении гистограммного ряда на подряды. Рассмотрим ГВР h_i, $i = 1,...,N$. Далее пусть каждая гистограмма определяется равномерной сеткой $\omega^i = \{z_i^j, j = 0,..,k\}$ и значениями $p_i^j, j = 1,..,k$. Рассмотрим вспомогательные временные ряды

$$z_i^0, z_i^k, p_i^j, j = 1,...,k, i = 1,...,N. \quad (1)$$

Для построения прогноза $\hat{h}_{N+1}$ будем использовать последние d значений рядов (1). Таким образом, используя один из методов построения прогноза, построим значения $\hat{z}_{N+1}^0, \hat{z}_{N+1}^k$, $\hat{p}_{N+1}^j$. Для гистограммы $\hat{h}_{N+1}$ определим равномерную сетку $\omega^{N+1} = \{\hat{z}_{N+1}^j, j = 0,..,k\}$ и положим на ней значения $\hat{p}_{N+1}^j$. Последним шагом в построении прогноза будет нормировка гистограммы $\hat{h}_{N+1}$

$$\hat{h}_{N+1}^{nor} := \frac{1}{\beta}\hat{h}_{N+1},$$

где

$$\beta = \int_{z_{N+1}^0}^{z_{N+1}^k} \hat{h}_{N+1}(\xi)d\xi.$$

Таким образом

$$\int_{z_{N+1}^0}^{z_{N+1}^k} \hat{h}_{N+1}^{nor}(\xi)d\xi = 1.$$

Численный пример. Рассмотрим исторические данные о максимальной температуре в г. Красноярске за последние сто лет. Сгруппируем данные по дням и построим соответствующие гистограммы.

Для проверки *метода расщепления* возьмем построенные гистограммы за 21–25 августа. Следуя методу расщепления построим 12 вспомогательных временных рядов. Для рядов $z_i^0 = 6^o, z_i^{10} = 35^o$, $i = 1,...,5$ в силу их стационарности прогноз тривиален. Далее для 10 вспомогательных рядов p_i^j, $j = 1,...,10$, $i = 1,...,5$, используя в качестве базового метод наименьших квадратов, построим прогноз $\hat{p}_9^j$ на 29 августа.

На рис. 1 приведено сравнение истинного значения и прогнозного на 29 августа. Как видно из сравнения, прогнозное значение достаточно хорошо совпало с истинным значением.

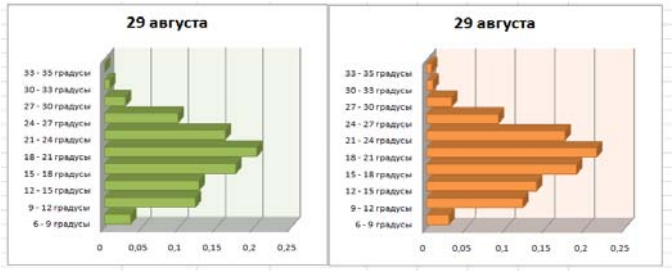


Рис. 1. Истинные и спрогнозированные значения

Гистограммная регрессия

Сформулируем задачу гистограммной регрессии следующим образом. Пусть входные данные $X=(x_1,...,x_n)$ и целевая переменная Y являются гистограммными переменными, для вектора $X=(x_1,...,x_n)$ известна совместная функция плотности вероятности $p(x_1,...,x_n)$.

Аналогично классической параметрической регрессии для каждой пары (X_i,Y_i) можно записать

$$Y_i = f(X_i,a)+\varepsilon_i, i=1,...,N,$$

или в случае линейной модели

$$Y_i = a_0+\sum_{j=1}^{n} a_j x_{ij}+\varepsilon_i, i=1,...,N.$$

Таким образом, для нахождения неизвестных параметров $a_0,a_1,...,a_n$ можно записать задачу оптимизации

$$\Phi(a)=\sum_{i=1}^{N}\rho(Y_i,a_0+\sum_{j=1}^{n}a_j x_{ji})^2\to\min, \quad (2)$$

где ρ – некоторая метрика в пространстве гистограмм. Заметим, что в силу нелинейности операции сложения гистограммных переменных для решения задачи (2) можно использовать, например метод наискорейшего спуска [6].

Для построения гистограммной регрессии будем использовать численный вероятностный анализ. Ниже рассмотрим основные аспекты для численного моделирования поставленной задачи. Для этого мы будем использовать арифметические операции и метрики в пространстве гистограмм, а также использовать численные процедуры для вычисления функциональных зависимостей гистограммной регрессии.

Численный пример. Ставится задача на агрегированных данных (таблица) построить линейную гистограммную регрессию, где зависимой переменной является Y = гематокрит и переменной предиктором является X = гемоглобин. Данные таблицы представляют N = 10 гистограммных переменных. Гистограммы представлены в виде списка пар $\{(In_i, p_i)\}$, где In – интервал, p – вероятность попадания случайной величины в интервал In. Заметим, что для Y_5 и Y_{10} списки гистограммных переменных содержат лишь одну пару (In, 1), что совпадает с интервальными переменными.

Таблица

n	*Y*	*X*
1	{[33,29, 37,52), 0,6| [37,52, 39,61], 0,4}	{[11,54, 12,19), 0,4| [12,19, 12,80], 0,6}
2	{[36,69, 39,11), 0,3| [39,11, 45,12], 0,7}	{[12,07, 13,32), 0,5| [13,32, 14,17], 0,5}
3	{[36,69, 42,64), 0,5| [42,64, 48,68], 0,5}	{[12,38, 14,20), 0,3| [14,20, 16,16], 0,7}
4	{[36,38, 40,87), 0,4| [40,87, 47,41], 0,6}	{[12,38, 14,26), 0,5| [14,26, 15,29], 0,5}
5	{[39,19, 50,86]}	{[13,58, 14,28), 0,3| [14,28, 16,24], 0,7}
6	{[39,70, 44,32), 0,4| [44,32, 47,24], 0,6}	{[13,81, 14,50), 0,4| [14,50, 15,20], 0,6}
7	{[41,56, 46,65), 0,6| [46,65, 48,81], 0,4}	{[14,34, 14,81), 0,5| [14,81, 15,55], 0,5}
8	{[38,40, 42,93), 0,7| [42,93, 45,22], 0,3}	{[13,27, 14,00), 0,6| [14,00, 14,60], 0,4}
9	{[28,83, 35,55), 0,5| [35,55, 41,98], 0,5}	{[9,92, 11,98), 0,4| [11,98, 13,80], 0,6}
10	{[44,48, 52,53]}	{[15,37, 15,78), 0,3| [15,78, 16,75], 0,7}

Рассмотрим линейную гистограммную регрессионную модель

$$Y = a_0 + a_1 X.$$

Для нахождения параметров регрессии a_0, a_1 решается задача оптимизации (2), где в качестве метрики ρ используется метрика ρ_M [7]. Были получены следующие оценки $a_0 = -1,44$, $a_1 = 3,12$. Если вместо гистограммных переменных, использовать их математические ожидания $M[X_i]$, $M[Y_i]$, то значения оценок параметров регрессии будут соответственно равны $a_0 = -2,12$, $a_1 = 3,16$.

Заключение

Использование ЧВА и гистограммного подхода для предобработки данных больших объемов на примере процедуры агрегирования данных способствует повышению достоверности в изучении природных явлений и процессов во времени и в пространстве на основе имеющихся данных. Разработанные на основе ЧВА процедуры и методы гистограммного представления, обработки и численного регрессионного моделирования позволяют снизить уровень неопределенности в информационных потоках, существенно сократить время обработки и выполнения численных процедур. Данный подход позволяет также в режиме визуально-интерактивного моделирования представить необходимые данные для оперативного принятия решений.

Список литературы

1. Добронец Б.С., Попова О.А. Гистограммный подход к представлению и обработке данных космического и наземного мониторинга // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 6 (155). С. 14–22.

2. Попова О.А. Гистограммный информационно-аналитический подход к представлению и прогнозированию временных рядов // Информатизация и связь. 2014. № 2. С. 43–47.

3. Хардле В**.** Прикладная непараметрическая регрессия: пер. с англ. М.: Мир, 1993. 349 с., ил.

4. Dobronets B.S., Popova O.A. Numerical probabilistic analysis under aleatory and epistemic uncertainty // Reliable Computing. 2014. Т. 19, № 3. Pp. 274–289.

5. Добронец Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных. Красноярск: СФУ, 2014. 167 с.

6. Popova O.A**.** Optimization problems with random data // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ., 2013. Т. 6, № 4. С. 506–515.

7. Попова О.А. Численный вероятностный анализ для агрегации, регрессионного моделирования и анализа данных // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 15–21.

УДК 621.039.546

О ВЫБОРЕ РАКУРСОВ ПРОЕКЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКТИВНОМ КОНТРОЛЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. П. Доморацкий, Т. Н. Байбикова
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Московский финансово-юридический университет (МФЮА)
e-mail: edomoratsky@hse.ru
e-mail: tbaibicova@hse.ru

CHOICE OF THE ASPECT ANGLES OF PROJECTED IMAGES DURING THE RECONSTRUCTIVE CONTROL OF THE SIZE AND FORM OF THREE DIMENSIONAL OBJECTS

E. P. Domoratsky, T. N. Baibikova
National Research University Higher School of Economics (HSE)
Moscow Finance and law University (MFUA)
e-mail: edomoratsky@hse.ru
e-mail: tbaibicova@hse.ru

Предложена методика и приведены результаты исследования взаимной пространственной ориентировки плоскостей проекционных изображений трехмерного объекта на точность и достоверность геометрических характеристик его реконструктивного контроля.

Ключевые слова: объект, средний диаметр объекта, фактор формы объекта, метод контроля, проекционное изображение, статистическая реконструкция, имитационное моделирование.

Введение

Контролируемый параметр (КП) объекта характеризуется набором признаков изображения, необходимых и достаточных для его адекватного (с заданной точностью и достоверностью) описания. В общем виде КП можно представить в виде функции:

$$КП = f\left(С_П, П_И, Б_Э, С_О, Р_И, К_И, С_Р, Т\right),$$

где $С_П$ – способ получения изображения; $П_И$ – параметры изображения; $Б_Э$ – базовые элементы изображения (признаки изображения при анализе); $С_О$ – способ определения базовых элементов изображения; $Р_И$ – ракурс изображения (проекции) относительно объекта (углы Эйлера α, β, γ); $К_И$ – количество изображений (проекций); $С_Р$ – способ реконструкции (восстановления) образа объекта по признакам изображений; $Т$ – время (длительность) определения КП [1].

В данной работе приведена методика исследования влияния взаимной пространственной ориентировки плоскостей проекционных изображений трехмерного объекта (ракурсов) на точность и достоверность геометрических характеристик его реконструктивного контроля. Исследование относится к трехмерным выпуклым объектам различной физической природы, форму которых можно аппроксимировать эллипсоидом общего вида. В качестве геометрических характеристик контроля объекта выбраны средний эквивалентный диаметр $Д = 2\sum_{i=1}^{3} A_i \big/ 3$ и фактор формы (коэффициент несферичности)

$$K = \max \{A_i\} / \min \{A_i\},$$

где A_1, A_2, A_3 – полуоси аппроксимирующего эллипсоида общего вида [2].

Цель данных исследований заключается в выборе оптимальной взаимной пространственной ориентировки (топологии) плоскостей проекционных изображений объекта для определения предельных точностных возможностей метода реконструктивного геометрического контроля и способов его аппаратной реализации.

Выбор оптимальной пространственной топологии проекционных изображений объекта осуществляется по критерию минимизации значений погрешностей контроля диаметра и фактора формы объекта с учетом их соответствующих доверительных вероятностей. Методика исследования основана на методе имитационного статистического моделирования [3].

Методика исследования

Задание пяти различных вариантов взаимного расположения плоскостей триады проекционных двумерных изображений объекта (ракурсов).

1) Три координатные оси в одной плоскости под углом 120° друг к другу.

2) Две координатные оси в одной плоскости под углом 90°, а третья ось – под углом 45° к этой плоскости.

3) Три координатные оси в одной плоскости под углами 90 и 135° друг к другу.

4) Две координатные оси в одной плоскости под углом 120°, а третья – ось под углом 45° к этой плоскости.

5) Взаимно-ортогональное расположение координатных осей.

Для каждого варианта топологии плоскостей проекционных изображений после определения начальных данных (диаметра $Д_0$ и фактора формы K_0 эталонного эллипсоида общего вида, значений погрешностей контроля $\Delta Д$ и ΔK и доверительных интервалов $2\Delta Д_И$, $2\Delta K_И$) по равномерному случайному закону задаются значения текущих ориентировок эталонного эллипсоида, по которым формируются массивы координат точек дискретных контуров триады двумерных изображений. После этого определяются базовые элементы (габаритные размеры) метода контроля, по которым вычисляются текущие значения пространственных характеристик $Д_i$ и K_i,. По полученным данным определяются значения абсолютных погрешностей контроля $\Delta Д_i = |Д_0 - Д_i|$, $\Delta K_i = |K_0 - K_i|$.

В результате N реализаций процесса статистического моделирования формируются два массива погрешностей {ΔД} и {ΔК}, каждый из которых содержит N значений. По полученным данным вычисляются средние и средне-квадратические погрешности метода контроля, а также соответствующие доверительные вероятности для заданных доверительных интервалов.

Исследования проводились при $Д_0$ = 25÷100 дискретов, $\Delta Д_i$ = 0,05÷0,5 дискрета, K_0 = 1,025÷1,3 отн. ед.; $\Delta K_И$ = 0,01÷0,35 отн. ед. и N = 1000. Результаты сравнительных исследований в виде зависимостей методических погрешностей контроля $\sigma_Д$, $\sigma_К$ и их доверительных вероятностей $P_Д$ и P_K от коэффициента несферичности для пяти вариантов топологии при $Д_0$ = 50 дискретов для контроля диаметра объекта приведены на рис. 1, а для контроля фактора формы объекта – на рис. 2. При этом номера графиков соответствуют вариантам неортогональной топологии ракурсов, а графики с ортогональной топологией ракурсов показаны пунктиром.

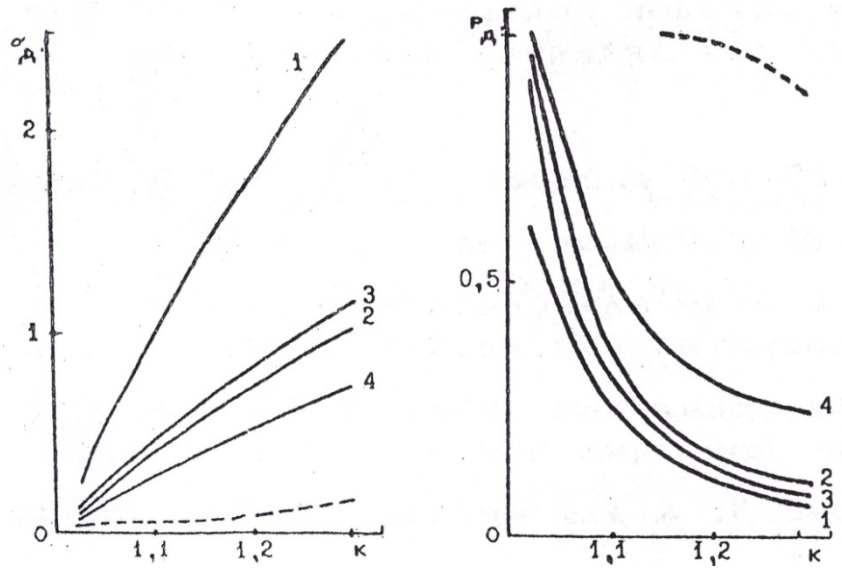


Рис. 1. Методические погрешности и их доверительные вероятности при контроле диаметра объекта

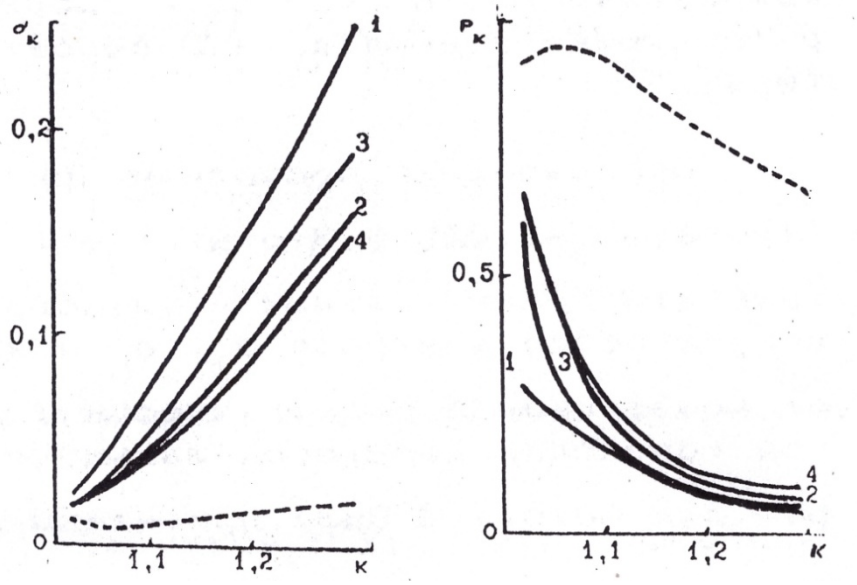


Рис. 2. Методические погрешности и их доверительные вероятности при контроле коэффициента несферичности объекта

Заключение

Из анализа полученных данных следует, что метод контроля геометрических характеристик объекта с реконструкцией по двумерным проекционным изображениям является весьма чувствительным к взаимной ориентировке плоскостей проекций, при этом худшими по точности и достоверности являются первый и третий варианты, имеющие координатные оси, расположенные в одной плоскости, в отличие от второго и четвертого вариантов, имеющих координатные оси, расположенные в разных плоскостях. Лучшим вариантом неортогональной топологии является четвертый вариант, однако он значительно уступает по точности и достоверности топологии с взаимно-ортогональным расположением триады проекционных изображений. Отсюда следует, что для обеспечения максимальной точности и достоверности дистанционного динамического дифференциального контроля размеров и формы выпуклых трехмерных

объектов, плоскости триады проекционных изображений, а следовательно, плоскости мишени позиционно-чувствительных видеодетекторов [4] и соответствующие оси источников оптического излучения [5] также следует располагать строго взаимно-ортогонально. При необходимости упрощения аппаратной реализации данного метода геометрического контроля возможно неортогональное расположение мишеней видеодетектров, учитывая при этом соответствующее ухудшение его качества.

Список литературы

1. Доморацкий Е.П., Байбикова Т.Н. О качестве цифровых изображений объектов // Вестник Московского финансово-юридического университета. 2014. № 2. С. 206–214.

2. Доморацкий Е.П., Крейндлин И.И., Мочалов А.Ю. Способ определения формы и размеров гранул. А.С. SU 1393054.

3. Исследование операций. Методологические основы и математические методы. Т. 1. Под. ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. М.: Изд-во «МИР», 1881. 712 с.

4. Доморацкий Е.П., Петросянц К.О. Телевизионный датчик импульсных микроизображений // Датчики и системы, 2014. № 4. С. 19–24.

5. Доморацкий Е.П. Система импульсной экспозиции микрообъектов // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 11. С. 45–49.

УДК 621.039.546

МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ДИСКРЕТНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Е. П. Доморацкий
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
e-mail: edomoratsky@hse.ru

METHOD FOR REMOTE CONTROL OF GEOMETRICAL FEATURES OF MOVING OBJECTS BASED ON THEIR DISCRETE IMPULSE IMAGES

E. P. Domoratsky
National Research University Higher School of Economics (HSE)
Financial University under the Government of the Russian Federation
e-mail: edomoratsky@hse.ru

Предложен метод дистанционного контроля геометрических характеристик, основанный на статистической реконструкции размеров и формы выпуклого объекта неправильной формы по базовым элементам контуров его импульсных оптико-электронных дискретных изображений. Приведены результаты исследования его точности и достоверности.

Ключевые слова: объект, метод контроля, геометрические характеристики, вычислительная томография, статистическая реконструкция, оптико-электронное дискретное изображение, имитационное моделирование.

Введение

Дистанционные измерения и контроль геометрических характеристик движущихся объектов являются общими, важными и актуальными при решении разнообразных народнохозяйственных и специальных задач, включая мониторинг территорий и атмосферных явлений, измерение областей и объектов при чрезвычайных ситуациях, экологию, производственный контроль изделий, информационную безопасность, техническую разведку и т. п. В общем случае решение указанных задач сводится к определению геометрических характеристик изображений многомерных физических электромагнитных полей различных спектральных диапазонов с помощью соответствующих информационно-измерительных систем.

Традиционные методы дистанционного контроля геометрических характеристик объектов (радиография, томография, интегрально-оптические методы, оптико-электронные методы) либо не обеспечивают объемных измерений, либо не позволяют контролировать движущиеся объекты, либо малопроизводительны и не обеспечивают режима *on-line*. Кроме того, некоторые из этих методов предназначены только для определения средних размеров объекта и не способны контролировать его форму, а также не обладают необходимыми точностью и достоверностью [1; 2].

Таким образом, современный метод геометрического контроля должен обладать следующей совокупностью характеристик и обеспечивать одновременно автоматический быстродействующий дистанционный (бесконтактный) динамический дифференциальный объемный прецизионный и достоверный контроль разнообразных микро- и макрообъектов различной физической природы в реальном масштабе времени.

В данной работе предложен соответствующий метод импульсной оптической вычислительной томографии, основанный на статистической стереологической реконструкции геометрических характеристик выпуклого двух или трехмерного

объекта неправильной формы по базовым элементам (признакам) контуров триады его импульсных дискретных двумерных проекционных изображений.

Принципы построения метода

В общем случае разработка проекционного (изображающего) метода предполагает решение следующих взаимосвязанных задач:

– определение пространственных геометрических характеристик для описания размеров и формы объекта;

– выбор оптимального вида первичной проекционной информации и ее базовых элементов, по которым вычисляются пространственные геометрические характеристики объекта;

– определение способов получения базовых элементов изображений;

– разработка функциональных зависимостей пространственных характеристик объекта от выбранных базовых элементов.

В предлагаемом методе в качестве оптимальных пространственных характеристик для описания размеров объекта выбраны его габаритные размеры и средний проектированный диаметр, а для описания формы объекта – коэффициент несферичности, определяемый отношением максимального габаритного размера объекта к минимальному.

Оптимальный вид первичной информации (изображений) определен на основе численной оценки их информативности с помощью метода имитационного статистического моделирования из шести альтернативных видов изображений, охватывающих основные известные методы геометрического проекционного контроля объектов [3]. При этом установлено, что оптимальным видом первичной информации (по критерию точности и достоверности контроля) является триада взаимно ортогональных двумерных проекционных изображений. В качестве базовых элементов выбраны их габаритные размеры.

Получение данной первичной информации с движущихся объектов осуществляется путем формирования и одновременной синхронной регистрации его импульсных проекционных изображений с помощью позиционно-чувствительных видеодетекторов с памятью, работающих в режиме раздельной записи и считывания информации. Получение импульсных оптико-электронных изображений (в инфракрасном и видимом диапазонах) возможно в проходящем, в отраженном свете или от светящегося объекта. При этом в первом случае необходимо использовать импульсный (лазерный) источник оптического излучения [4], а во втором и третьем – импульсный цифровой матричный видеодетектор [5]. Для сокращения информационной избыточности и повышения быстродействия контроля выполняется пространственное дифференцирование импульсных электронных изображений объекта, а для повышения качества этих изображений используется адаптивная пороговая дискриминация строчных сигналов видеодетектора [6; 7].

Габаритные размеры импульсных изображений определяются с помощью специального способа [8] путем измерения представительного набора линейных габаритных размеров каждого дискретного двумерного изображения объекта, получаемых при вращении вокруг его контура системы из двух параллельных касательных на общий угол 180°. Число габаритных размеров контура изображения определяется необходимыми точностью и достоверностью контроля, а также соотношением сигнал/шум. Полученный набор габаритных размеров используется для расчета пространственных геометрических характеристик объекта.

Время экспозиции мишени видеодетектора $T_Э$ определяется из условия отсутствия смазывания кадра изображения, получаемого с движущегося объекта $T_э \le R\cos\varphi/(v+0{,}5\omega D)K^*$, где R – разрешение видеодетектора по изображению; φ –

угол между траекторией движения объекта и плоскостью мишени видеодетектора; v – скорость движения центра массы объекта; ω – максимальная угловая скорость его вращения; D – диаметр объекта; K^* – масштаб изображения.

Численный анализ информативности проекционных изображений [3] показал, что обеспечить высокую точность и достоверность дифференциального геометрического контроля в широком диапазоне значения коэффициента несферичности при однократном съеме информации с триады проекционных изображений возможно только при использовании статистической стереологической реконструкции, которая основана на статистическом соответствии (представительности) размеров и формы объекта контроля и его проекционных базовых элементов. Однако такая реконструкция требует одновременного получения с объекта очень большого количества импульсных проекционных изображений (около 230 одномерных проекций или 50 триад взаимно-ортогональных двумерных проекций), что технически трудно осуществимо. Поэтому в основу предлагаемого метода контроля вместо статистической реконструкции собственно объекта контроля положена реконструкция размеров и формы его ближайшей известной аппроксимации (модели), в качестве которой при контроле эквивалентного диаметра объекта выбрана сфера, а при контроле коэффициента несферичности – эллипсоид общего вида [9]. Эти принципы обеспечивают контроль геометрических характеристик выпуклого объекта неправильной формы с высокими точностью и достоверностью по базовым элементам контуров только одной триады импульсных взаимноортогональных двумерных дискретных проекционных изображений. Параметры аппроксимирующего эллипсоида общего вида определяются из соотношений:

$$\begin{cases} A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = \sum\limits_{i=1}^{3} m_i; \\ A_1^2 A_2^2 + A_1^3 A_3^2 + A_2^2 A_3^2 = \sum\limits_{i=1}^{3} c_i; \\ A_1^2 A_2^2 A_3^2 = \sum\limits_{i=1}^{3} m_i c_i - 2m_1 m_2 m_3 \left\{ 1 - \left[\prod\limits_{i=1}^{3} \left[1 - \left(m_i c_i / m_1 m_2 m_3 \right) \right] \right] \right\}^{1/2}, \end{cases}$$

где A_1, A_2, A_3 – полуоси аппроксимирующего эллипсоида;

$m_i = \dfrac{\sum\limits_{j=1}^{3} \left(l_{1j}^2 + l_{2j}^2 \right)}{8} - \dfrac{l_{1i}^2 + l_{2i}^2}{4}$; $c_i = \dfrac{l_{1i}^2 + l_{2i}^2}{16}$; $l_{1j} = \dfrac{l_{макс,j}}{K^*}$, $l_{2j} = \dfrac{l_{мин,j}}{K^*}$; K^* – масштаб изображения; $l_{макс,j}$, $l_{мин,j}$ – максимальный и минимальный линейные размеры j-ого изображения; i, j – номер проекционного изображения. Пространственные геометрические характеристики объекта определяются следующим образом.

Средний диаметр $D = 2\sum\limits_{i=1}^{3} A_i / 3$; коэффициент несферичности $K = \max\{A_i\} / \min\{A_i\}$.

Принцип работы предложенного метода геометрического контроля при использовании оптико-электронной (телевизионной) системы получения проекционных изображений объекта в проходящем свете показан на рисунке.

Оценка метрологических характеристик метода

Для численной оценки точности, достоверности и быстродействия разработанного метода контроля проведены статистические исследования, основанные на методе имитационного моделирования.

Анализ результатов исследования показал, что относительная погрешность контроля диаметра объекта составляет около 0,25 % (при P_D = 0,7 и K = 1,3 отн. ед.), а диапазон относительной погрешности контроля фактора формы объекта составляет от 2,3 % (при P_K = 0,7 и K = 1,3 отн. ед.) до 0,6 % (при P_K = 0,96 и K = 1,05 отн. ед.).

При этом общее время контроля геометрических характеристик (определяемое на моделирующей ЭВМ) составило: для двумерного объекта около 5 мс, а для трехмерного объекта около 10 мс.

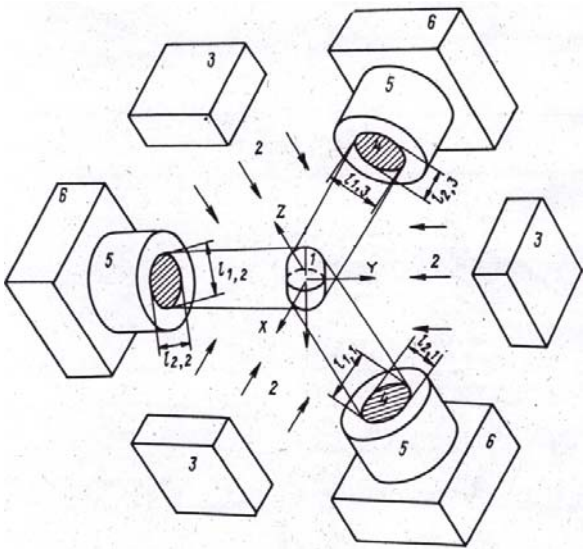


Рис. Динамический дистанционный контроль размеров и формы объекта: 1 – объект контроля; 2 – пучок оптического излучения; 3 – импульсный источник света; 4 – проекционное изображение объекта; 5 – изображающая оптика; 6 – позиционно-чувствительный видеодетектор

Заключение

Предлагаемый в настоящей работе метод геометрического контроля обладает новой совокупностью характеристик точности, достоверности и быстродействия. Он был успешно применен в атомной промышленности для высокопроизводительного производственного телевизионного контроля по размерам и форме элементов ядерного топлива и может быть использован в различных областях науки и техники при дистанционном измерении и контроле движущихся выпуклых объектов неправильной формы различной физической природы в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Беляев С.П., Никифоров Н.К., Смирнов В.В. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1983. 385 с.

2. Доморацкий Е.П., Байбикова Т.Н. О качестве цифровых изображений объектов // Вестник Московского финансово-юридического университета. 2014. № 2. С. 206–214.

3. Доморацкий Е.П. Методика оценки информативности геометрических характеристик проекционных изображений микрообъектов // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 2. С. 42–45.

4. Доморацкий Е.П. Система импульсной экспозиции микрообъектов // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 11. С. 45–49.

5. Доморацкий Е.П., Петросянц К.О. Телевизионный датчик импульсных микроизображений // Датчики и системы. 2014. № 4. С. 19–24.

6. Доморацкий Е.П., Петросянц К.О. Устройство регистрации импульсного изображения. Пат. на изобретение № 2551895.

7. Доморацкий Е.П. Адаптивный дискриминатор видеосигналов // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 5. С. 47–50.

8. Доморацкий Е.П., Байбикова Т.Н. Способ автоматического анализа геометрических характеристик дискретных телевизионных изображений. ФПТМ-2014: Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 125–129.

9. Доморацкий Е.П., Крейндлин И.И., Мочалов А.Ю. Способ определения формы и размеров гранул. А.С. SU 1393054.

УДК 631.6:556.1:528.8

ОЦЕНКА ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЗЗ, ГИС И СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ИНДЕКСА ОСАДКОВ

Е. А. Дунаева, В. Ф. Попович
Государственное бюджетное учреждение Республики Крым «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», г. Симферополь, Крым
e-mail: water_crimea@hotmail.com
e-mail: water@crimea.com

WATER AVAILABILITY EVALUATION OF RURAL AREAS WITH REMOTE SENSING, GIS AND STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX

Ie. Dunaieva, V. Popovych
The State budget institution of Republic Crimea "Research Institute for Agriculture of Crimea", Simferopol, Crimea
e-mail: water_crimea@hotmail.com
e-mail: water@crimea.com

В статье рассмотрен ряд показателей оценки водообеспченности территории с указанием данных, необходимых для расчета, а также особенности их применения. Приведены примеры применения индексов обеспеченности территории степной части Крымского полуострова водными ресурсами, основанные на использовании данных спутниковых снимков среднего разрешения (MOD13Q1 и L8 OLI / TIRS) и данных статистической обработки метеорологических параметров – индекса SPI.

Ключевые слова: водообеспченность, Крым, NDDI, NDVI, SPI.

Оценка водообеспеченности территории является важной характеристикой для формирования политики в области водного хозяйства и разработки принципов рационального использования водных ресурсов региона.

Обеспеченность территории поверхностными водными ресурсами в количественном отношении выражается средним модулем речного стока, а также характеристиками его варьирования. Оценка водообеспеченности каждой территории должна учитывать как местные водные ресурсы (формирующиеся в ее пределах), так и дополнительные ресурсы, поступающие на территорию данного субъекта из соседних регионов. Однако водообеспеченность территории определяется не только режимом имеющихся водных ресурсов, но и суммарной водопотребностью отраслей экономики и требованиями потребителей воды, т. е. водохозяйственным балансом.

В таблице приведены показатели (коэффициенты, индексы, критерии), которые дают возможность получать оценки водообеспеченности территории разного уровня детализации, как в пространственном, так и временном плане – от уровня поля и суточного интервала до региона и временных трендов в несколько лет. Вместе с тем, для получения ряда индексов необходимо наличие дополнительной информации (например данных о влажности почвы), что создает существенные трудности для их использования на территориях, где этих данных не достаточно или они отсутствуют.

Наличие измеренных или расчетных данных оценки параметров потенциального суммарного и актуального суммарного испарения является очень полезным, так как позволяет совместно с данными эксплуатационных водохозяйственных организаций и/или данных ДЗЗ получать сравнительные оценки текущего уровня использования

водных ресурсов и возможного уровня повышения их эффективности. Часть из приведенных в таблице критериев водообеспеченности или уровня засушливости сельскохозяйственной территории может быть определена по данным аналитической обработки данных наземных наблюдений с визуализацией пространственного распределения с использованием ГИС, часть требует применения данных ДЗЗ и/или использования агрогидрологического моделирования и мониторинговых данных водохозяйственных организаций.

Таблица

Сравнительная характеристика показателей водообеспеченности территории

Наименование индикатора	Метео данные			Гидрологические – речной сток	Водохозяйственные – водоподача и др.	Агро-гидроло-гические		Данные ДЗЗ	Данные по сельхозкультурам	Особенности применения
	температура	осадки	Ea, Eп и др.			НВ	влажность почвы			
Коэфф. увлажнения Высоцкого-Иванова	+	+	+							региональный уровень; месяц, год
Стандартизированный индекс осадков SPI		+								интервал расчетов 1…36 месяцев
Относительный дефицит воды	+		+					+	+	региональный и локальный уровень; вегетационный
Индекс аномальной аридности	+		+			+				локальный уровень; вегетационный
Индекс почвенных влагозапасов	+	+	+			+	+		+	локальный уровень; гидрологич. цикл
Нормализованный вегетационный индекс NDVI								+		мониторинг состояния вегетационного покрова и засушливости
Усовершенствованный вегетационный индекс EVI								+		глобальный уровень, по данным наблюдений MODIS
Индекс вегетационной засухи VegDRI		+						+		объединение возмож-ностей SPI и NDVI
Нормализованный водный индекс NDWI								+		необходимы данные SWIR
Индекс доступности водных ресурсов				+	+					территор.-бассейнов. уровень; годовой
Индекс эксплуатации водных ресурсов				+	+					бассейновый; годовой
Коэфф. уровня использования воды на поле	+	+	+		+				+	уровень поля; оросительный период
Уровень водопотреб-ления с/х культуры	+	+	+		+			+	+	уровень поля; оросительный период
Продуктивность использования воды			+		+			+	+	уровень поля; оросительный период

Из проанализированных индексов наиболее подходящим в текущих организационно-хозяйственных условиях Крыма является использование 2 индексов, взаимно дополняющих друг друга, хотя использующих абсолютно различную информацию: NDDI и SPI. Пример использования этих индексов приведен ниже.

Индекс засухи NDDI рассчитывается на основе нормализованного дифференциального вегетационного индекса NDVI и дифференциального водного индекса NDWI [1]. При этом NDVI является одним из базовых косвенных показателей, который характеризует уровень развития биомассы растительного покрова и с его использованием осуществляется достаточно много программ мониторинга состояния земной поверхности.

Расчет индекса NDDI для территории хозяйства ООО «Дружба народов» (Красногвардейский район) проведен с предварительным определением NDVI и NDWI с задействованием открытых программных продуктов (QGIS, MapWindow) на базе снимка L8 OLI / TIRS спутника Landsat 8 (рис. 1). Обработанные данные индекса засухи NDDI показывают изменение водообеспеченности территории в сторону ее уменьшения за счет перехода на использование ресурсов местного стока (в 2013 г. – 0,03, в 2014 г. – 0,33. Большие значения NDDI показывают нарастание засушливых условий). При этом уровень расхождения во временных оценках может быть вызван не только резким снижением доступности водных ресурсов для орошения (отсутствие водоподачи по системе Северо-Крымского канала), но и существенной разницей лет в обеспеченности осадками.

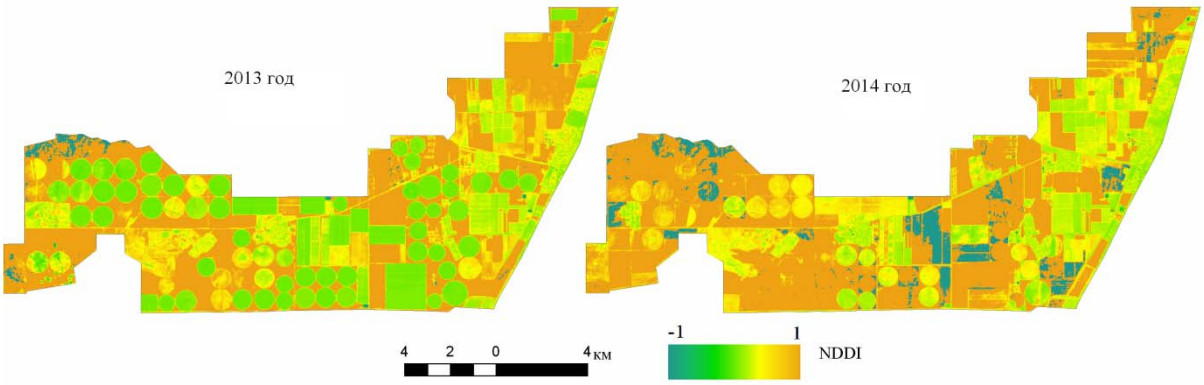


Рис. 1. Картирование индекса NDDI, рассчитанного на базе снимка L8 OLI/TIRS (август 2013–2014)

Совместный анализ динамики NDDI и вариации стандартизированного индекса осадков (SPI) для территории позволяет учесть вариацию осадков при оценке водообеспченности территории. SPI был разработан для определения количественных показателей дефицита осадков с использованием месячных данных осадков с временными интервалами от 1 до 48 месяцев (наиболее распространены 1, 3, 6, 12, 24-х месячные интервалы) [2]. Расчет SPI базируется на многолетних данных наблюдений за осадками (не менее 30 лет). Несмотря на то, что Всемирная метеорологическая организация рекомендовала использование SPI для мониторинга засухи во всех странах, в его применении есть целый ряд особенностей, учет которых, даст возможность более адекватно применять его на практике с учетом локальных особенностей варьирования климатических параметров.

На рис. 2 представлена вариация нормализированных отклонений осадков для метеостанции Клепинино (Красногвардейский район) за период 2005–2014 гг. с расчетными интервалами 2, 3, 6, 12 месяцев, позволяющая оценить влияние различной

продолжительности расчетных интервалов на динамику трендов и продолжительность периодов засушливых или переувлажненных условий.

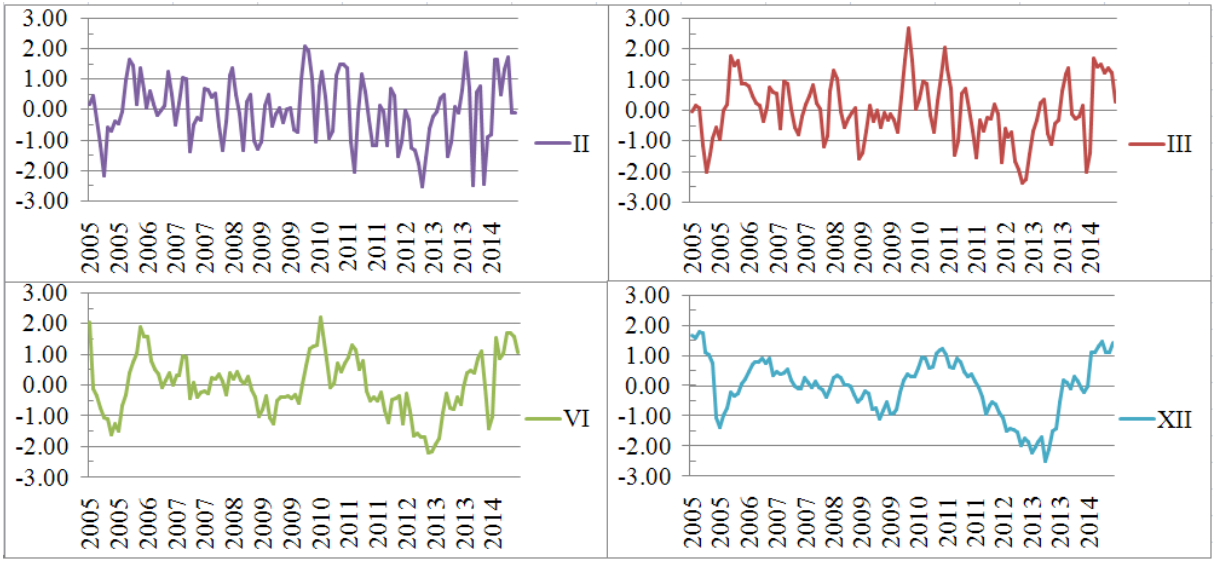


Рис. 2. Сравнение динамики водообеспеченности (засушливости “+” и переувлажненности “–”)

Динамика трендов, представленных на рис. 2, характерна для территории юга Украины и РФ с переходом тенденций вариации от метеорологической засухи (анализ с использованием 1, 2 и 3-х месячных периодов) к сельскохозяйственной (2–3-х месячные тренды) и гидрологической/водохозяйственной (3, 6 и более месяцев). Учитывая, что значения индекса SPI, характеризующие водообеспеченность второй половины 2014 г. выше соответствующих значений 2013 г., вывод, сделанный по результатам анализа данных рис. 1 о существенном увеличении засушливости территории, является адекватным.

Выводы. Использование процедур обработки данных ДЗЗ в комплексе с SPI создает дополнительные возможности получения актуальной информации о состоянии, временной и пространственной динамике физических процессов на уровне «растение – почва», и может быть одним из эффективных инструментов мониторинга происходящих процессов, позволяющим получать комплексные оценки водообеспеченности территории.

Список литературы

1. 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.

2. Popovych V. Monitoring and Evaluation of Water Availability of the South of Ukraine and Russian Federation with Usage of the Standardized Precipitation Index / Victor Popovych, Ielizaveta Dunaieva // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 3, Issue 9, September, 2014. P. 24–27. ISSN: 2278-0181.

УДК 004.9

РАСШИРЕНИЕ СТАНДАРТА WPS ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА СТОРОНЕ КЛИЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕБ-СЕРВИСОВ

Э. Э. Казаков, Е. Г. Капралов, Е. А. Паниди, А. В. Терехов
Санкт-Петербургский государственный университет
Институт наук о Земле
e-mail: e.kazakov@spbu.ru

Ключевая парадигма современных Веб-ГИС – это сервер-сторонняя обработка данных на основе клиент/серверной или облачной архитектуры, поддерживаемая еще и рядом стандартов, в числе которых наиболее ярким представляется OGC WPS. Однако сервер-сторонняя обработка данных ДЗЗ не всегда приемлема, в связи с чем предлагается концепция гибридных Веб-сервисов геообработки, которые, по мнению авторов, должны стать средством, позволяющим сочетать преимущества сервер-сторонней и клиент-сторонней геообработки.

Ключевые слова: Веб-сервис, Веб-сервисы геообработки, клиент-сторонняя геообработка, Гибридные Веб-Сервисы Геообработки, OGC WPS.

Введение

Веб-технологии поиска, представления и обработки данных являются одними из наиболее быстро развивающихся геоинформационных технологий в последние годы. По мере совершенствования аппаратной базы и сетевой инфраструктуры совершенствуются возможности хранения и передачи значительных объёмов пространственных данных, что особенно актуально при использовании материалов дистанционного зондирования. А совершенствование программных Веб-технологий, в том числе развитие парадигмы Web 2.0, концепции SaaS, и появление стандарта HTML 5 становится основой для создания Веб-систем способных не только отображать данные в Веб, но и предоставлять пользователям инструменты для обработки и анализа геопространственных данных непосредственно в Веб-интерфейсе, в окне браузера. Развитие подобных методик является одним из актуальных трендов в данный момент.

Важным этапом развития технологий обработки геопространственных данных в Веб стала публикация в 2007 году открытого международного стандарта Open geospatial Consortium Web Processing Service [1]. Данный стандарт формализовал порядок внедрения средств обработки геопространственных данных при Веб-публикации. Стандарт регламентирует порядок взаимодействия «запрос»-«ответ» между сервером и клиентами при осуществлении доступа к средствам обработки данных через Веб-интерфейс.

Однако значимой особенностью как стандарта WPS, так и проприетарных экосистем (таких как ESRI ArcGIS Online), позволяющих создавать и публиковать в Веб-инструменты обработки данных, является их ориентированность на сервер-стороннюю обработку данных. Программные средства, предусматривающие возможность децентрализованной обработки на стороне клиента или в формате грид-вычислений, разрабатываются лишь в рамках отдельных исследовательских проектов [2] или упоминаются как перспективная концепция [3].

Вместе с тем в ряде ситуаций использование сервер-сторонних вычислений при обработке данных может оказаться неоправданным или затруднительным. Например, если пользователь обрабатывает данные, не подлежащие распространению, которые не могут быть переданы на сторонний сервер. В этой и других ситуациях [4] возможным решением является передача исполняемого кода с сервера на клиент вместо передачи

сырых данных для обработки на сервер. В данном случае задача сводится к тому, чтобы обеспечить мобильность исполняемого кода, то есть пригодность программных компонент к использованию на стороне клиента без инсталляции, а также к предоставлению пользователю средств для запуска такого кода при выполнении вычислений.

Более того, для обеспечения максимальной гибкости в выборе схемы обработки данных и максимального удобства пользователя разумно обеспечить возможность запуска обработки данных на серверной или клиентской стороне по выбору пользователя. При этом, безусловно, следует обеспечить единство кода, то есть возможность использования на сервере и на клиенте одного и того же вычислительного ядра, что позволит получать идентичный результат обработки независимо от того, на какой стороне производятся вычисления.

Промышленные средства разработки и технологии запуска исполняемого кода на клиенте существуют и широко используются. Основным препятствием для разработки программных средств для обработки геопространственных данных, способных запрашиваться через Веб-интерфейс и запускаться по выбору на серверной либо клиентской стороне, является отсутствие общепринятых подходов и стандартов. Представленная работа посвящена попытке разработать дополнение для единственного международного стандарта, регламентирующего порядок внедрения Веб-сервисов геобработки OGC WPS такое, чтобы перейти к парадигме гибридных Веб-сервисов [4], то есть предоставляющих возможность обработки пользовательских данных как на удаленном сервере, так и на клиентской стороне.

Расширение стандарта OGC WPS

Стандарт WPS предусматривает три типа клиентских запросов, которые должны выполняться последовательно один за другим:

1) getCapabilities request;
2) describeProcess request;
3) execute request.

Первый запрос позволяет клиенту получить метаданные сервера, в том числе список и описания всех доступных сервисов геообработки, второй позволяет получить XML файл с детальным описанием одного или нескольких процессов. Этот файл содержит такие параметры как количество и формат входных и выходных данных для каждого процесса, и третий запрос позволяет передать на сервер все необходимые параметры и наборы данных, получив в ответ результаты вычислений. Наша идея заключается в том, чтобы ввести четвёртый тип запроса, названный нами getProcess request [5]. Данный запрос должен формироваться с использованием результатов выполнения getCapabilities request и describeProcess request. По такому запросу сервер должен возвращать описание всех необходимых для исполнения выбранного процесса в настольной среде пользователя программных компонент, а также генерировать ссылки для их загрузки (рис. 1).

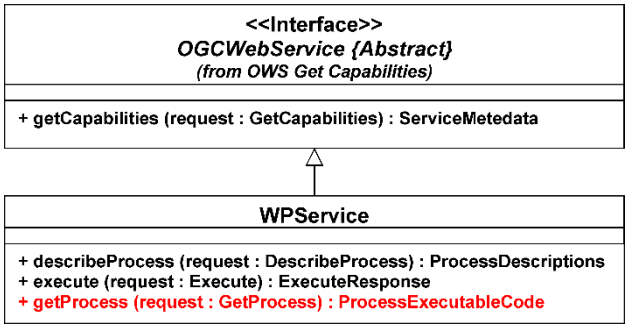


Рис. 1. Расширенная диаграмма интерфейсов WPS

В связи с тем, что привычная клиент-серверная парадигма в том виде, как это подразумевает текущая версия стандарта WPS, дополняется новым методом, возникает необходимость несколько пересмотреть структуру организации данных на серверной стороне.

Базовое описание каждого процесса необходимо дополнить двумя сущностями:

1) флагом, указывающим доступность настольной версии алгоритма для конкретной платформы;

2) списком необходимых модулей и приложений, необходимых для загрузки в настольную среду, чтобы исполнять алгоритмы там offline.

Кроме того, для описания самих программных компонент, предназначенных для загрузки, предлагается ввести два новых понятия: функциональные модули (fModules) и дополнительные приложения (extraApps). Под функциональными модулями понимаются отдельные файлы, являющиеся контейнерами для исполняемого кода, в которых в явном виде описываются некоторые функции, реализующие те или иные алгоритмы. Это могут быть сценарии Python, файлы DLL, байт-код Java и т. д., в зависимости от того, какие клиентские операционные системы и среды исполнения поддерживает сервис. Дополнительные приложения – это активные программные компоненты, которые могут быть запущены на исполнение непосредственно, реализующие ту или иную функциональность.

В качестве extraApps могут быть использованы любые скомпилированные программы для обработки данных, способные запускаться в операционной системе клиента после загрузки. Хорошими примерами таких программ являются открытые ГИС SAGA, GRASS и подобные.

Поставка extraApps на клиентский компьютер должна осуществляться, во-первых, в минимальной комплектации (только ядро), и, во-вторых, в portable-сборке. Программные компоненты, не входящие в ядро, должны поставляться как функциональные модули (fModules).

Таким образом, каждый процесс, поддерживающий настольную реализацию, связан с неограниченным количеством функциональных модулей, в которых заложены собственно алгоритмы обработки. Каждый такой модуль должен иметь уникальное имя, воплощение в файле конкретного типа, описание, таблицу совместимости с различными ОС, а также перечень дополнительных приложений, ресурсы которого этот модуль использует (например, запускает модуль io_gdal из командной строки SAGA).

В процессе получения данных от сервера на клиенте формируется зеркальная структура, но только для загруженных процессов и их зависимостей (рис. 2).

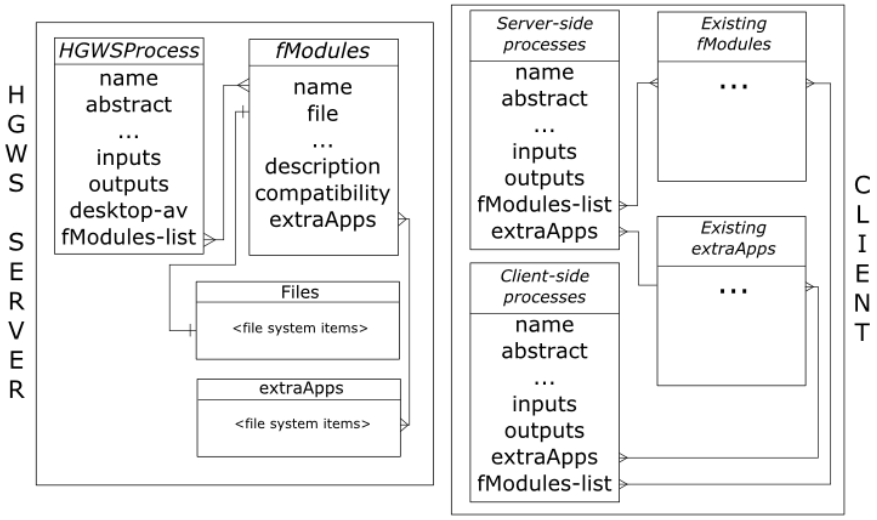


Рис. 2. ER-карта компонентов сервиса

Для загрузки и запуска файлов, содержащих исполняемый код процесса геообработки на клиентском компьютере, должен быть запущен программный клиент, играющий роль среды исполнения процессов геообработки на стороне клиента.

В результате пользовательский запрос может выглядеть следующим образом:

http://some.host/server?
Request=getProcess&
Service=HGWS&
Version=x.0.0&
Platform=Win32
Identifier=index-NDVI

А принципиальная схема работы с таким сервисом включает следующие шаги:

1) выбор сервера через клиентское приложение и подключение к нему;
2) выбор требуемого алгоритма обработки при его доступности для платформы;
3) отправка запроса getProcess и получение ссылок на все необходимые компоненты. Клиентское приложение загружает те, что не были загружены ранее и генерирует интерфейс алгоритма по данным запроса describeProcess.

Заключение

В процессе прототипирования подобного гибридного сервиса были сформулированы основные положения и оценена перспективность использования таких технологий [6]. Несмотря на ряд проблем, выполненные разработки показывают принципиальную возможность создания сравнительно простой схемы запуска исполняемого кода Веб-сервисов геообработки по выбору на серверной или клиентской стороне.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-12079 офи_м.

Список литературы

1. Schut P. (ed.) OpenGIS Web Processing Service. OpenGIS Standard. OGC 05-007r7. Version 1.0.0, 2007-06-08. 2007.

2. Coene Y., Marchetti P.G., Smolders S. Architecture and Standards for a Distributed Digital Library of Geospatial Services // Third Italian Research Conference on Digital Library Systems (IRCDL 2007). Padova, 29–30 January, 2007. Proceedings. 2007. Pp. 52–60.

3. Keens S. (ed.) Discussions, findings, and use of WPS in OWS-4. OGC Discussion Paper. OGC 06-182r1. Version 0.9.1, 2007-05-10. 2007.

4. Паниди Е.А. Геосервисы для онлайн-обработки данных дистанционного зондирования. // Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные: материалы молодёжной школы-семинара (г. Барнаул, 2–6 октября 2013 г.). Барнаул: Азбука, 2013. С. 74–81.

5. Panidi E. Towards Client-Side Web Processing Services // FOSS4G-Europe 2014 Proceedings. 2014. Pp. 1–4. Online publication, URL: http://europe.foss4g.org/2014/content/toward-client-side-web-processing-services.html

6. Kazakov E., Terekhov A., Kapralov E., Panidi E. WPS-based technology for client-side remote sensing data processing // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-7/W3. P. 643–649.

УДК 528.8.04, 528.852

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С РОССИЙСКИХ КА

Е. С. Карпенко, В. Н. Лобзенёв, И. Г. Логванёв
ООО «Центр инновационных технологий»
e-mail: contact@novacenter.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой технологий автоматической обработки материалов с российских КА типа «Канопус-В» и «Ресурс-П» с целью формирования непрерывных маршрутов съемки и создания наборов конечных продуктов надлежащего качества, готовых к поставке потребителям для решения прикладных тематических задач.

Ключевые слова: российские космические аппараты, линейное разрешение на местности, повышение качества космических снимков, технологии автоматической обработки изображений.

Введение

В настоящее время активно развиваются и используются космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с установленными съемочными системами нового поколения, которые позволяют получать снимки в глобальном масштабе с высоким пространственным и спектральным разрешением.

В июле 2012 г. были выведены на орбиту одной ракетой-носителем однотипные КА «Канопус-В» и «БКА», предназначенные для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, картографирования территории, мониторинга сельскохозяйственной деятельности. В июле 2013 г. и декабре 2014 г. были запущены два КА типа «Ресурс-П» с установленной следующей целевой аппаратурой: оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) высокого разрешения «Геотон-Л1», гиперспектральной аппаратурой (ГСА), комплексом широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры (КШМСА) высокого и среднего разрешения.

Появление новых КА требует совершенствования и создания новых программно-аппаратных средств для обработки материалов ДЗЗ и извлечения скрытой полезной информации из непрерывно растущего объема пространственных данных. Для предоставления пользователям качественных снимков в рамках ПК ИМС (разработка ООО «Центр инновационных технологий») были реализованы технологии первичной и дополнительной обработки получаемых материалов космической съемки, учитывающие особенности КА.

Входные данные

Входными данными для обработки являются материалы 1 (первого) уровня обработки – изображения по отдельным каналам с/без радиометрической и геометрической коррекцией, без ортотрансформирования, не цветосинтезированные (для КА типа «Канопус-В» – микрокадры (МК); для КА типа «Ресурс-П» (ОЭА ВР «Геотон-Л1») – сшитые полосы изображений, полученных различными матрицами ПЗС) в формате TIF с коэффициентами RPC-полиномов в формате XML.

Следует отметить особенности входных данных. Во-первых, различаются по яркости кадры (полосы), получаемые как с разных матриц, так и с одной и той же (в результате изменения режима в течение съемки маршрута), что требует применения инновационных алгоритмов радиометрической коррекции. Во-вторых, сопроводительный файл с RPC-коэффициентами содержит данные, не позволяющие достаточно точно произвести географическую привязку материалов, поэтому

необходимо проводить уточнение привязки по опорным точкам с использованием цифровой модели рельефа.

Технология обработки материалов с КА типа «Канопус-В»

Разработанная технология позволяет производить обработку как всего маршрута съемки КА типа «Канопус-В», так и отдельных условных кадров на заданную площадь.

Технология обработки, реализованная в рамках ПК ИМС и представленная на рисунке, полностью автоматизирована и включает перечисленные ниже этапы.

1. Ортотрансформирование отдельных МК-ров с учетом RPC-коэффициентов и цифровой модели рельефа в проекцию UTM на референцэллипсоиде WGS-84.

Перед запуском автоматической обработки может проводиться уточнение привязки маршрута путем вычисления погрешности привязки по нескольким МК-рам. Для обработки используется рельеф GMTED 2010 (250 м) в формате IMG. Дополнительно могут быть заданы координаты опорных точек для уточнения привязки.

2. Сшивка МК по отдельным каналам на маршрут съемки (или условный кадр).

На данном этапе производится коррекция яркости МК с помощью инновационного алгоритма радиометрической коррекции. В результате выполнения данного этапа формируется пять файлов (панхроматический и четыре спектральных канала) в формате IMG.

3. Устранение смещения между каналами путем привязки четырех спектральных каналов к панхроматическому. В результате выполнения данного этапа формируется пять файлов (панхроматический и четыре скорректированных спектральных канала) в формате IMG.

4. Формирование цветосинтезированного изображения из отдельных спектральных каналов. Результатом является файл в формате IMG, содержащий четыре спектральных канала.

5. Повышение детальности панхроматического изображения на 10–12 %. Данный этап не является обязательным.

6. Формирование комплексированного изображения в естественных цветах с разрешением панхроматического изображения. Результатом является RGB-изображение в естественных цветах в формате IMG.

В результате обработки формируются следующие информационные продукты:

– панхроматический снимок в формате IMG (с проекцией пиксела 2 м);

– мультиспектральный снимок (цветосинтезированное изображение, содержащее четыре спектральных канала) в формате IMG (с проекцией пиксела 10 м);

– комплексированное изображение (изображение в естественных цветах улучшенного разрешения, содержащее три канала RGB) в формате IMG (с проекцией пиксела 2 м).

Дополнительно в автоматическом режиме формируется паспорт в формате XML, а также маска маршрута в векторном формате SHP.

После обработки оператор может оценить качество снимков, а при необходимости уточнить привязку и провести дополнительную обработку полученных материалов.

Технология обработки материалов с КА типа «Ресурс-П»

Технология обработки материалов с КА типа «Ресурс-П» сверхвысокого разрешения (ОЭА ВР «Геотон-Л1») с целью получения стандартного набора выходных продуктов аналогична описанной выше и включает следующие этапы:

1) проведение радиометрической коррекции входных данных, устранение дефектов, обусловленных особенностями съемочной аппаратуры (неравномерной чувствительностью элементов);

2) ортотрансформирование снимков с учетом RPC-коэффициентов и цифровой модели рельефа в проекцию UTM на референцэллипсоиде WGS-84;

3) совмещение спектральных каналов с точностью не хуже 0,5 пиксела;

4) формирование изображения в естественных цветах;

5) повышение детальности снимков на 10–20 %.

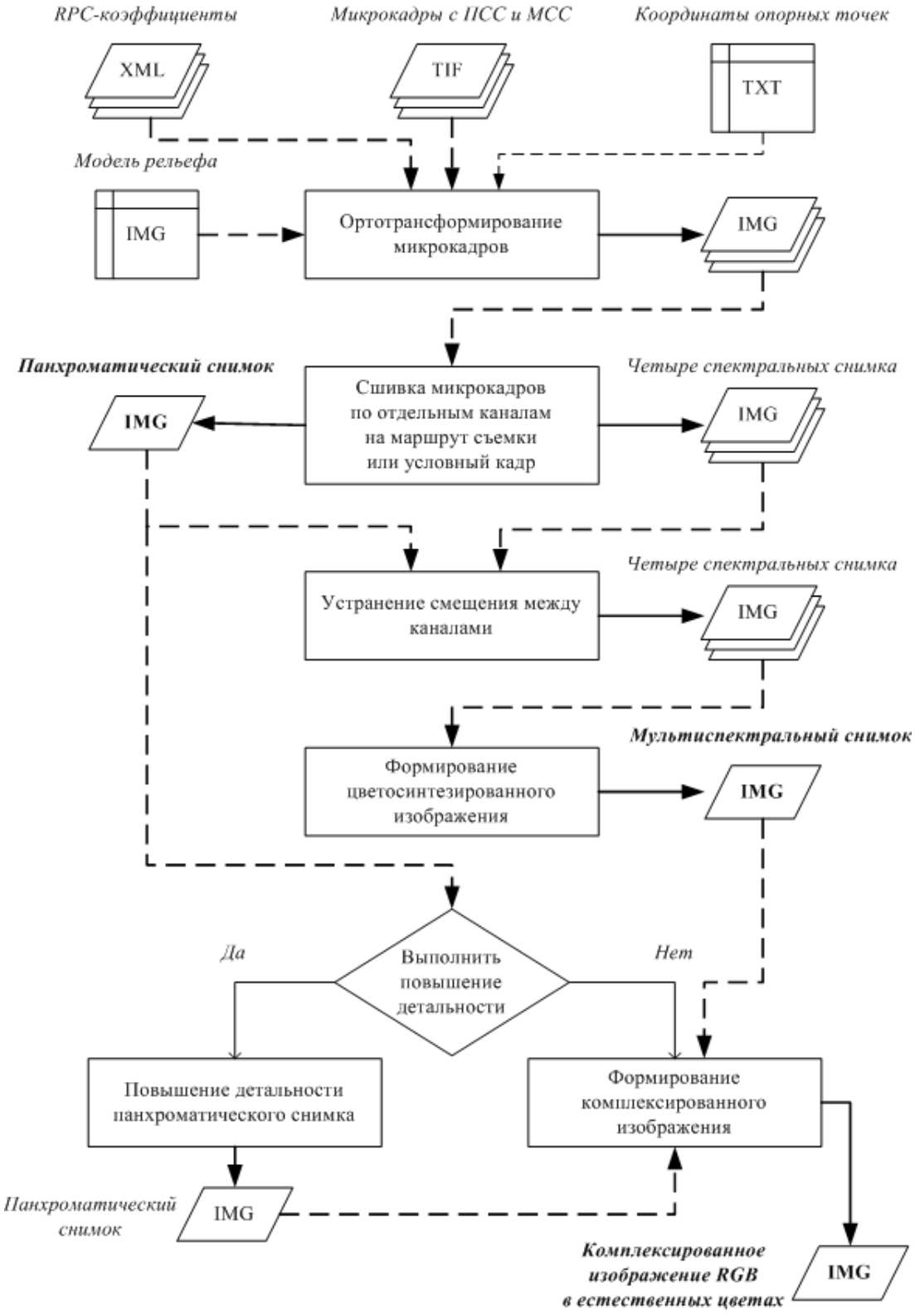


Рис. Схема формирования маршрутов из микрокадров с ПСС и МСС КА «БКА» и «Канопус-В»

На данном этапе осуществляется повышение линейного разрешения, являющегося одним из основных параметров качества снимков и определяющего дешифрируемость и информативность получаемых изображений. Проекция пиксела снимка определяется в основном размером светочувствительной ячейки матрицы/ линейки ПЗС и зачастую является основным показателем качества материалов. Существующий подход к оцениванию пространственного разрешения на местности основывается на геометрической проекции пиксела на Земле, но на снимке можно обнаружить объекты существенно меньшие по размеру, если их контраст достаточно велик по сравнению с окружающим фоном. Таким образом, проекция пиксела не является объективной оценкой дешифрирования объектов.

Оценка качества материалов, прошедших дополнительную обработку в среде ПК ІМС, показывает, что обработанные материалы с КА «Ресурс-П» обладают улучшенными дешифровочными свойствами за счет получения в результате обработки более четких границ. Использование материалов повышенного качества позволяет осуществлять картографирование наземных объектов с более высокой точностью при формировании карт, в том числе масштаба 1:10000.

Анализ геометрических и радиометрических характеристик показывает высокое качество выходных продуктов ОЭА «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», не уступающее зарубежным аналогам, в частности: линейное разрешение на местности составляет 1,0 м и лучше в панхроматическом диапазоне; отношение сигнал/шум материалов составляет порядка 25 Дб, что соответствует материалам с КА WorldView-2; точность географической привязки составляет порядка 10 м (при использовании опорных точек).

Снимки КА «Ресурс-П» обладают большим потенциалом для дальнейшей обработки и повышения качества выходной продукции, а также проведения тематической обработки.

Заключение

Разработанные технологии позволяют формировать изображения маршрутов съемки и проводить их дополнительную обработку. Процесс обработки материалов с российских космических аппаратов в рамках ПК ІМС полностью автоматизирован. В результате обработки автоматически формируется полный набор выходных продуктов, по качеству соответствующий мировым аналогам: панхроматический снимок, мультиспектральный снимок, комплексированное изображение, файлы метаданных, векторная граница. Оценка качества выходных продуктов позволяет сделать заключение о том, что при решении определенного типа тематических задач возможно использование материалов с российских КА вместо аналогичных, получаемых с иностранных КА.

УДК 551.5

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ CO_2

М. Ю. Катаев, А. К. Лукьянов
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
e-mail: kataev.m@sibmail.com

MODIFIFCATION OF THE EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTIONS METHOD TO SOLVE THE INVERSE PROBLEM OF THE CO_2 TOTAL CONTENT RETRIEVING

M. Yu. Kataev, A. K. Lukyanov
Tomsk state University of control systems and Radioelectronics

Приводится описание модификации метода эмпирических ортогональных функций для решения обратной задачи (восстановление общего содержания CO_2) обработки реальных данных спутникового прибора (Фурье-спектрометра среднего разрешения) GOSA.

Ключевые слова: спутниковые данные, метод эмпирических ортогональных функций.

Традиционно для решения обратных задач атмосферной оптики применяются параметрические подходы, когда измеренный сигнал (см. (1)) сравнивается с моделью физического процесса:

$$y_{obs} = f(p,b) + \xi, \quad (1)$$

где $f(p,b)$ – соответствующая модель физического процесса (уравнение переноса излучения в атмосфере); p – искомый параметр (в нашем случае обще содержание CO_2); b – мешающие параметры (например, оптические толщи водяного пара и аэрозоля); ξ – ошибки измерения; y_{obs} – полученные измерения.

Решение параметрическим методом зависит от многих составляющих, которые определяют физическую модель, знание априорной информации и различного рода погрешности. Эти составляющие определяют точность решения. Сложностью решения является тот аспект, что в случае сильных изменений сигнала по величине, изменения вектора b, решение может также сильно меняться при больших размерностях (сотни или тысячи точек) измеряемого сигнала, время нахождения решения сильно возрастает. Эти обстоятельства побудили нас исследовать возможности другого подхода, который относится к классу непараметрических, а именно метод эмпирических ортогональных функций.

Для непараметрических подходов характерно сравнение измеренных сигналов Y и решения (общего содержания CO_2). Важным преимуществом непараметрических подходов является то, что при их использовании не нужно использовать модель переноса излучения. Использование лишь статистических или иных характеристик взаимосвязи измеренных сигналов и общего содержания CO_2 позволяют построить алгоритм решения обратной задачи.

Принцип метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) широко представлен в литературе, в основном для анализа рядов наблюдений, сжатия информации, выявления закономерностей проявления физических процессов во времени и пространстве [1–5]. При решении обратных задач этот подход практически не используется.

Метод эмпирических ортогональных функций основан на методе главных компонент (МГК), сутью которого является представление измерений в ортонормированном пространстве векторов матрицы ковариации измерений. К преимуществам метода стоит отнести возможность учета большого объёма априорной информации. Недостатками метода является большая зависимость от качества и объема предоставленной априорной информации для обучения.

Алгоритм решения обратной задачи восстановления общего содержания CO_2 на основе ЭОФ связан с набором типичных математических операций.

1. Вычисление ковариационной функции R

$$R = \Delta Y (\Delta Y)^T, \ \Delta Y = (Y - < Y >), \tag{2}$$

где Y – измеренный (или модельный) сигнал из N точек; $< Y >$ – среднее значение сигнала.

2. Разложение в ряд по собственным векторам и значениям

$$R = U \Lambda U^T, \tag{3}$$

здесь U – матрица собственных векторов и Λ – собственные значения.

3. На основе элементов (2) и (3) можно построить эмпирические ортогональные функции (ЭОФ)

$$E = U \Delta Y . \tag{4}$$

4. Определение искомого параметра. В предположении линейной зависимости искомой величины, от измеренных сигналов, можно получить выражение:

$$P = < P > + AE, \tag{5}$$

где вектор A является искомым.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (5) позволяет найти коэффициенты A и тем самым построить алгоритм для обработки данных измерений, который мы назвали базовым.

Нами была выполнена модификация данного подхода за счет добавления априорной информации в ковариационную матрицу (2). Известно, что при спутниковом зондировании атмосферы необходимо знать положение Солнца относительно пятна наблюдения. Область атмосферы над пятном наблюдения зависит от рельефа и типов поверхности, содержания аэрозольной составляющей и распределения влажности воздуха. Учет этих компонент в матрице измерений Y позволил нам избежать смещения решения и получить более точное решение. Все выполняемые нами действия, связанные с решением обратной задачи, были воплощены в программный комплекс.

Особенностью непараметрических подходов решения обратных задач является разделение на два этапа: 1) обучение и 2) обработка. На этапе обучения нами были использованы разнообразные наборы данных (модельные и реальные). Модельные спутниковые сигналы рассчитываются нами на основе программы, написанной нами [6]. Программа позволяет рассчитывать спутниковый сигнал для любой точки поверхности Земли и времени в течение года (это время циклов изменения концентрации CO_2, CH_4 и других атмосферных газов). Далее выбиралась точка на поверхности земли, для которой проводились расчеты спутниковых сигналов для нескольких лет, с шагом 6 часов (1460 сигналов в год и каждый сигнал 8000 спектральных точек в диапазоне второго канала). Часть сигналов из общей выборки формирует обучающую выборку (60 %), другая часть тестовую (40 %), согласно правилу, представленному в [7]. Соотношение между обучающей и тестовой выборкой

может быть изменено в зависимости от точности обучения на первом шаге. Если заданная точность 0,1 % не достигнута, обучающая выборка увеличивается и т. д., пока не будет достигнута заданная точность. Есть ограничение на соотношение между обучающей и тестовой выборкой, которое выражается в условии, где тестовая выборка не может быть менее 10 % от общей. Реальные сигналы для общей выборки для того же времени и географической точки, уровня L1B, нами были получены на сайте [www.gosat.nies.go.jp].

Для расчета спутниковых сигналов нами использовалась модельная информация об общем содержании CO_2 в атмосфере, а также реальные данные GOSAT, уровня L2, полученные при обработке измеренных значений. Сигналы и данные общего содержания являются основой для обучения, при котором формируются коэффициенты обратной задачи A и E.

Таким образом, процесс обучения связан с расчетами по формулам (2)–(5), а процесс обработки в использовании формулы (5), где матрица E связана с измеренным сигналом. После того как обработаны сигналы и получены значения общего содержания CO_2, эти значения сравниваются с известными значениями, которые были известны априори при получении модельных сигналов или получены для того же времени, географического места независимым прибором.

Точность восстановления зависит от количества собственных векторов корреляционной матрицы, которые были взяты для нахождения коэффициентов модели.

Список литературы

1. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Известия АН СССР. Сер. Геофиз. 1960. № 3. С. 432–439.

2. Естественные составляющие метеорологических полей / А.В. Мещерская, Л.В. Руховец, М.И. Юдин, Н.И. Яковлева. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. С. 199.

3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей / под ред. С.А.Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.

4. Фортус М. И. Эмпирические ортогональные функции случайного временного ряда, заданного на конечном отрезке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 1. С. 64–70.

5. Чувашина И.Е. Применение аппарата разложения в двойные ряды по э. о. ф. координат и времени для исследования временной структуры полей средних суточных температур // Труды ГГО. 1976. Вып. 367. С. 81–86.

6. Kataev M.Yu., Lukianov A.K. Information-processing software for satellite signal modeling in global scale // International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems (ENVIROMIS-2010), 5–11 July 2010, Tomsk, Russia. Tomsk, 2010.

7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

УДК 551.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ CO_2 НАД ТЕРРИТОРИЕЙ США МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

М. Ю. Катаев, А. К. Лукьянов
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
e-mail: kataev.m@sibmail.com

THE RESULTS OF MONITORING CO_2 TOTAL CONTENT ON THE UNITED STATES TERRITORY BY THE METHOD OF EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTIONS

M. Yu. Kataev, A. K. Lukyanov
Tomsk state University of control systems and Radioelectronics

Приводятся результаты обработки реальных (восстановление общего содержания CO_2) данных спутникового прибора (Фурье-спектрометра среднего разрешения) GOSAT для территории США методом эмпирических ортогональных функций.

Ключевые слова: спутниковые данные, метод эмпирических ортогональных функций.

Точность определения газового состава атмосферы по данным спутниковых измерений обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешность измерений прибора, абсолютная и спектральная калибровка, погрешности телеметрии, особенности алгоритма интерпретации, исходная спектроскопическая и априорная информация. Практическое использование данных о состоянии атмосферы возможно после тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности, пространственного и временного разрешения на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных.

Для целей проверки возможности применения метода эмпирических ортогональных функций [1; 2] при обработке реальных сигналов нами были использованы данные измерений международной сети станций TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [http://www.tccon.caltech.edu]. На этих станциях проводится измерение общего содержания CO_2 и CH_4 и других атмосферных параметров. При этом общее содержание CO_2 и CH_4 проводится прибором (Фурье-спектрометр среднего разрешения), по своим возможностям близкому к прибору, который установлен на спутнике.

Для подготовки выборки данных нами были выбраны три станции на территории США: Lamont (36.604 с. ш., 97.486 з. д.), Four Corners (36.797 с. ш, 108.48 з. д.) и Park Falls (45.945 с. ш., 90.273 з. д.). Данные измерений станций в течение практически каждого дня (исключение составляют облачные дни, когда измерения не выполняются) были получены для 2013 г. Спутниковые измерения были собраны за этот же промежуток времени из области размером 5x5 градусов с центром в точке стояния станций. Всего было получено 5785 сигналов. Далее нами было выполнено согласование данных измерений GOSAT с данными измерений на станциях по времени.

Каждый сигнал GOSAT представляет собой набор спектральных точек, получаемых Фурье-спектрометром в четырех каналах (около 20 тысяч точек), записанных в формате HDF. Нами выбирались данные второго канала в спектральной области 1,6 мкм (около 8000 точек), из которых для обработки отбирались данные (1800 точек), в которых расположены полосы поглощения углекислого газа (см. рис. 1). Далее все оставшиеся спектральные точки сигналов за весь временной промежуток

времени проходили оценку на вариабельность. Для дальнейшей работы были оставлены наиболее изменчивые по величине спектральные точки сигнала, которых осталось всего 780.

Для проверки работоспособности алгоритма ЭОФ нами выполнялось обучение и обработка данных GOSAT для выборки в течение 2013 г. Выборка пар (сигнал спутника-значение CO_2 станции TCCON) делилась на две части: обучающую (60 %) и тестовую (40 %). Расчёты проводились с помощью модифицированного метода ЭОФ. Отличие модифицированного подхода от стандартного заключается в учёте априорной информации (зенитный угол Солнца, общее содержание H_2O, оптическая толща аэрозоля, характеристики рельефа) при расчете ковариационной матрицы. В методе ЭОФ ковариационная матрица является основой построения алгоритма.

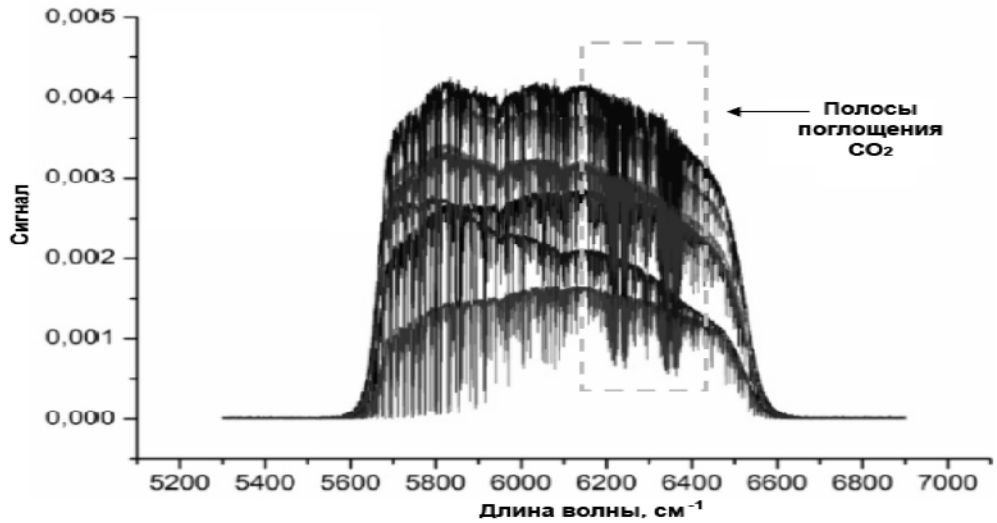


Рис. 1. Реально измеренные спектры отраженного солнечного излучения

После обучения метода [1; 2] и решения обратной задачи стандартным подходом ЭОФ для тестовой выборки сигналов спутника результаты восстановленного общего содержания CO_2 сравнивались со значениями для станции Park Falls, которые показаны на рис. 2.

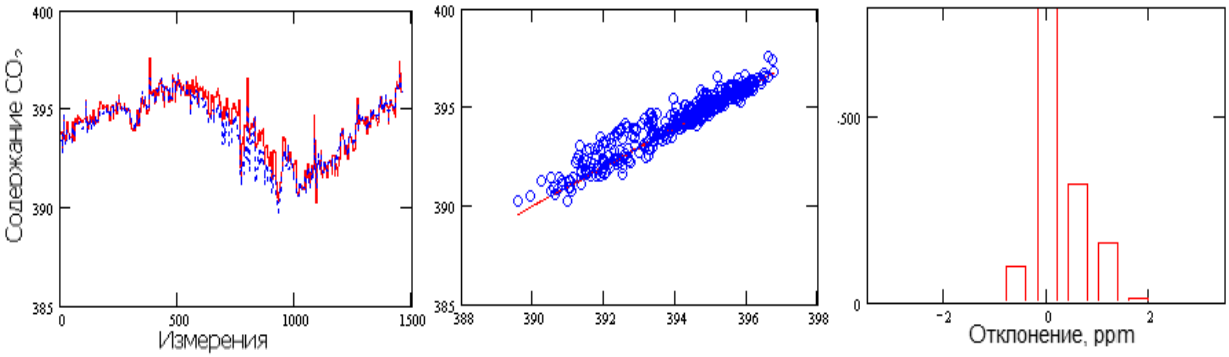


Рис. 2. Результаты сравнения обработки измерений GOSAT методом ЭОФ для точки рядом со станцией Park Falls

Такая же процедура выполнялась для точки примерно в середине между тремя станциями (42,37 с. ш. 98,87 з. д.), результат показан на рис. 3. Значения содержания CO_2 в этой точке, необходимые для сравнения, брались из продукта L2 GOSAT.

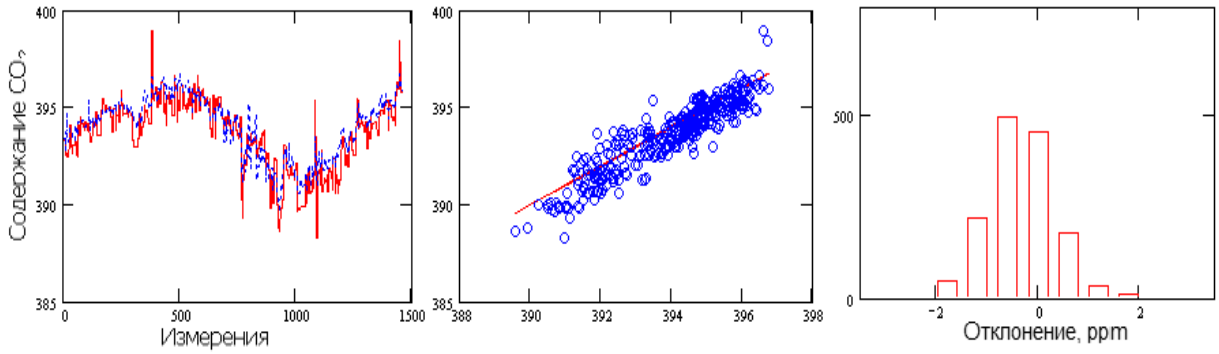


Рис. 3. Результаты сравнения обработки измерений GOSAT методом ЭОФ модифицированным подходом (в матрице измерений добавлена априорная информация)

Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренный метод эмпирических ортогональных функций обработки данных измерений может быть применен к получению достоверной информации о пространственно-временном поведении углекислого газа на больших территориях.

Список литературы

1. Непараметрические математические методы восстановления общего содержания CO2 из данных спутникового мониторинга / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, А.Г. Андреев, С.А. Базелюк, А.К. Лукьянов // Доклады ТУСУР. 2011. Т. 2(24), Ч. 3. С. 181–186.

2. Математические алгоритмы обработки и анализа данных спутникового Фурье-спектрометра в ближней ИК-области спектра / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, Ш. Максютов, А.Г. Андреев, С.А. Базелюк, А.К. Лукьянов // Изв. вузов. Физика. 2012. № 3. С. 84–90.

УДК 551.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ CH_4 НАД ТЕРРИТОРИЕЙ США МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

М. Ю. Катаев, А. К. Лукьянов
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
e-mail: kataev.m@sibmail.com

THE RESULTS OF MONITORING CH_4 TOTAL CONTENT ON THE UNITED STATES TERRITORY BY THE METHOD OF EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTIONS

M. Yu. Kataev, A. K. Lukyanov
Tomsk state University of control systems and Radioelectronics

Приводятся результаты обработки реальных (восстановление общего содержания CH_4) данных спутникового прибора (Фурье-спектрометра среднего разрешения) GOSAT для территории США методом эмпирических ортогональных функций.

Ключевые слова: спутниковые данные, метод эмпирических ортогональных функций.

Точность определения газового состава атмосферы по данным спутниковых измерений обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешности измерений прибора, абсолютной и спектральной калибровки, погрешностями телеметрии, особенностями алгоритма интерпретации, исходной спектроскопической и априорной информации. Практическое использование данных о состоянии атмосферы возможно после тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности, пространственного и временного разрешения на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных.

Для целей проверки возможности применения метода эмпирических ортогональных функций [1; 2] при обработке реальных сигналов нами были использованы данные измерений международной сети станций TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [http://www.tccon.caltech.edu]. На этих станциях проводится измерение общего содержания CO_2 и CH_4 и других атмосферных параметров. При этом общее содержание CO_2 и CH_4 проводится прибором (Фурье-спектрометр среднего разрешения), по своим возможностям близкому к прибору, который установлен на спутнике.

Для подготовки выборки данных, нами была выбраны три станции на территории США: Lamont (36,604 с. ш., 97,486 з. д.), Four Corners (36,797 с. ш, 108,48 з. д.) и Park Falls (45,945 с. ш., 90,273 з. д.). Данные измерений станций в течение практически каждого дня (исключение составляют облачные дни, когда измерения не выполняются) были получены для 2012 г. Спутниковые измерения были собраны за этот же промежуток времени из области размером 5x5 градусов с центром в точке стояния станций. Всего было получено 1460 сигналов. Далее нами было выполнено согласование данных измерений GOSAT с данными измерений на станциях по времени.

Каждый сигнал GOSAT представляет собой набор спектральных точек, получаемых Фурье-спектрометром в четырех каналах (около 20 тысяч точек), записанных в формате HDF. Нами выбирались данные второго канала в спектральной области 1,6 мкм (около 8000 точек), из которых для обработки отбирались данные (430 точек), в которых расположены полосы поглощения метана. Далее все оставшиеся

спектральные точки сигналов за весь временной промежуток времени проходили проверку на содержание линий поглощения других газов. Для дальнейшей работы были оставлены те линии, которые содержали слабые линии поглощения других газов, их осталось всего 130.

Для проверки работоспособности алгоритма ЭОФ нами выполнялось обучение и обработка данных GOSAT для выборки в течение 2012 г. Выборка пар (сигнал спутника-значение CH_4 станции TCCON) делилась на две части: обучающую (60 %) и тестовую (40 %). Расчёты проводились с помощью модифицированного метода ЭОФ. Отличие модифицированного подхода от стандартного заключается в учёте априорной информации (зенитный угол Солнца, общее содержание H_2O, оптическая толща аэрозоля, характеристики рельефа) при расчете ковариационной матрицы. В методе ЭОФ ковариационная матрица является основой построения алгоритма.

После обучения метода [1; 2] и решения обратной задачи модифицированным подходом ЭОФ для тестовой выборки сигналов спутника результаты восстановленного общего содержания CH_4 сравнивались со значениями для станции Lamont, которые показаны на рис. 1–3.

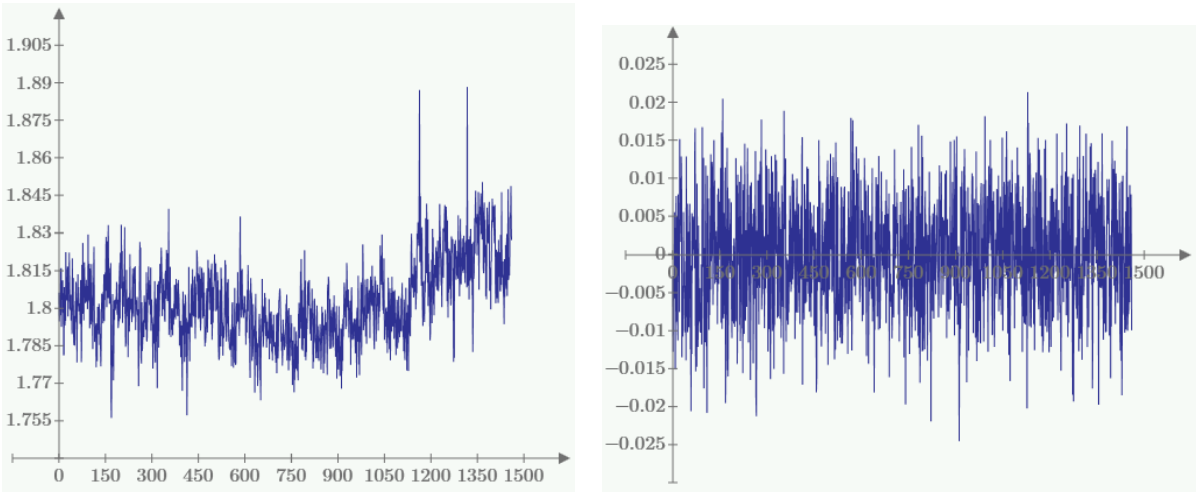


Рис. 1. Сравнение общего содержания CH_4 по данным TCCON Lamont и рассчитанного за 2012 год: слева рассчитанное содержание в ppb, справа разность рассчитанного содержания и данных TCCON Lamont в ppb

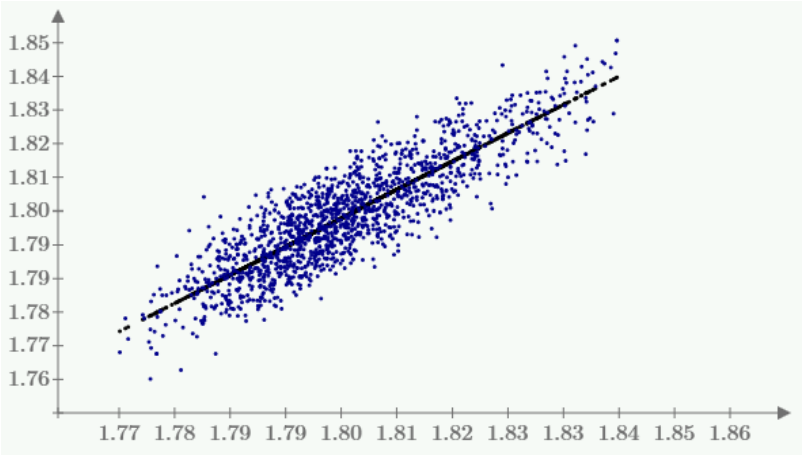


Рис. 2. Отклонение рассчитанного общего содержания CH_4 от значений по данным TCCON Lamont в 2012 г.

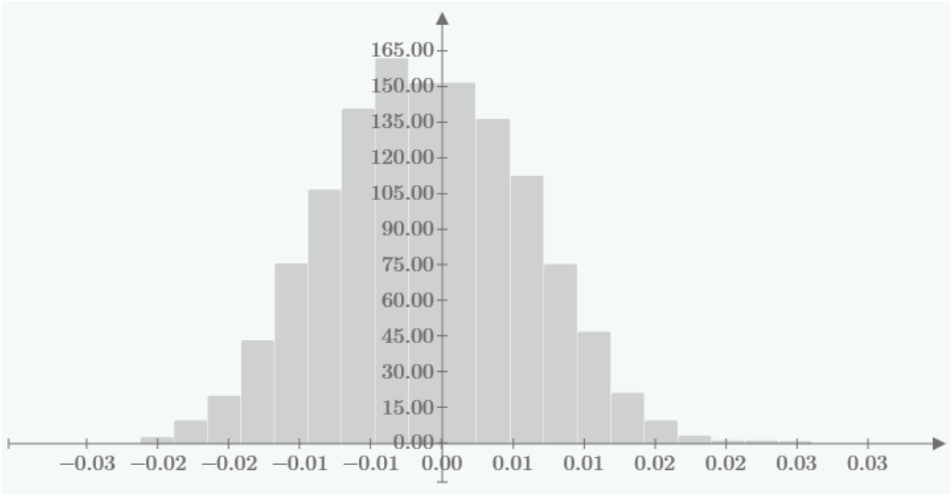


Рис. 3. Отклонение рассчитанного общего содержания CH_4 от значений по данным TCCON Lamont в 2012 г.

Такая же процедура выполнялась для точки примерно в середине между тремя станциями (42,37 с. ш. 98,87 з. д.), результат показан на рис. 4–6. Значения содержания CH_4 в этой точке, необходимые для сравнения, брались из продукта L2 GOSAT.

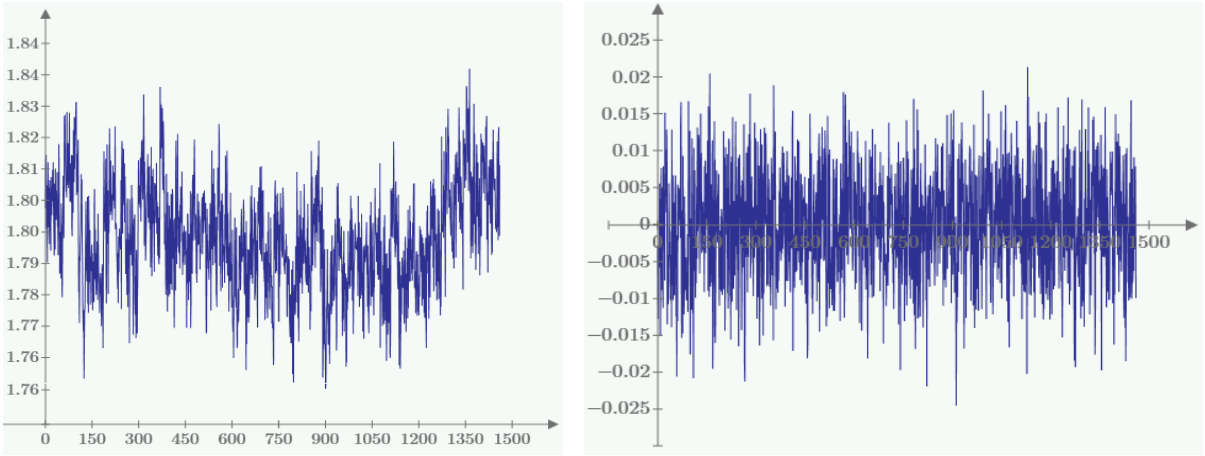


Рис. 4. Сравнение общего содержания CH_4 по данным L2 GOSAT и рассчитанного за 2012 г.: слева рассчитанное содержание в ppb, справа разность рассчитанного содержания и данных TCCON Lamont в ppb

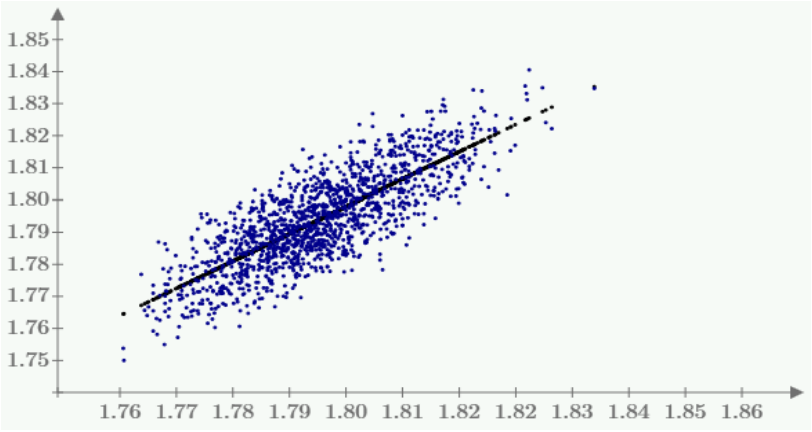


Рис. 5. Отклонение рассчитанного общего содержания CH4 от значений по данным L2 GOSAT в 2012 г.

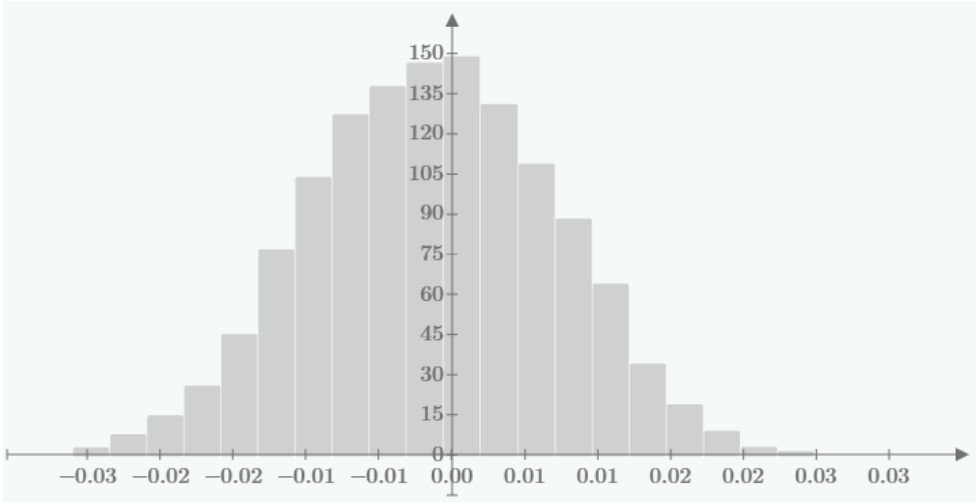


Рис. 6. Отклонение рассчитанного общего содержания CH_4 от значений по данным L2 GOSAT в 2012 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренный метод эмпирических ортогональных функций обработки данных измерений может быть применен к получению достоверной информации о пространственно-временном поведении метана на больших территориях.

Список литературы

1. Непараметрические математические методы восстановления общего содержания CO2 из данных спутникового мониторинга / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, А.Г. Андреев, С.А. Базелюк, А.К. Лукьянов // Доклады ТУСУР. 2011. Т. 2(24), Ч. 3. С. 181–186.

2. Математические алгоритмы обработки и анализа данных спутникового Фурье-спектрометра в ближней ИК-области спектра / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, Ш. Максютов, А.Г. Андреев, С.А. Базелюк, А.К. Лукьянов // Изв. вузов. Физика. 2012. № 3. С. 84–90.

УДК 630.58.02, 528.8

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

М. А. Корец, В. А. Рыжкова, И. В. Данилова, А. С. Прокушкин
ИЛ СО РАН
e-mail: mik@ksc.krasn.ru)

APPROACHES OF VEGETATION MAPPING BASED ON REMOTE SENSING AND DIGITAL ELEVATION MODEL DATA

M. A. Korets, V. A. Ryzhkova, I. V. Danilova, A. S. Prokushkin
Sukachev Institute of Forest SB-RAS

An algorithm of forest regeneration dynamics mapping based on a spatial analysis of multi-band satellite data, a digital elevation model (DEM), and ground data combined with expert estimates of the resulting land cover classes was applied using geographic information system (GIS). The resulting maps for the Tura test site include layers: landcover type (RS-based), vegetation growing condition types (DEM-based), biomass and carbon pools values (based on vegetation growing conditions, landcover types, and field data).

Ключевые слова: ГИС, ДДЗ, ЦМР, картографирование типов растительности и биомассы.

Keywords: GIS, RS, DEM, landcover mapping, biomass mapping.

Introduction. Computer programs available nowadays to process remote sensing (RS) data, as well as increasing space imagery resolution allowed to automate traditional methods of data analysis to a fairly high level and to combine them as a single technology. Use of this technology facilitates RS data analysis and provides higher confidence and detail of its results. Another task is to choose classification criteria that could take into account forest regeneration dynamics characteristics, as scientific and practical value of any thematic map is largely determined by principles of classification of the objects of interest. These principles are based upon in developing map legends. Therefore, vegetation communities and their dynamic states should be classified so that their spatial distribution, as well as their origin and future development trends is reflected.

In the framework of the Ministry of Education and Science RF project (14.25.31.0031) above tasks were applied to develop the combined approach to for qualitative (landcover types) and quantitative (biomass) vegetation characteristics mapping. The local test site area (~3600 km^2) located in the Evenkia forests near Tuta settlement.

Input data. We updated the corresponding blocks of GIS Database developed in the Institute of Forest SB RAS. Remote sensing data included the satellite multispectral images of fine and ultra-fine spatial resolution Landsat-8 (30/15 m, 9 spectral bands, acquisition year 2014); RepidEye (5 m, 5 spectral bands, acquisition years 2012-2014); GeoEye-1 (1.65/0.46 m, 4 spectral bands, acquisition years 2012–2014). Series of plots were selected so in order to represent the whole diversity of types of forest growing conditions for the given region. Sample plots of radius 5 m were used depending on living (or remaining) tree stand density. All the trees with DBH (diameter at breast height 1.3 m) greater or equal to 10 cm were measured. Measurements include: diameter, height, tree species crown shape (4 directions). Characteristics of topography, also of soil- ground conditions were recorded. Soil samples for laboratory analysis are taken in horizons. There were 157 field samples of 2010–2014 located

on test area Tura. The field database included vegetation composition and structure parameters. We used 75 field samples of 2010-2014 for landcover classes mapping and validation (vegetation composition and geomorphology were used). For biomass and carbon stocks extrapolation we used 25 points where biomass and C assessment were done (Prokushkin et al, 2010–2014) and results were uploaded to GIS database.

Methods and results. We elaborated the data processing scheme (Figure), combining common and specially designed approaches, to solve the tasks of fine scale landcover and biomass mapping on the base multisource GIS (DEM, RS data, achieved map products, field sites measurements and processing functions). This methodology realized on the base of GIS and raster-vector processing software products: ESRI ArcGIS 10, ERDAS Imagine 2013 [1] and Trimble eCognition Developer 8 [2]. The most of the procedures relied in this software described by Richards J.A. in the book Remote Sensing Digital Image Analysis [3], and software user manuals. Data processing approach for extended feature set calculation based on DEM-parameters presented by authors [4, 5].

The input RS data (Landsat, RapidEye, GeoEye-1) already passed through the stages of base radiometric corrections. Additionally we applied Haze Reduction procedure [1] based on Tasseled Cap transformation algorithm, for some Landsat 4-7 TM scenes with low haze content. Exclusion masks for "no-data" areas were created for the images with high haze content or compact clouds. Additional haze reduction, orthorectification and radiometric normalization procedures [1] were also applied to normalize image geometry and reflectance to orthogonal view. The output of this data pre-processing stage was a set of normalized multiband RS images and RGB-composites. The last ones were based on NIR-Red-Green or MiddleIR-NIR-Red spectral bands for better visual representation of vegetation. The usable band numbers for RGB viewing were 5-4-3 or 7-4-2 bands of Landsat TM and RapidEye images, and 4-3-2 bands of GeoEye-1.

Reference dataset building applied to produce a reference (training) dataset for computer-based qualitative classification, quantitative approximation algorithms and results accuracy assessment. The reference points and polygons were assigned both by expert and from GPS field data sets. In addition, we converted the reference points to polygons as rectangle point-buffers with 3x3 pixels size, depending on input image resolution. Then we calculated the statistical signatures for each reference polygon, using the pixels of feature (RS-based and DEM-based) layers inside polygons. The signatures includes features mean, standard deviation and inter-feature covariance values. Additionally, the qualitative landcover class field and quantitative values fields (biomass fractions) were added to signature table. Then we passed these initial signatures through the number of filtering procedures in order to remove the statistically non-representative ones [6]. The filtering procedures used both spatial homogeneity of reference samples and feature space homogeneity of reference classes. The last one was based on Euclidean distance calculation between the class means and reference signature means in the multi-dimensional feature space. Finally, we got the reduced optimized set of reference (or training) signatures both for landcover classes and for biomass values approximation.

Finally, we applied separability analysis of class signatures to adjust the training set of landcover classes for supervised classification algorithms. We computed the tables of statistical distance (Transformed divergence, [2]) between signatures sets to determine how distinct initial signatures were from one another. This utility helped us to determine the best subset of classes to use in the classification. The classes with low separability were merged to build new aggregated classes. The outputs of this stage were two sets of reference samples (with signatures): for supervised classification and for quantitative approximation.

Landcover mapping approach consisted from two types of classification algorithms: pixel-based [3] and object-based (GEOBIA). We tried to use well-known pixel-based based

classification algorithms unsupervised clustering (Isodata, [1]) and supervised (Minimum Distance and Maximum Likelihood, [1]).

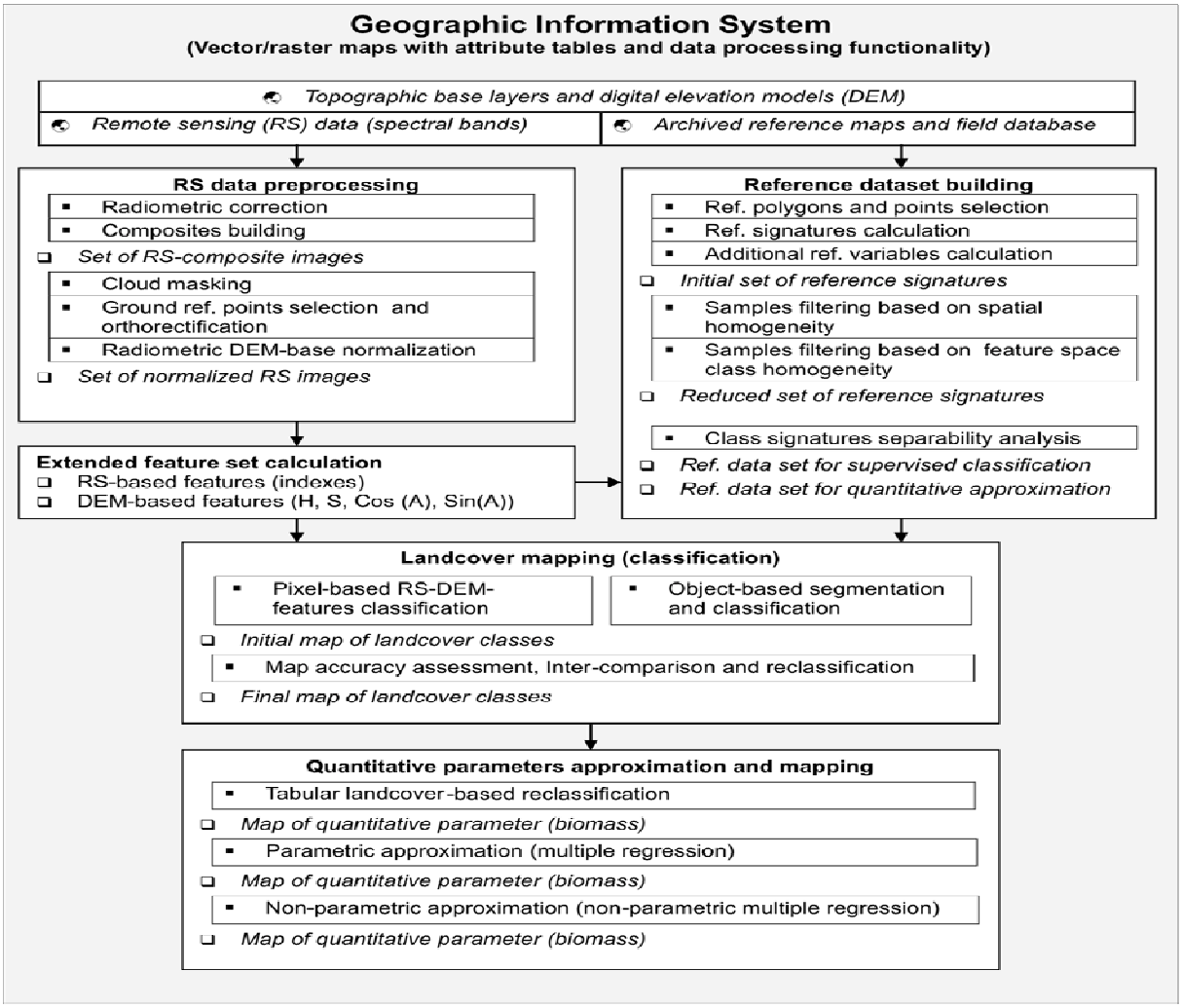


Fig. Data processing scheme for qualitative (landcover types) and quantitative (biomass) vegetation characteristics mapping

Training samples from the previous stage were used both to identify unsupervised classes and to teach the supervised classification procedure. We applied combination of unsupervised and supervised approaches in order to increase number of initial classes and to detect the undefined classes (not supported by training samples). We started from Isodata clustering to map the approximately twice more classes than training samples had. Then we identified the known classes by overlaying of training samples. The rest (unknown) classes were used to define new additional training samples with help of auxiliary data (achieved thematic, topography maps and expert data). In addition, the new field reference points were planed to the next field season to validate the "unknown" classes. Finally, we applied the training samples for the "known" classes together with additional samples for "unknown" classes to perform the supervised classification algorithms. We used both Minimum Distance and Maximum Likelihood approaches in order to select the best of final mapping results on the next accuracy assessment stage. For the same reason in parallel to pixel-based classification, we planned to try the Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA). GEOBIA approach also includes two stages: segmentation and classification [2] (eCognition, 2014). The segmentation procedure use multilayer-feature-images to produce polygonal

segments, which is relatively uniform according to spatial distribution of both pixel feature values and textures. The output segments have a polygonal structure attributed by wide number of statistical, textural and shape parameters, which then can be used on the stage of segments classification, based on the similar to upper described supervise procedures with the same training samples. We used Multiresolution Segmentation and Nearest Neighbor Classification procedures of Trimble eCognition 8 software. The scale factor and textural weight were experimentally adjusted in order to produce adequate spatial accuracy of the final map.

We applied described mapping procedures for DEM-composite (H, S, Cos (A), Sin(A)) and for RS-composite (spectral bands and vegetation indexes). The first one resulted in growing condition type map, the second – actual landcover type map. We used DEM to build topological transects that crossed the study area and analyzed these transects using the thematic and general geographic maps contained in the GIS database, literature information, and ground observation data classification of site conditions taking into account site topology and the associated vegetation types for the study area [7]. This stage resulted in development and mapping of a joint classification of forest vegetation and growing conditions, which is based upon in making the legend of a forest regeneration map and reflects forest regeneration trends in different environmental conditions.

In order to develop a map of growing conditions, we used the result of atomized classification of DEM-composite image. Then overlay of the initial landcover classes and identification of their combinations was done. The set of geomorphological complexes of site conditions, which had been found along transects, were identified. Geomorphological complex of site conditions is a high unit of site conditions classification. It covers sites similar in mesorelief forms and elevation range, characterized by certain climate, soils and set of forest regeneration series.

Map accuracy assessment, inter-comparison and reclassification. To access mapping accuracy of classification approaches, we used confusion matrix, calculated as overlap-area-based zonal statistics for testing map and reference sample polygons and points. The accuracy table included reference totals, number of correct results, percent of accuracy, and Kappa coefficient [3].

Quantitative parameters approximation and mapping stage focused on biomass values mapping on the base on RS-DEM-based input images and field measurements. We planned to use three groups of data extrapolation methods: landcover-based tabular reclassification, parametric and non-parametric approximations (multiple regression algorithms). Since we already had the landcover classes mapped and partly provided by filed data samples with growing stock volumes and other biomass and carbon fractions, the easiest way was to use tabular reclassification when the average of sample's quantitative values were calculated and assigned to corresponding combined landcover and growing conditions classes. This method could provide adequate average accuracy of quantitative estimation in case of adequate quality of landcover classification. Unfortunately, this method could not provide the quantitative values for the classes not provided by field data samples. Therefore, in case of luck of in-situ data we had to use approximation methods to extrapolate the measured values. The parametric or non-parametric regression approaches could be applied for that. Both required the set of training samples with known independent and dependent (estimated) variables. In our case, biomass stocks and C-content volumes were dependent and RS-based and DEM-based features were independent ones.

Available field measurements data and above maps incorporated in the GIS database allowed us to extrapolate the biomass and carbon stock volumes, using the vegetation growing condition and landcover-based tabular reclassification approach. We overlaid the field sample points with combined (spatially intersected) layers of landcover and DEM-based growing condition classes. The resulted allocation table allowed linking the biomass and

carbon stock values from the field sample database (carbon pools parameters with values in kgC/m2) to the combined landcover and DEM-based map.

Using the above principles and methods, we developed classification of growing conditions taking into account site topology and the associated vegetation types for the study area. The resulting maps for the Tura test site include layers: landcover type (10 classes), vegetation growing condition types (5 classes), and biomass and carbon pools (values in kgC/m2 for live and standing dead tree biomass, shrubs, moss-lichen strata, organic layer, root biomass and soil mineral 20 cm layer).

Acknowledgments. We thank all the members of the SIF SB RAS who participated in the field and laboratorywork, conducted chemical analysis of samples, and provided data to the GIS database for the study described in this paper. This study was supported by the Ministry of Education and Science of RF (grant no. 14.25.31.0031).

References

1. ERDAS Field Guide. Fifth edition. USA: ERDAS Inc., 1999. 672 p.

2. User Guide «eCognition Developer 8.9» / Trimble Germany GmbH, Arnulfstrasse 126, D-80636 Munich, Germany, 2013.

3. Richards J.A. Xiuping J. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Birkhäuser, 2005. 439 p.

4. M. A. Korets, Mapping forest inventory stands based on segmentation of a digital elevation model and satellite images // South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics. 2014. Vol. 3, Issue No2S. P. 513–516.

5. Ryzhkova V., Danilova I., Korets M. A GIS-based mapping and estimation the current forest landscape state and dynamics // Journal of landscape ecology. 2011. Vol. 4, № 1. Pp. 42–55.

6. Корец М.А., Черкашин В.П., Рыжкова В.А. Оценка лесных территорий на основе сопряженного анализа данных ГИС и спутниковой съемки // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 173–180.

7. Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А. Классификация лесорастительных условий Норильского промышленного района и прилегающих территорий для оценки состояния и динамики растительного покрова // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 873–885.

УДК 528.854.2

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ О ПРОЯВЛЕНИЯХ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

М. А. Курако[(1)], К. В. Симонов[(2)]
[(1)]ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: mkurako@gmail.com
[(2)]Институт вычислительного моделирования СО РАН
e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Исследование посвящено обработке изображений, связанных с проявлением морских катастрофических явлений. Объектом исследования являются двумерные изображения. Отдельным вопросом анализа изображений является определение фрагментов изображения, имеющих анизотропные характеристики или разрывы (такие как края изображённых объектов или кривые линии на изображении), поскольку традиционные методы обработки изображений нечувствительны к подобного рода характеристикам.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, шиарлет-преобразование, обработка изображений.

Введение

В настоящее время современные вычислительные технологии позволяют обеспечивать производство, передачу и хранение больших объемов данных: различных данных и информации в самых разнообразных сферах деятельности (медицина, астрономия, сейсмология, метеорология, управления воздушным движением, интернет-трафик, аудио и видео приложения и цифровые коммуникации и т. д.). Все эти данные требуют эффективного анализа и обработки с целью получения необходимой новой информации и знаний. Кроме того, важно не только обеспечить адекватность методики для обработки различных типов данных, но и возможность анализа точности методов для более глубокого понимания основных структур в данных.

С точки зрения математики эта задача сводится к разбиению исходных данных (сигнала) на блоки приемлемых размеров, обработке каждого блока в отдельности некоторым методом и анализу результатов обработки. Для этого «разламывания», чтобы разобраться в объекте исследования, предлагается гармонический анализ.

Для класса данных $\ell \in L^2(\mathbb{R}^d)$, $d \geq 1$ подбирается такое множество анализирующих функций $(\varphi_i)_{i\in\mathcal{I}} \subseteq L^2(\mathbb{R}^d)$, где $\mathcal{I}$ счетное множество индексов, что для всех $f \in \ell$ выполняется $f = \sum_{i\in I} c_i(f)\,\varphi_i$.

Счётное множество коэффициентов $c_i(f), i \in \mathcal{I}$ является разложением исходного сигнала по базису анализирующих функций и может быть определённым образом проинтерпретировано с целью анализа входных данных. С другой стороны, указанная формула описывает процесс восстановления сигнала по его коэффициентам разложения.

В течение последних двадцати лет были предложены различные методы обработки анизотропных объектов на изображении, такие как направленные вейвлеты, комплексные вейвлеты, контурлеты, кёрвлеты и т. п. В то же время Д. Донохо, Д. Лабате, Г. Кутинек [1–2; 4–6] был предложен иной подход к анализу анизотропных составляющих: шиарлеты. В отличие от вейвлетов или кёрвлетов, шиарлеты строятся в классе аффинных систем, а также обладают возможностью определения направленности благодаря дополнительно введённому параметру – параметру сдвига.

В свою очередь шиарлеты обладают набором характеристик, выгодно выделяющих их на фоне остальных методов обработки изображений: конечное число генерирующих функций; оптимальное представление анизотропных характеристик

анализируемых данных; быстрая алгоритмическая реализация; единый подход к разложению непрерывных и дискретных данных.

Цель исследования состоит в сравнении алгоритмов дискретного шиарлет-преобразования и создании вычислительной технологии применения дискретного шиарлет-преобразования для обработки изображений катастрофических природных явлений.

1. Алгоритмические решения дискретного шиарлет-преобразования

Рассмотрим основные алгоритмические решения. На общем принципе дискретизации шиарлет-преобразования, описанном в [1–6], построены существующие алгоритмические реализации дискретного шиарлет-преобразования. Это делает возможным обработку двумерных массивов данных, в том числе и цифровых изображений.

Рассмотрим две известные реализации дискретного шиарлет-преобразования. В работе [3] представлен алгоритм под названием «Fast Finite Shearlet Transform». В его основу положено дискретное быстрое прямое и обратное преобразования Фурье. В качестве материнского вейвлета в данной реализации используется вейвлет Мейера. Область частот разбивается на четыре конуса и область низких частот, затем, согласно формуле Планшереля, имеем следующее представление: $\langle f, g\rangle = \frac{1}{MN}\langle \hat{f}, \hat{g}\rangle$.

Тогда для $\ell_1 \cup \ell_3$ имеем:

$$\mathcal{sh}(f)(j,k,m) = \langle f, \psi_{j,k,m}\rangle = \frac{1}{MN}\langle \hat{f}, \hat{\psi}_{j,k,m}\rangle =$$

$$= \frac{1}{MN}\sum_{\omega\in\Omega} \exp\left(-2\pi\imath\,\langle \omega, \begin{pmatrix}\frac{m_1}{M}\\ \frac{m_2}{N}\end{pmatrix}\rangle\right)\hat{\psi}(4^{-J}\omega_1, 4^{-J}k\omega_1 + 2^{-J}\omega_2)\hat{f}(\omega_1,\omega_2) =$$

$$= \frac{1}{MN}\sum_{\omega\in\Omega} \hat{\psi}\left(4^{-j}\omega_1, 4^{-j}k\omega_1 + 2^{-j}\omega_2\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)\exp\left(-2\pi i\,\langle \omega, \begin{pmatrix}\frac{m_1}{M}\\ \frac{m_2}{N}\end{pmatrix}\rangle\right).$$

При вводе обозначения $\hat{g}_{j,k}(\omega) = \hat{\psi}\left(4^{-j}\omega_1, 4^{-j}k\omega_1 + 2^{-j}\omega_2\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)$ данное выражение может быть записано в виде:

$$\mathcal{sh}(f)(j,k,m) = \tfrac{1}{MN}\textstyle\sum_{\omega\in\Omega}\hat{g}_{j,k}(\omega)\exp\left(-2\pi i\,\langle \omega, \begin{pmatrix}\frac{m_1}{M}\\ \frac{m_2}{N}\end{pmatrix}\rangle\right).$$

Тогда шиарлет-преобразование функции f можно вычислить как обратное преобразование Фурье:

$$\mathcal{sh}(f)(j,k,m) = ifft2\left(\hat{g}_{j,k}\right) = ifft2(\hat{\psi}\left(4^{-j}\omega_1, 4^{-j}k\omega_1 + 2^{-j}\omega_2\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)).$$

Аналогичные выражения можно получить для других областей. В конечном итоге, шиарлет-преобразование функции f вычисляется следующим образом:

$$\mathcal{sh}(f)(j,k,m) = \begin{cases} ifft2\left(\hat{\phi}(\omega_1,\omega_2)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)\right) \text{ в области низких частот} \\ ifft2\left(\hat{\psi}\left(4^{-j}\omega_1, 4^{-j}k\omega_1 + 2^{-j}\omega_2\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)\right) \text{ для } \ell_1 \cup \ell_3 \\ ifft2\left(\hat{\tilde{\psi}}\left(4^{-j}\omega_2, 4^{-j}k\omega_2 + 2^{-j}\omega_1\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)\right) \text{для } \ell_2 \cup \ell_4 \\ ifft2\left(\hat{\psi}^{\times}\left(4^{-j}\omega_1, 4^{-j}k\omega_1 + 2^{-j}\omega_2\right)\hat{f}(\omega_1,\omega_2)\right) \text{при } |k| = 2^j \end{cases}.$$

Для «проблемной» области на стыке конусов ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 и ℓ_4 преобразование вычисляется отдельно, где $\hat{\tilde{\psi}}$ и $\hat{\psi}^{\times}$ образы соответствующих преобразований на расчетном конусе. В работе [3] отмечается, что в теории указанный алгоритм применим к изображениям произвольных размеров, однако данная реализация принимает на вход только квадратные изображения, поскольку возникают затруднения при обращении с коэффициентами на диагоналях.

Следующий подход к вычислению шиарлет-преобразования под названием «ShearLab» описан в работе [1; 4; 6]. Данная реализация основывается на дискретном быстром преобразовании Фурье, однако несколько другим образом интерпретирует область частот. Плоскость, согласно общей схеме, разбивается на конусы, область низких частот и множество точек, оказавшихся на стыках конусов.

Затем осуществляется переход к псевдополярным координатам, в которых вычисляется модифицированное преобразование Фурье. Поскольку переход к псевдополярным координатам не является изометрическим отображением, возникает необходимость в восстановлении «плотности» фрагментов, получающихся при дискретизации области частот. В качестве выхода из этой ситуации предлагается компенсировать искажение плотности при помощи довешивающих функций (weighting functions). Целью компенсации является восстановление структуры координатной сетки таким образом, чтобы для преобразования Фурье вновь была справедлива формула Планшереля.

2. Вычислительная методика обработки изображений

Рассматриваемые алгоритмы шиарлет-преобразования выполняют следующую последовательность действий: классическое преобразование Фурье; замена переменных и переход к полярной системе координат; компенсация радиальной плотности путём домножения на довешивающие функции; разбиение плоскости на прямоугольные фрагменты; обратное преобразование Фурье каждого фрагмента. Восстановление исходного изображения из коэффициентов его шиарлет-преобразования выполняется на основе сопряжённых действий в обратном порядке.

Дискретное шиарлет-преобразование применимо для обработки изображений. Известны следующие результаты, которых можно добиться, применяя к коэффициентам шиарлет-преобразования различные фильтры: выделение контуров объектов на изображениях; шумоподавление; разделение изображений (геометрический анализ).

Выполняя анализ результатов действия алгоритма дискретного шиарлет-преобразования для последнего масштаба и всевозможных направлений, можно заметить следующую особенность, что на последнем масштабе шиарлет-коэффициенты представляют фрагменты контуров исследуемых объектов на изображении.

Исходя из описанных выше теоретических и методических представлений, рассмотрим модификацию метода геометрического анализа визуальных данных, позволяющую решать широкий класс задач обработки сложных изображений экологического мониторинга на основе шиарлет-преобразования.

При этом решаются следующие задачи экологического мониторинга в рамках специализированной информационной системы: разделение точек и кривых на изображениях; выделение контура на изображениях; визуализация данных на основе четырех алгоритмов шиарлет-преобразования.

Предлагается вычислительная методика решения указанных задач, которая состоит из следующих этапов: подготовительный этап, когда исходное изображение форматируется под расчетный шаблон и намечается последовательность расчетных процедур для оптимального решения поставленной задачи; запуск и настройка алгоритмического обеспечения шиарлет-преобразования, выбор конкретного алгоритма

в зависимости от поставленной задачи и от условий яркости и контрастности изображений; загрузка и обработка исходных изображений для различных расчетных условий в зависимости от поставленной задачи; анализ получаемых расчетных изображений в результате шиарлет-преобразования, контрастирование изображения на основе применения алгоритмов A, B, C и D, которые в результате определяются следующим образом: A – алгоритм FFST [3]; B – алгоритм Shearlet toolbox [5]; C – алгоритм Shearlab [1]; D – алгоритм TGVSHCS [8], является аналогом алгоритма A.

Таким образом, шиарлет-преобразование является новым методом многомерного анализа. Этот метод отличается возможностью определения анизотропной составляющей в анализируемых данных, что может быть практически применимым для задач обработки изображений. Идея шиарлет-преобразования опирается на существующую методику вейвлет-анализа и является в свою очередь её естественным расширением. Так, параметрами шиарлет-преобразования являются не только смещение и коэффициент масштабирования, но и сдвиг.

Заключение

Основными из приложений дискретного шиарлет-преобразования являются алгоритмы решения задач шумоподавления, выделения краёв на изображениях, разделения изображений на объекты различной природы (морфологический анализ) и улучшения качества изображений. Имеющиеся подходы к анализу изображений могут быть перенесены в пространство больших размерностей (видеоизображения), а также оказываются полезными для решения задач в областях обработки данных мониторинга о проявления морских природных катастроф.

Список литературы

1. Donoho D. L., Kutyniok G. Geometric separation using a wavelet-shearlet dictionary // SampTA'09 (Marseille, France, 2009), Proc., 2009.

2. Guo K., Kutyniok G., Labate D. Sparse multidimensional representations using anisotropic dilation and shear operators // Wavelets and Splines (Athens, GA, 2005). Nashboro Press, Nashville, TN, 2006. P. 189–201.

3. Hauser S. Fast Finite Shearlet Transform. Режим доступа: http://www.mathematik.uni-kl.de/fileadmin/image/haeuser/software/FFST.zip.

4. Kutyniok G., Labate D. Construction of regular and irregular shearlet frames // J. Wavelet Theory and Appl. 2007. N. 1. P. 1–10.

5. Labate D., Easley G., Lim W. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform // Applied Computational Harmonic Analysis. 2008. V. 25. P. 25–46.

6. Labate D., Lim W.-Q., Kutyniok G., Weiss G. Sparse multidimensional representation using shearlets // Wavelets XI (San Diego, CA, 2005). SPIE Proc. 5914, SPIE – Bellingham, WA, 2005. P. 254–262.

7. Lim W.-Q. The discrete shearlet transform: a new directional transform and compactly supported shearlet frames // IEEE Trans. Imag. Proc. 2010. V. 19. P. 1166–1180.

8. Zhuang X. University of Osnabrueck. ShearLab A rationally designed digital shearlet transform [сайт]. – Режим доступа: http://shearlab.org.

УДК 528.88

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ТРЕНДОВ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А. А. Ларько, Ю. Д. Иванова, А. П. Шевырногов
Институт биофизики Сибирского отделения РАН
e-mail: lantar@inbox.ru
e-mail: lulja@yandex.ru
e-mail: ap_42@mail.ru

ANALYSIS OF NONLINEAR TRENDS OF NET PRIMARY PRODUCTION OF PLANTS BY SATELLITE DATA

A. A. Larko, Yu. D. Ivanova, A. P. Shevyrnogov
Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
e-mail: lantar@inbox.ru
e-mail: lulja@yandex.ru
e-mail: ap_42@mail.ru

Работа посвящена изучению пространственного распределения нелинейных трендов чистой первичной продукции растительности, полученных различными методами на основе данных дистанционного зондирования Земли. Для получения трендов используется метод STL. Пространственное распределение трендов выявило зоны уменьшения, роста и стабильного поведения ЧПП на исследуемой территории.

Ключевые слова: чистая первичная продукция, тренды, нелинейные тренды, спутниковые данные, ДЗЗ, растительность, MODIS.

Введение

Для настоящего времени характерны крупномасштабные изменения в растительных сообществах в различных частях нашей планеты, связанные как с изменением климата, так и с широкомасштабной антропогенной деятельностью. Чистая первичная продукция (ЧПП) является одним из показателей, который позволяет проследить изменения в растительных сообществах, в первую очередь, изменения их продуктивности во времени на определенной территории. Чистая первичная продукция представляет собой количество углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Значения ЧПП отличаются как для различных растительных биомов, так и для одинаковых растительных сообществ, произрастающих в разных природных условиях. Основной сложностью при рассмотрении ЧПП является большая трудоемкость при определении его текущего значения для различных экосистем.

В данной работе оценивались нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности с 2000 по 2014 г. для юга Красноярского края (район бассейна реки Енисей). Общая площадь территории составляет 3000 км^2 (анализируемый участок размерностью 500х600 км). На данной территории находятся различные типы экосистем: степи Хакасии, лесостепи, хвойные и лиственные леса, горные территории Западного Саяна. Леса на территории района составляют 80 % площади и приурочены к Саянам. На изучаемой горной территории представлены следующие высотные пояса: степной, лесостепной, черневой, таежный, субальпийский, альпийский.

Методы и данные

Для определения значений ЧПП на протяженных малодоступных территориях традиционно используются данные дистанционного зондирования со спутников. Расчет ЧПП основан на оптических спектральных спутниковых данных и данных о подстилающей поверхности. Для оценки чистой первичной продукции по спутниковым данным существует множество расчетных моделей, большинство из них позволяет оценить глобальные значения [1–3]. В данной работе для расчета ЧПП была использована модель MODIS NPP (на основе данных MODIS/TERRA). Главной особенностью этой модели является использование эмпирических зависимостей при расчете ЧПП для каждого из 15 наземных биомов планеты. При расчетах фитомассы GPP (общая первичная продукция) и дыхания используется индекс площади листовой поверхности (LAI). Функции дыхания и GPP зависят от температуры. В дополнение к дыханию зеленой фитомассы учитывается дыхание стволов (при расчете среднегодовых значений ЧПП) и дыхание корней.

Значения ЧПП были получены на основе данных сканера MODIS спутника Terra, в работе использовался продукт MOD17, пространственное разрешение 1 км^2. Временной ряд наблюдений с 2000 по 2014 гг. Данные представляют собой композитные изображения, временной шаг 8 дней, рассчитанные на основе модели MODIS NPP.

Первый метод, который использовался для декомпозиции временных рядов – STL Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess – процедура сезонно трендовой декомпозиции, основанная на Лессе. 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) [4–6].

Результаты и обсуждение

С помощью метода STL были получены пространственно-распределенные нелинейные тренды точечных измерений чистой первичной продукции (рис. 1).

Пространственное распределение трендов выявило зоны уменьшения, роста и стабильного поведения ЧПП на исследуемой территории. Можно сделать вывод, что на большей части исследованной территории значения ЧПП остаются достаточно стабильными за рассмотренный период 2000–2014 гг. Снижение значений ЧПП на данной территории произошло на равнинах и на территории предгорий Западного Саяна. Эти площади представляют собой либо сельхозугодия, либо лесостепь на равнинных территориях до 300 м. Именно эти районы наиболее подвержены антропогенному воздействию, и именно они страдают в первую очередь при неблагоприятных погодных условиях, таких как засухи. Положительная динамика ЧПП за рассмотренный период времени наблюдается только на территории горных лесов Западного Саяна занятой хвойными видами деревьев на высотах 600–1200 м. Эти территории не подвержены массированному антропогенному воздействию.

Проведенный корреляционный анализ между рядами нелинейных трендов ЧПП и радиационной температуры так же частично подтверждает эти выводы (рис. 2).

Пространственное распределение коэффициентов корреляции позволяет выявить зоны с сильной зависимостью между температурой и ЧПП как в положительном, так и в отрицательном направлении.

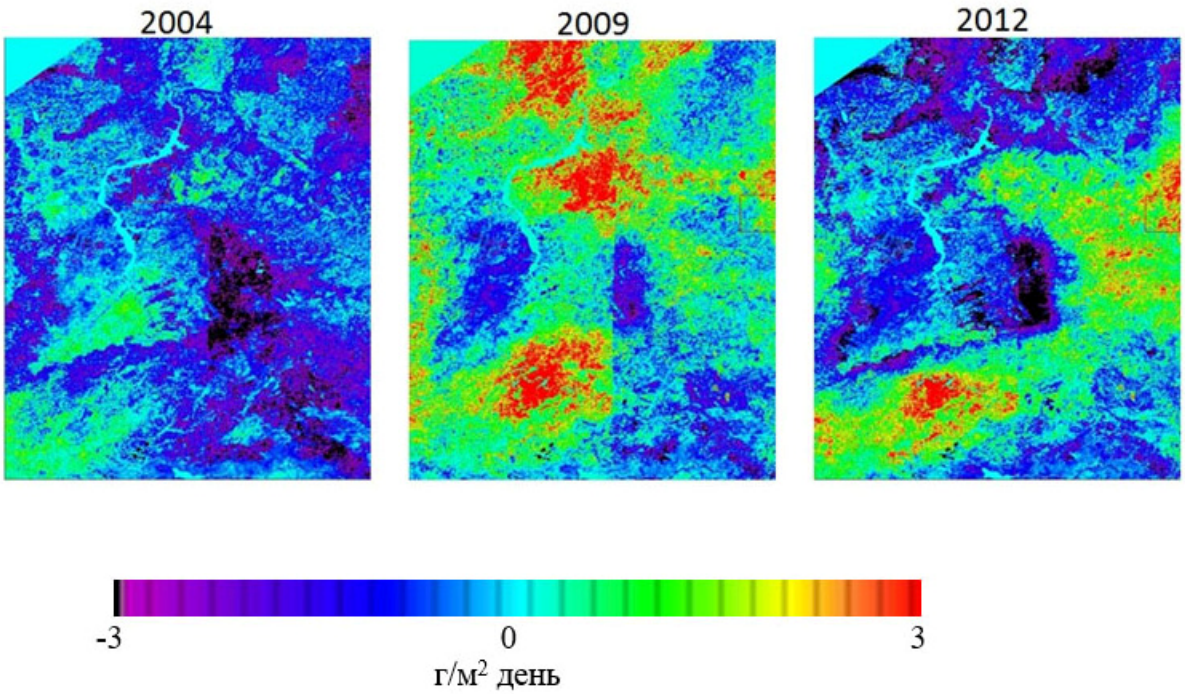


Рис. 1. Пространственное распределение значений трендов ЧПП относительно начальных значений (2000 г.), рассчитанных методом STL

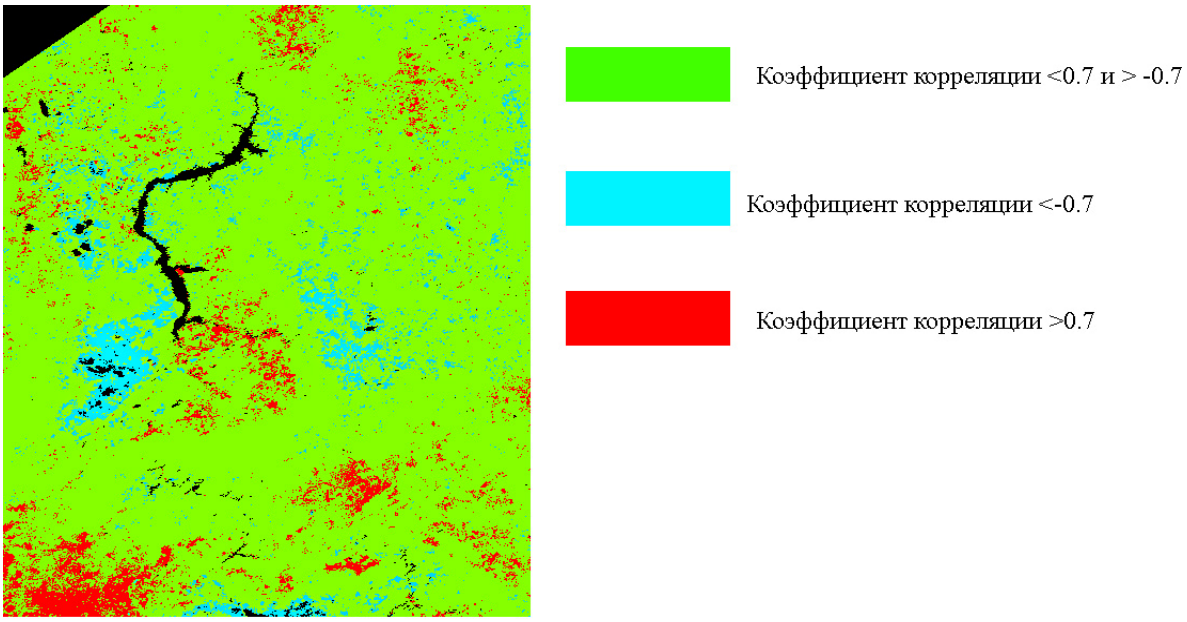


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между трендами ЧПП и трендами радиационной температуры (с 2000 по 2014 г.)

Если рассматривать значения ЧПП как условный показатель, отражающий динамику бюджета углерода на рассмотренной территории за определенный период времени без учета почвенных процессов, можно определить территории, расположенные до 300 м, как территории, которые перестали накапливать углерод в растительной биомассе с той скоростью, как это происходило 15 лет назад. Снижение аккумуляции углерода из атмосферы достигает на отдельных территориях примерно

30 %. Этот процесс происходит на большей части площади сельхозугодий исследованной территории юга Красноярского края.

Работа поддержана программой РАН, проект № 12 «Арктика».
Работа поддержана ККФН № 15-45-04034.

Список литературы

1. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 / M. Cao, S.D. Prince, J. Small, S.J. Goetz // Ecosystems. 2004. Vol. 7. P. 233–242.

2. SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998–2005 as indicators of recent land cover change processes in northern Eurasia / C. Hüttich, M. Herold, C. Schmullius, V. Egorov, S.A. Bartalev // Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover. 2006. P. 336–344.

3. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set / M. Zhao, F.A. Heinsch, R.R. Nemani, S.W. Running // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 95. P. 164–176.

4. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess / R.B. Cleveland, W.S. Cleveland, J.E. McRae, I. Terpenning // Journal of Official Statistics. 1990. Vol. 6. P. 3–73.

5. 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.

6. 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

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ASTER GDEM V.2

А. Л. Минеев[(1)], Ю. Г. Кутинов[(1,2)], З. Б. Чистова[(1)], Е. В. Полякова[(1,2)]
[(1)]ФГБУН Институт экологических проблем Севера УрО РАН
[(2)]Центр космического мониторинга Арктики САФУ им. М.В. Ломоносова
e-mail: mineew.al@gmail.com

Использование цифрового моделирования рельефа и современных ГИС-технологий позволяет проводить геоэкологическое районирование территорий. Глобальные ЦМР, находящиеся в свободном доступе, требуют серьезной подготовки для проведения региональных исследований. Описана методика построения корректной ЦМР Архангельской области на основе глобальной модели ASTER GDEM v.2 в программном продукте SAGA GIS.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, ASTER GDEM, SAGA GIS.

Информация о форме поверхности Земли востребована при решении многих геоэкологических задач и традиционно представляется в виде карт (горизонталей, изогипс, изобат и т. п.). В настоящее время основным способом представления формы земной поверхности является цифровая модель рельефа (ЦМР). ЦМР может использоваться в качестве геопространственной основы при прогнозировании опасных процессов и явлений, для оценки скорости протекания эрозионных процессов, выделения площадей аккумуляции осадков, загрязняющих веществ, и пр. В свободном доступе в сети Интернет находятся следующие глобальные ЦМР: SRTM, SRTM-30, ASTER GDEM v.2, GTOPO30, ACE2, ETOPO2 и GMTED2010. Произведен их анализ по таким параметрам как покрытие, разрешение, точность, наличие артефактов и однородность материала. Установлено, что для территории Архангельской области наиболее подходящей является ASTER GDEM v.2. Однако в исходном виде модель содержит большое количество артефактов, пустот и пр. ошибок и требует значительной корректировки и подготовки для проведения на ее основе дальнейших исследований.

Подготовка ЦМР Архангельской области включала в себя следующие этапы: 1) извлечение и объединение данных; 2) замена аномальных значений высотных отметок и «пустот»; 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков; 4) заполнение впадин. Все операции производились в свободном программном продукте SAGA GIS (http://www.saga-gis.org).

Архангельская область покрыта 91 сценой ASTER GDEM v2. Сцены получены с сервера Геологической службы США (http://earthexplorer.usgs.gov) и загружены в SAGA GIS с помощью открытой библиотеки GDAL. Далее встроенными методами из всего набора были извлечены только те данные, которые расположены в границах области.

Библиотека GDAL определяет значение отсутствующих данных в наборе ASTER GDEM, равным –32767. Однако некоторые ошибочные данные в ASTER GDEM были удалены разработчиками и заполнены значением –9999. Для дальнейшей работы значения пустот были приведены к единому виду (–32767) с помощью модуля Grid Calculator.

Для заполнения недостающих данных в ASTER GDEM v2 были использованы данные из ЦМР GMTED2010. Архангельская область покрывается одной сценой GMTED2010. Таким образом, указав в качестве параметров модуля Clip Grid With Polygon сцену GMTED2010 и полигон границы области из набора Vmap0, были извлечены данные GMTED2010 в пределах Архангельской области.

ASTER GDEM имеет размер ячейки, равный 1 угловой секунде (~30 м), размер ячейки GMTED2010 равен 7,5 угловым секундам (~225 м). Для дальнейшей композиции этих двух моделей размер ячейки был приведен к единому виду, то есть искусственно уменьшен размер ячейки GMTED2010 до 1 угловой секунды. С использованием модуля Patching отсутствующие данные в ASTER GDEM были заполнены значениями GMTED2010.

Далее проводился статистический анализ для обнаружения аномальных значений.

По данным ASTER GDEM v.2 на территории области диапазон высот составляет от –393 до 6255 метров. Понятно, что граничные значения данного диапазона являются погрешностями в наблюдениях и не представляют высоту естественного рельефа. Уточнить границы диапазона значений высоты можно с помощью методов обнаружения выбросов (артефактов, аномальных значений) в совокупности наблюдений. В теории статистики выбросом называется наблюдение, значение которого численно удаленно от остальных значений в совокупности наблюдений. В целом наличие выбросов негативно влияет на анализ и получение корректных данных [1–2].

Так как невозможно сделать корректное предположение о законе распределения высоты рельефа земной поверхности, следует воспользоваться одним из неформальных методов: метод среднеквадратического отклонения (3SD); метод Z-Score; модифицированный метод Z-Score (Modified Z-Score); метод абсолютного медианного отклонения (3MADe); правило медианы (Median Rule).

Для определения аномальных значений в ЦМР области был написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет рассчитывать вероятные диапазоны значений (и отбрасывать выбросы) по всем из пяти рассмотренных методов. Неформальные методы дают приблизительно одинаковый результат на относительно небольших выборках. Однако модифицированный метод Z-Score, метод абсолютного медианного отклонения и правило медианы, то есть методы, которые не основываются на среднем арифметическом и стандартном отклонении, более устойчивы к наличию экстремальных выбросов в больших наборах данных, поэтому лучше использовать их. Так как метод абсолютного медианного отклонения работает несколько быстрее на больших наборах данных, то был применен данный метод для обнаружения выбросов в подготавливаемой ЦМР.

Для устранения шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков в SAGA GIS был использован модуль DTM Filter. Работа модуля основывается на предположении о том, что большая разность высот между двумя соседними ячейками вряд ли является крутым склоном, скорее ошибкой в данных. Вероятность того, что ячейка с большими значениями высот не является ошибочной, увеличивается пропорционально расстоянию между двумя рассматриваемыми ячейками, поэтому допустимая разность высот рассчитывается с помощью функции от этого расстояния. Рассматриваемая ячейка считается верной, если в пределах плавающего окна не встретится другая ячейка, разность высоты которой с высотой рассматриваемой ячейки не будет превышать допустимую разность [3].

Одним из показателей точности ASTER GDEM является размер стэка, то есть количество стереопар, использованных для расчета значения высоты в конкретном пикселе. Размер стэка представлен в файле оценки качества (QA-файл) для каждой сцены ASTER GDEM, пример приведен на рис. 1. В тех областях, где размер стэка мал, наиболее вероятны ошибки и неточности в данных. Также вероятны ошибки на линейных или криволинейных границах между областями с разным размером стэка. Такие ошибки принимают форму прямых линий, бугров, ям и т. д. С помощью модуля DTM Filter были устранены погрешности в данных на границах между областями с разным размером стэка и в областях, где размер стэка мал.

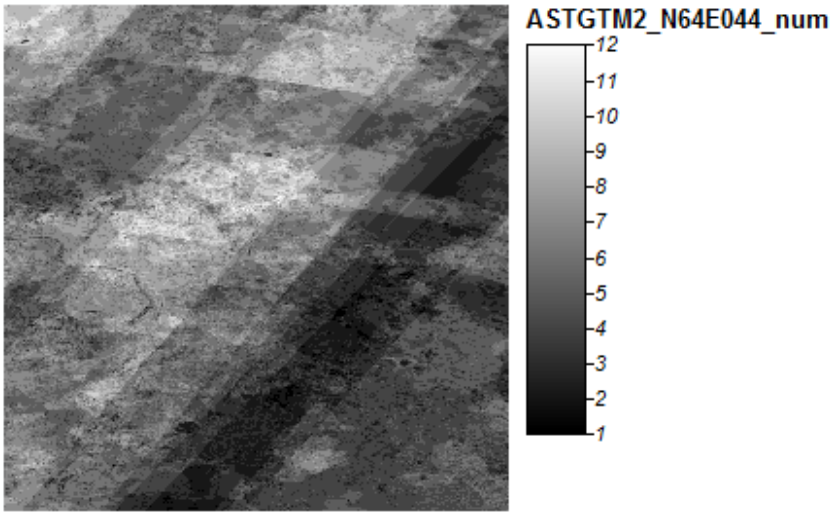


Рис. 1. Размер стэка для одной сцены ASTER GDEM

После выполнения всех процессов, связанных с устранением ошибок, образованные на месте неверных значений пустоты были также заменены данными GMTED2010.

Для сглаживания ЦМР применен фильтр в модуле Simple Filter, основанный на среднеквадратическом отклонении. Работа фильтра заключается в том, что вокруг каждой ячейки модели строится окно определенного размера, и для полученного окна высчитывается среднеквадратическое отклонение. Далее всем ячейкам окна, значение которых превышает двойное среднеквадратическое отклонение (по модулю), задается новое значение, равное среднеквадратическому отклонению окна.

На последнем этапе подготовки модели необходимо произвести ее гидрологическую коррекцию. В большинстве ЦМР содержится множество понижений рельефа, выраженных в виде площадей без стока и часто называемых впадинами [4].

В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и ложные артефакты. Ложные впадины – это недостатки цифровой модели, их наличие обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты [5].

Эффективные методы устранения впадин разработаны авторами L. Wang и H. Liu (2006), и O. Planchon и F. Darboux (2002). Оба этих метода реализованы в SAGA GIS в виде соответствующих модулей Fill Sinks (Planchon/Darboux, 2002) и Fill Sinks (Wang/Liu).

Метод Planchon и F. Darboux (2002) заключается в том, что вместо постепенного заполнения впадин в первую очередь рельеф заполняется «толстым слоем воды», а затем удаляется избыток [6].

В основе метода L. Wang и H. Liu (2006) лежит такое понятие как «высота заполнения» и алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами. Данный метод способен за один проход одновременно определить как направления потоков, так и пространственное разделение водоразделов [5]. Алгоритм работы метода проиллюстрирован на рис. 2. Для заполнения впадин в ЦМР Архангельской области был использован метод L. Wang и H. Liu (2006) как наиболее быстро выполняющий процесс обработки больших наборов данных по сравнению с другими методами.

В результате проведенной коррекции получена подготовленная для дальнейших исследований ЦМР Архангельской области. Результат сравнения исходной и подготовленной модели приведен на рис. 3.

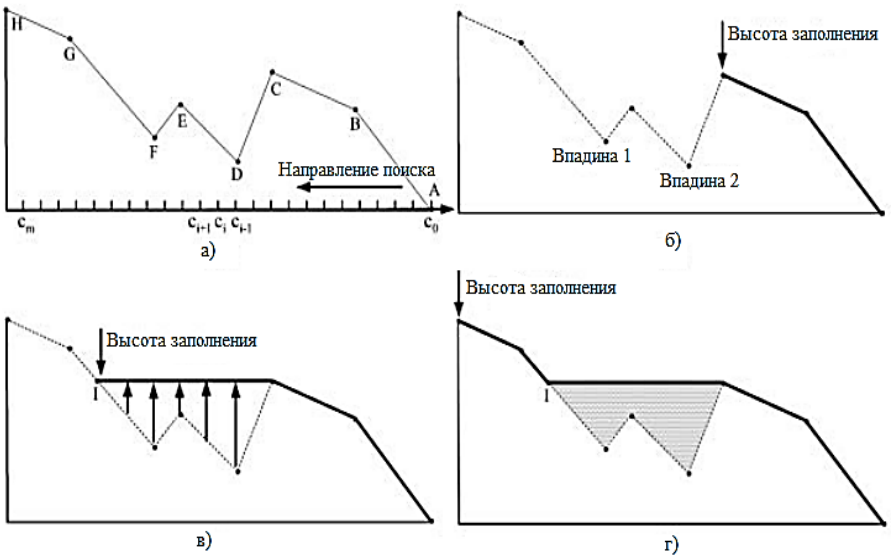


Рис. 2. Иллюстрация работы метода L. Wang и H. Liu (2006): *а* – профиль рельефа с выходом потока в точке *A*; *б* – высота заполнения в ячейках между точками *A* и *C* равна исходной высоте для каждой ячейки; *в* – высота заполнения между точками *C* и *I* равна исходной высоте точки *C*; *г* – высота заполнения в ячейках между точками *I* и *H* равна исходной высоте

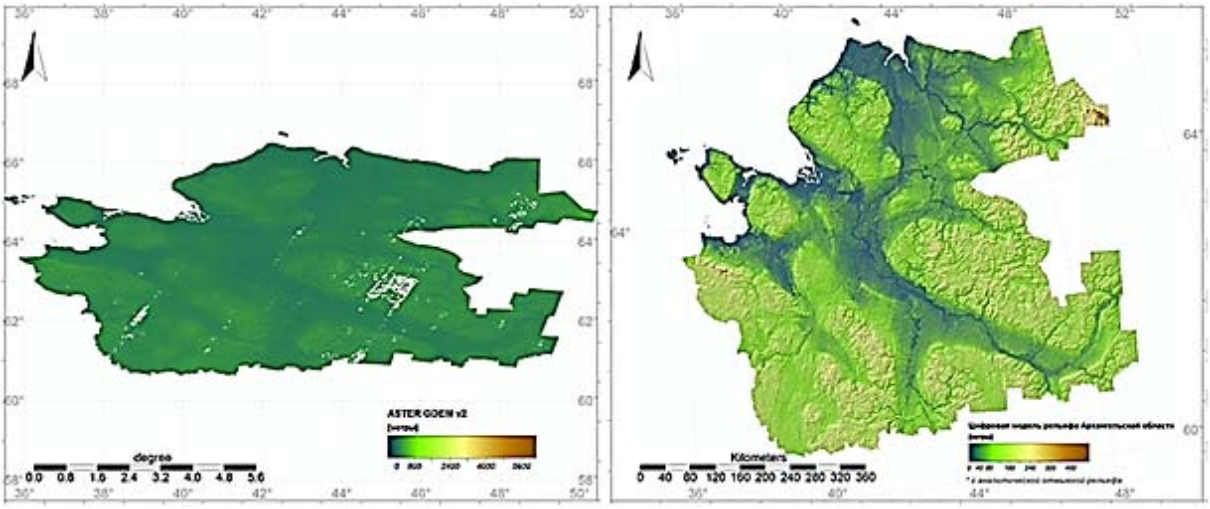


Рис. 3. Исходная (слева) модель ASTER GDEM v.2 и подготовленная ЦМР Архангельской области

Список литературы

1. Seo S. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. University of Pittsburgh, 2006. 53 p.

2. Olewuezi N.P. Note on the comparison of some outlier labeling techniques // Journal of Mathematics and Statistics. 2011. Vol. 7(4). P. 353–355.

3. Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data // IAPRS. Vol. XXXIII. Amsterdam, 2000. P. 935–942.

4. Zhu D., Ren Q., Xuan Y., Chen Y., Cluckie I.D. An effective depression filling algorithm for DEM-based 2-D surface flow modelling // Hydrology and Earth System Sciences. 2013. Vol. 17(2). P. 495–505.

5. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20(2). P. 193–213.

6. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena. 2002. Vol. 46(2). P. 159–176.

УДК 778.35

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ЦВЕТОВОГО РАЗЛИЧИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРАКТИКЕ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

А. С. Молчанов
1 УНИИ войсковой части 15650, г. Ахтубинск
89171900070; 9171900070@rambler.ru

Рассмотрена возможность применения показателя цветового различия между объектом и фоном для оценки цветных фотографических изображений, полученными аэрофотосистемами военного назначения. Показана целесообразность его использования при проведении летных испытаний.

Ключевые слова: аэрофотосистема, фотоизображение, испытания, показатель.

Одной из основных задач, стоящих перед комплексами и средствами воздушной разведки (ВзР), имеющих в своем составе аэрофотосистемы (АФС), предназначенные для выполнения воздушного аэрофотографирования, является своевременное вскрытие (выявление) объектов противника на заданном фоне подстилающей поверхности. Обнаружение и распознавание объекта выполняется по получаемому АФС изображению и в значительной степени зависит от качества изображения. В части решения задач воспроизведения изображений под качеством АФС понимается способность воспроизводить без искажений спектры входных сигналов в требуемых диапазонах пространственных частот. Качество АФС существенным образом влияет на эффективность АФС, поэтому для их оценки необходимо использовать показатели, которые были связаны с показателями эффективности АФС. Под эффективностью АФС понимается степень решения задач обнаружения или распознавания объектов ВзР по изображениям, полученными данной системой в установленные командованием сроки [1].

При анализе показателя оценки качества АФС необходимо учитывать особенности процессов зрительного восприятия полученных АФС изображений дешифровщика. Перечислим основные особенности процесса зрительного восприятия [1–4]:

а) зрительный анализатор можно представить в виде модели Фурье-фильтра, где каждый канал настроен на выделение решетки с определенной пространственной частотой;

б) зрительная система человека обладает способностью к инвариантному распознаванию объектов, т. е. может узнавать их несмотря на изменения яркости, контраста, цвета, изменения размера и искажения формы. При этом форма и цвет распознаются независимо;

в) зрительная система человека благодаря механизму адаптации может работать в диапазоне освещенностей, составляющем 10 логарифмических единиц. Когда глаз адаптирован к некоторому уровню освещенности, его динамический диапазон составляет примерно две логарифмические единицы [2];

г) уменьшение угловых размеров объекта приводит к изменению ощущения его цветности. При малых угловых размерах ($10' \le \alpha \le 60'$) возникает цветовое зрение, при котором, вследствие выпадения синеощущающего аппарата, дешифровщик видит все разнообразие цветов как смесь оранжево-красных цветов с зелено-голубыми. При $\alpha \le 10'$ глаз не различает цветов и воспринимает детали изображения как черно-белые [5].

В качестве основных показателей оценки качества АФС, в том числе и перспективных, используются: масштаб изображения, захват при аэрофотографировании, высоты боевого применения, допустимый диапазон отношения путевой скорости к высоте полета летательного аппарата, угол обзора АФС, спектральный диапазон работы АФС, динамический диапазон, количество предаваемых градаций яркости, ошибка определения координат, вероятность обнаружения объекта, вероятность распознавания объекта, разрешающая способность. Недостатком и сложностью всех вероятностных оценок качества АФС является то, что эти оценки получены при соблюдении определенной совокупности условий проведения летного эксперимента. Изменение одного или нескольких из них (например времени аэрофотографирования или характеристик аэроландшафта), может существенно повлиять на вероятность вскрытия объекта дешифрирования. Говоря о вероятностях обнаружения и распознавания, нужно всегда оговаривать условия, в которых АФС оценивалась. Существующие показатели оценки качества АФС не позволяют сопоставить различные АФС, использующие различные аэрофотоматериалы и определить, какая из них наиболее пригодна для решения поставленной задачи.

Принятию каждого типа АФС в эксплуатацию предшествуют их летные испытания, целью которых является подтверждение заданных в тактико-техническом задании характеристик и выдача рекомендаций о принятии образца на вооружение (снабжение) и постановке на серийное производство. Существующие методы испытаний предусматривают аэрофотографирование (получение изображения) одного и того же участка аэроландшафта с расположенными на нем тест-объектами. Затем группа дешифровщиков определяет по действующим методикам величину разрешающей способности АФС и дает экспертную оценку качества. Оценка АФС по значению разрешающей способности ориентирована на конечные результаты работы системы и малопригодна для анализа работы АФС. К недостаткам оценки качества АФС по величине разрешающей способности следует отнести ее субъективный характер, так как разрешающая способность оценивается дешифровщиком. При этом ошибка дешифровщика, в сознании которого еще не установился четкий критерий разрешения, достигает 40 % [1–3].

Одним из показателей при оценке цветных изображений может стать величина цветового различия между объектом и фоном в равноконтрастной системе, рекомендованной к применению Международной колориметрической организацией (МКО). В основе этого показателя лежит система координат цвета, в которой равным отрезкам линии, проведенной между точками, изображающими любые два цвета, соответствовали бы равные цветовые контрасты – равные числа порогов [4]. Два излучения, имеющие разные координаты цвета, воспринимаются глазом как разноцветные, если разница в цвете равна или больше порога цветоразличения. Пороговую разность цвета можно представить в пространстве в виде расстояния между концами векторов двух цветов, различаемых с заданной вероятностью. Чем больше это расстояние, тем больше их различие, и цвета становятся более контрастными. В этом смысле пороговую разность цвета принято называть цветовым порогом, а сверхпороговое различие, выраженное минимальным числом цветовых порогов, – цветовым контрастом.

В настоящее время применяется равноконтрастная модель системы МКО – 1976 $L^*a^*b^*$. Цветовое пространство $L^*a^*b^*$ определяется тремя координатами L^*, a^*, b^*. Где L^* – светлота, a^* – красно-зеленые цвета и b^* – желто-синие цвета.

В цветовом пространстве МКО $L^*a^*b^*$ каждому цвету соответствует точка, положение которой определяется тремя независимыми координатами: светлотой – L^* и двумя хроматическими координатами – a^* и b^*, связанными с координатами цвета X, Y, Z. Числовые значения цветового различия могут быть определены [4; 5]:

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}}\ , \qquad (1)$$

где ΔL^*, Δa^*, Δb^* – координаты цвета равноконтрастного цветового пространства;

$$\begin{aligned} \Delta a^* &= a^*_{об} - a^*_{ф} \\ \Delta b^* &= b^*_{об} - b^*_{ф} \\ \Delta L &= L^*_{об} - L^*_{ф} \end{aligned}\ , \qquad (2)$$

где «об» и «ф» – индексы цветовых координат объекта и фона соответственно.

Цветовые координаты можно определить [4, 5]:

$$\begin{aligned} L^* &= 116\left(\frac{y}{y_0}\right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500\left[\left(\frac{x}{x_0}\right)^{1/3} - \left(\frac{y}{y_0}\right)^{1/3}\right], \\ в^* &= 200\left[\left(\frac{y}{y_0}\right)^{1/3} - \left(\frac{z}{z_0}\right)^{1/3}\right] \end{aligned} \qquad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты цвета идеального рассеивателя для выбранного стандартного источника освещения.

Координаты x, y, z определяются из соотношений [4, 6]:

$$\begin{aligned} x &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda)\bar{x}(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda \\ y &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda \\ z &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda)\bar{z}(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda \end{aligned}\ , \qquad (4)$$

где λ – длина волны; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение энергии источника света; $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – ординаты кривых сложения цветов в системе XYZ; $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания образца.

Известно, что два цвета практически неразличимы при величине 4…6 ед. МКО. В качестве численного значения показателя предлагается использовать пороговую величину цветового различия, равную 6 ед. МКО. Показатель цветового различия был применен при проведении летных испытаний по оценке цифровой фотоаппаратуры (ЦФА) комплекса с БЛА «Элерон – 3», «Элерон – 10», ЦФА комплекса с БЛА «Орлан-10», ЦФА комплекса с БЛА «Тахион», устройства дистанционного зондирования информационно-навигационной системы специального назначения «Красносел-ГРС».

Показатель цветового различия позволяет сопоставлять и сравнивать между собой различные АФС в пределах требуемого диапазона пространственных частот – чем больше величина ΔE^*, тем лучше рассматриваемая система при заданных условиях

проведения летного эксперимента. Использование показателя по величине цветового различия наиболее полно учитывает особенности цветового зрения дешифровщика и позволяет сопоставлять цветные фотографические изображения при оценке качества АФС.

Список литературы

1. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. Киев: Киевское ВВАИУ, 1988. 450 с.

2. Карпович И.Н. Военное дешифрирование аэрофотоснимков. М.: Воениздат, 1990. 544 с.

3. Дубинский Г.П., Кононов В.И., Федоровский А.Ф. Методы оценки качества оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 231 с.

4. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб.: ПИТЕР, 2003. 224 с.

5. CIE. Improvement to industrial colour-difference evaluation. Vienna: CIE Publication No. 142-2001. Central Bureau of the CIE; 2001. 6 p.

6. Луизов А.В. Цвет и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.

УДК 528.854.2; 004.93'11

СХЕМА И МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

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

SCHEME AND METHODS OF HYPERSPECTRAL IMAGE CLASSIFICATION BASED ON SPECTRAL AND SPATIAL INFORMATION

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

Предлагается схема классификации гиперспектральных снимков, использующая как спектральные, так и пространственные данные. Рассматриваются различные методы выделения признаков, попиксельной классификации и уточнения картосхемы с учетом пространственных данных. Приводятся результаты экспериментального сравнения рассматриваемых методов.

Ключевые слова: гиперспектральное изображение, выделение информативных признаков, обучаемая классификация, пространственные признаки.

Введение. В последние годы в области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли наблюдается активное внедрение технологий гиперспектральной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [1]. Главными особенностями гиперспектральных изображений являются большое число спектральных каналов (которое может достигать нескольких сотен) и малая спектральная ширина каждого канала (порядка нескольких нанометров). Гиперспектральные изображения фактически являются трехмерными массивами данных, в которых два измерения соответствуют пространственным координатам, а третье – спектральной полосе, в которой выполнялось измерение; поэтому гиперспетральные изображения часто называют «гиперкубами» [2]. Значительное увеличение числа каналов в гиперспектральном изображении порождает проблему «проклятия размерности», из-за которой большинство существующих алгоритмов классификации мультиспектральных изображений становятся непригодными для гиперспектральных изображений [3]. Ограничения могут быть связаны как с теоретической невозможностью работы с данными большой размерности, так и с неприемлемым увеличением времени работы или объема используемой памяти.

В настоящей работе предлагается схема распознавания с обучением (классификации) гиперспектральных изображений, использующая как спектральную, так и пространственную информацию.

Предлагаемая схема и методы классификации. Предлагаемая в данной работе схема классификации гиперспектральных изображений состоит из трех этапов: 1) выделение признаков с целью сокращения размерности признакового пространства для дальнейшей обработки; 2) попиксельная обучаемая классификация; 3) уточнение картосхемы с помощью алгоритмов, учитывающих пространственную информацию.

Большое количество спектральных каналов в гиперспектральных изображениях приводит к невозможности применения большинства известных алгоритмов

классификации мультиспектральных изображений (например, метода максимального правдоподобия). Уменьшение числа признаков на первом этапе обработки позволяет применять традиционные алгоритмы классификации на последующих этапах. Это возможно благодаря высокой корреляции спектральных каналов.

Существует целый ряд методов для сокращения числа спектральных признаков: метод главных компонент [4], факторный анализ [5], вейвлет-преобразование [6], самоорганизующиеся карты Кохонена [7]. В данной работе используется метод главных компонент и две его модификации. ***Метод главных компонент (МГК)*** широко применяется для выделения некоррелированных комбинаций признаков среди коррелированных признаков, в том числе в задачах обработки гиперспектральных изображений. Вторым рассматриваемым алгоритмом является ***блочный метод главных компонент (БМГК)*** [7]. *БМГ*К состоит из трех этапов. На первом этапе происходит разделение множества каналов изображения на блоки на основе анализа матрицы корреляции. В один блок относятся соседние каналы, обладающие взаимной корреляцией больше некоторого порога. На втором этапе к каждому блоку каналов применяется МГК, выделяющий главные компоненты в каждом блоке. Заключительный этап состоит в выборе необходимого количества информативных компонент из каждого блока. В данном исследовании информативные признаки выбирались посредством визуального анализа полученных компонент. Этот способ позволяет эксперту наглядно оценить информативность каждого полученного признака.

Третьим рассматриваемым методом выделения признаков является ***метод Minimum Noise Fraction (MNF)*** [8]. В последние годы этот метод все чаще используется для выделения признаков в гиперспектральных изображениях. В основе метода лежит идея построения линейного преобразования признаков, при котором в новой системе координат отношение «сигнал/шум» уменьшается с ростом номера координаты. Для работы алгоритма требуется информация о дисперсии шума в каждом канале, однако на практике при отсутствии такой информации используется статистическая оценка на основе исходных данных (например, с помощью метода автокорреляции). В случае большого количества перепадов яркости на изображении автоматическая оценка шума может не обеспечить качественных результатов. В частности, в работе [10] показано, что при классификации изображений антропогенных территорий этот метод уступает по качеству методу главных компонент.

На втором этапе обработки происходит попиксельная обучаемая классификация изображения с использованием полученных на первом этапе признаков. ***Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM)*** в последние годы получил широкое распространение в задачах классификации гиперспектральных изображений [11, 12]. SVM является одним из немногих алгоритмов, которые можно корректно применять для классификации данных высокой размерности. Он реализован во многих пакетах обработки данных дистанционного зондирования (например, в пакете Exelis ENVI). В данной работе использовался алгоритм SVM с ядром на основе радиальной базисной функции (Radial Basis Function, RBF).

В качестве второго метода классификации предлагается ***метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood, ML)*** [13], который является классическим алгоритмом классификации с обучением и широко применяется при распознавании изображений. Метод реализован в большинстве пакетов обработки аэрокосмических изображений. В пространстве большой размерности при ограниченных объемах обучающей выборки данный классификатор неприменим, поэтому в данном исследовании он не применялся для классификации по полному набору признаков.

Третий этап схемы состоит из уточнения построенной картосхемы с привлечением пространственной информации. Картосхемы, полученные методами

попиксельной классификации, обладают большой раздробленностью и сложны в интерпретации. Большое количество информации на изображении заключено в пространственных признаках, поэтому их использование может существенно повысить качество получаемых картосхем. В данной работе рассматриваются три алгоритма уточнения картосхемы на основе пространственных данных: мажоритарный фильтр, вероятностный мажоритарный фильтр и метод минимального остовного леса.

Мажоритарный фильтр (МФ) [14] является простейшим алгоритмом постобработки, широко применяющимся для уменьшения раздробленности и генерализации картосхем. Каждый пиксель изображения относится к тому классу, к которому относится большая часть пикселей в окружающем его окне. Окном чаще всего является окружающая рассматриваемый пиксель окрестность квадратной формы, хотя возможно использование окрестностей других форм, например крестообразных.

Вероятностный мажоритарный фильтр (ВМФ) является модификацией обычного мажоритарного фильтра. Помимо картосхемы, полученной в ходе попиксельной классификации, метод также использует веса, характеризующие вероятность принадлежности каждого пикселя к выбранному классу. При применении фильтра каждый пиксель относится к тому классу, который имеет наибольшую сумму весов в окружающем пиксель окне. Вероятность принадлежности пикселя к классу можно получить, например при использовании классификатора максимального правдоподобия и других вероятностных классификаторов, которые вычисляют ее в ходе работы.

Метод минимального остовного леса (Minimum Spanning Forest, MSF). Метод основан на представлении изображения в виде графа и построении на этом графе минимального остовного леса в соответствии с картосхемой, построенной попиксельным классификатором [12; 14; 15]. Вершинами графа изображения являются пиксели изображения, а ребра соединяют смежные пиксели. Вес ребра определяется с помощью некоторой функции похожести пикселей в пространстве спектральных признаков (например, спектрального угла или евклидова расстояния). Построенный граф используется в качестве источника пространственной информации для уточнения картосхемы. Вершины графа, соответствующие выбранным на картосхеме пикселям, помечаются метками классов этих пикселей. Помеченные вершины соединяются виртуальными ребрами, после чего выполняется выделение минимального остовного дерева с использованием классического алгоритма Крускала. После удаления виртуальных вершин дерево распадается на несвязанные компоненты (становится лесом). В каждой компоненте остается по одному маркеру, класс которого распространяется на всю компоненту. Чтобы обеспечить независимость результата от выбора маркеров, применяется ансамблевый подход. На каждой итерации ансамбля выбирается случайный набор маркеров, итоговая сегментация изображения строится на основе коллективного решающего правила большинства. Алгоритм обладает большей трудоемкостью по сравнению с мажоритарным и вероятностным мажоритарным фильтрами.

Результаты экспериментальных исследований. При проведении экспериментов использовались два тестовых изображения, которые широко применяются при исследовании алгоритмов обработки гиперспектральных данных. Изображение Indian Pines [16] с сенсора AVIRIS имеет размер 145×145 пикс., 225 спектральных каналов (из которых нешумовыми по визуальной оценке являются 188) из диапазона 400–2500 нм. Для изображения имеется эталонная картосхема, содержащая 16 тематических классов (кукуруза, соя, люцерна, пшеница и др.). Второе изображение (Pavia University [16]) имеет размер 340×610 пикс., 103 спектральных канала, охватывающих диапазон 350–2500 нм. Для него также имеется эталонная картосхема, состоящая из 9 тематических классов (асфальт, трава, гравий, деревья, металл и др.).

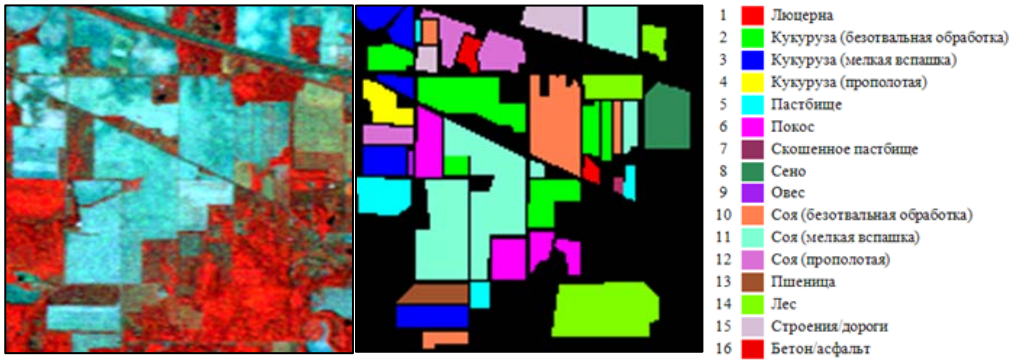


Рис. 1. RGB-композит (слева) и эталонная картосхема (справа) тестового изображения Indian Pines

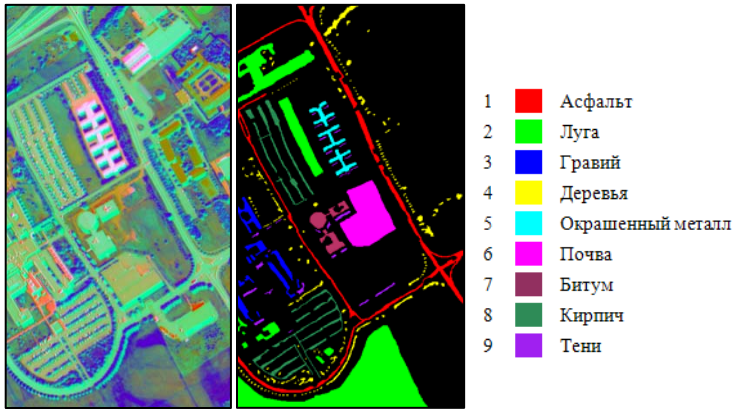


Рис. 2. RGB-композит (слева) и эталонная картосхема (справа) тестового изображения Pavia University

Целью первого эксперимента являлось сравнение методов выделения признаков и попиксельной классификации при различных объемах обучающей выборки (ОВ). В табл. 1 приведены результаты оценки качества классификации изображения Indian Pines по 15 экспериментам. Использовались три алгоритма выделения признаков: МГК, БМГК и MNF. Для метода главных компонент был использован набор из первых 21 главных компонент, для алгоритма БМГК был также сгенерирован набор из 21 признака. Для алгоритма MNF исследовались два набора с 21 и 10 признаками. Результаты показывают, что классификация по полному набору признаков обеспечивает лучшее качество, чем по набору признаков МГК. Набор признаков БМГК обеспечивает более высокое качество, чем набор МГК, а при малом объеме ОВ он оказывается существенно лучше, чем полный набор признаков. Признаки, полученные методом MNF, обеспечивают наилучшие результаты (при малых ОВ лучшее качество обеспечивает набор из 10 признаков, а при больших – набор из 21 признака). При больших объемах ОВ наборы БМГК и MNF обеспечивают практически одинаковое качество результата.

Целью второго эксперимента являлось определение оптимального количества признаков, обеспечивающих достаточное качество классификации. На рис. 3 приведен график зависимости качества классификации изображения Pavia University в зависимости от числа признаков при использовании методов МГК и MNF. Использовался метод классификации SVM. График показывает, что при использовании более 16 признаков качество классификации не увеличивается, а в некоторых случаях даже уменьшается. Для дальнейших экспериментов использовались наборы из 15 признаков.

Таблица 1

Зависимость точности классификации (%) изображения Indian Pines от объема обучающей выборки

Классификатор	Набор признаков	Число признаков	Объем обучающей выборки					
			25	**50**	**100**	**200**	**300**	**400**
SVM	МГК	21	69,0	75,7	82,2	85,3	84,8	85,3
	БМГК	21	75,2	79,8	83,7	87,1	87,8	87,7
	MNF	21	74,9	81,0	85,7	**89,3**	**89,8**	**89,9**
	MNF	10	**80,7**	**83,5**	**86,3**	87,7	88,1	87,6
	Исходные признаки	188	70,8	78,2	83,6	87,5	87,9	86,8
ML	МГК	21	52,6	75,1	81,1	84,3	82,2	80,8
	БМГК	21	54,6	76,7	82,2	85,0	83,0	81,3
	MNF	21	57,5	78,9	**84,6**	**87,4**	85,2	83,1
	MNF	10	**77,6**	**82,2**	**84,6**	85,7	**86,0**	**85,6**

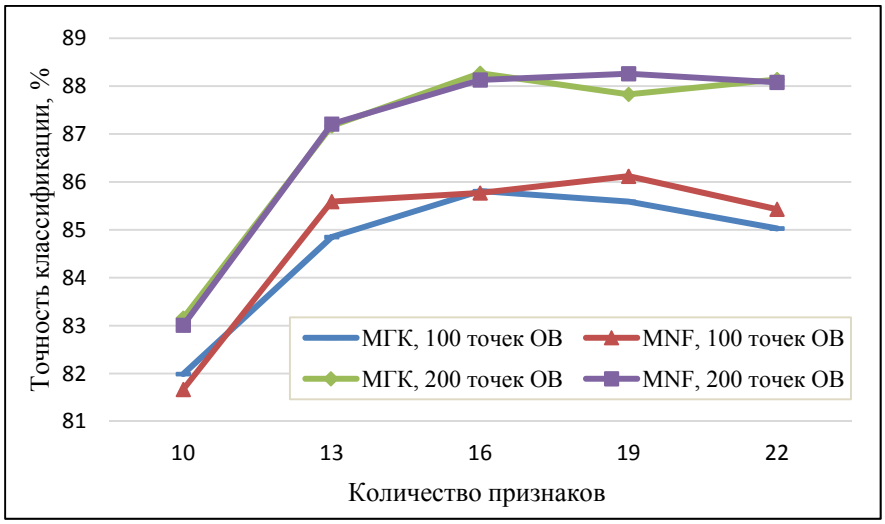


Рис. 3. Зависимость качества классификации от числа признаков при использовании алгоритма SVM

В табл. 2 приведены результаты оценки качества классификации изображения Pavia University по 15 экспериментам. Использовалось три алгоритма выделения признаков: МГК, БМГК и MNF. На данном изображении признаки, полученные с помощью МГК и БМГК, обеспечивают более высокое качество классификации, чем признаки MNF.

Таблица 2

Зависимость точности классификации (%) изображения Pavia University в зависимости от объема обучающей выборки

Классификатор	Набор признаков	Объем обучающей выборки					
		25	**50**	**100**	**200**	**300**	**400**
SVM	Исходные признаки	77,93	82,32	**87,23**	**89,88**	**91**	**91,52**
	МГК	77,32	81,78	84,93	87,45	88,5	88,78
	БМГК	**78,78**	**84,03**	**86,38**	**88,37**	**89,35**	**89,75**
	MNF	77,31	82,21	85,44	87,36	88,07	88,84
ML	МГК	**77,02**	**81,37**	**84,13**	**85,81**	**86,92**	**87,68**
	БМГК	75,25	80,48	83,45	85,39	86,71	87,56
	MNF	74,73	80,33	83,31	85,23	86,47	87,33

Третий эксперимент посвящен исследованию методов уточнения картосхем с помощью пространственной информации. В табл. 3 приведены результаты сравнения различных алгоритмов постобработки. В эксперименте использовались оба тестовых изображения, для каждого из которых использовался набор из 15 признаков, полученных методом MNF, и обучающие выборки объемом по 100 точек. В таблице приведены средние значения и стандартные отклонения по результатам 50 экспериментов, отличающихся выбором точек обучающей выборки. Для МФ и ВМФ использовалось окно размером 5×5 пикселей. Для проверки использовались оба алгоритма классификации (метод ВМФ применялся только совместно с методом максимального правдоподобия). Тесты показывают, что привлечение пространственной информации позволяет существенно повысить качество классификации изображений. Метод MSF показывает наилучшие результаты при использовании с методом SVM, однако обладает высокой трудоемкостью. Метод ВМФ обеспечил самое высокое качество картосхем, однако его можно применять только с методом максимального правдоподобия.

Таблица 3

Точность классификации при использовании различных алгоритмов уточнения картосхем

Изображение	Алгоритм постобработки	ML		SVM	
		Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Indian Pines	Без обработки	86,24	0,66	86,72	0,7
	МФ	93,61	0,89	92,21	0,84
	ВМФ	**93,66**	0,93	–	–
	MSF	92,29	1,03	**92,96**	0,85
Pavia University	Без обработки	89,35	0,82	85,14	0,73
	МФ	96,01	0,8	92,26	0,81
	ВМФ	**96,09**	0,79	–	–
	MSF	95,08	0,8	**93,53**	0,82

Заключение. В работе предложена схема классификации гиперспектральных изображений, состоящая из трех этапов: выделение признаков, попиксельная классификация, уточнение картосхемы с помощью пространственной информации. На каждом этапе было рассмотрено несколько хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) для рассмотренных изображений методы выделения признаков позволяют на порядок сократить размерность пространства признаков без существенного ухудшения качества классификации;

2) для классификации изображения Pavia University достаточно 15 признаков, дальнейшее увеличение числа признаков не дает улучшения качества классификации;

3) для изображения Indian Pines при использовании обучающих выборок малого объема наилучшее качество классификации обеспечивает набор из 10 признаков MNF, при использовании обучающих выборок большего объема – набор из 21 признака MNF;

4) для изображения Pavia University наилучшие результаты обеспечивают признаки МГК и БМГК;

5) привлечение пространственной информации для уточнения результатов попиксельной классификации позволяет повысить точность классификации на 6–8 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 13-07-12202-офи_м, 14-07-31320-мол_а).

Список литературы

1. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

2. Borengasser M. Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications. CRC Press, 2004. 128 p.

3. Jain A.K., Duin R.P.W., Mao J. Statistical Pattern Recognition: A Review // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22, No. 1. P. 4–35.

4. Остриков В.Н., Смирнов С.И., Михайлов В.В. Адаптация методов классификации данных гиперспектральной съемки для применения в пространстве главных компонент // Тез. докл. Двенадцатой всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 10-14 ноября 2014 г.). М.: ИКИ РАН, 2014. С. 68. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4482.

5. Lavanya A., Sanjeevi S. An improved band selection technique for hyperspectral data using factor analysis // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2013. Vol. 41.2. P. 199–211.

6. Bruce L.M., Koger C.H., Jiang L. Dimensionality reduction of hyperspectral data using discrete wavelet transform feature extraction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. P. 2331–2338.

7. Chen L. et. al. An improved SOM algorithm and its application to color feature extraction // Neural Computing and Applications. Vol. 24, Issue 7-8. Berlin: Springer, 2014. P. 1759–1770.

8. Пестунов И.А., Мельников П.В. Метод главных компонент и его модификации в задачах классификации гиперспектральных данных // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015. Т. 4, № 2. С. 45–50.

9. Vermillion S.C., Sader S.A. Use of the Minimum Noise Fraction (MNF) Transform to Analyze Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data of Northern Forest Types // AVIRIS Workshop. JPL Publication, 1999. P. 7.

10. Потатуркин О.И., Борзов С.М. Обработка гиперспектральных спутниковых изображений при исследовании антропогенных и природных объектов [Электронный ресурс]. URL: http://conf.ict.nsc.ru/dicr2014/ru/reportview/248576.

11. Кузнецов А.В., Мясников В.В. Сравнение алгоритмов управляемой поэлементной классификации гиперспектральных изображений // Компьютерная оптика. Т. 38-3. Самара: СГАУ, 2014. С. 494–502.

12. Tarabalka Y., Chanussot J., Benediktsson J.A. Segmentation and classification of hyperspectral images using minimum spanning forest grown from automatically selected markers // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2010. Vol. 40.5. P. 1267–1279.

13. Richards J.A., Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 240 p.

14. Hader D.P. Image Analysis: Methods and Applications. London: CRC Press, 2000. 480 p.

15. Пестунов И.А., Мельников П.В., Дубровская О.А., Синявский Ю.Н., Харук В.И. Обнаружение и картирование повреждений кедровых древостоев по изображениям со спутника Pleiades // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апр. 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов: в 2 т. Т. 2. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 357–366.

16. Hyperspectral Remote Sensing Scenes [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ehu.eus/ccwintco/index.php?title=Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes (дата обращения: 22.06.2014).

УДК 528.856

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОБНОВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

М. Р. Пономаренко
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
e-mail: dominikana_sun@mail.ru

DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE MAPPING METHODS USING REMOTE SENSING DATA AND GIS-TECHNOLOGIES

M. R. Ponomarenko
National Mineral Resources University (Mining University)
E-mail: dominikana_sun@mail.ru

Проанализированы дешифровочные свойства данных Cosmo-SkyMED и представлена методика обработки радарных снимков для целей крупномасштабного картографирования. Разработанные методы апробированы, в качестве картографируемой территории выбран участок Кольского полуострова. На основе полученных результатов показано, что при наличии дополнительных материалов и выполнении тщательной предварительной обработки радарные снимки могут быть использованы для создания крупномасштабных карт. Созданная методика позволит выполнять регулярное обновление карт.

Ключевые слова: радиолокационная съемка, дешифрирование радарных снимков, крупномасштабные карты, Кольский полуостров, Cosmo-SkyMED, ASTER-GDEM, SPOT 5.

Введение

В настоящей работе предлагаются методы обновления крупномасштабных карт на основе данных спутниковой радарной съемки. Картографируемой территорией является центральная часть Кольского полуострова, район г. Кировска Мурманской области. Здесь расположен комбинат «Апатит», который является градообразующим предприятием Кировска и Апатитов. Постоянное развитие производственной инфраструктуры предприятия обуславливает необходимость актуализации пространственных данных. Это во многом затруднено сложными климатическими условиями региона: количество светлых и безоблачных дней в году невелико, продолжительность залегания снежного покрова значительна, поэтому период, когда возможно проведение инструментальных съемок, сильно ограничен. Решением этой проблемы может стать использование данных радиолокационного зондирования. Радиолокационная съемка позволяет вести наблюдения в любое время суток вне зависимости от освещенности и облачного покрова, а также обеспечивает высокое пространственное разрешение снимков. В данном исследовании предлагается использовать радарные снимки в качестве исходных данных для крупномасштабного картографирования.

Методы и результаты

Основным источником информации послужил снимок Cosmo-SkyMED-2 на г. Кировск и прилегающие территории (рис. 1). Пространственное разрешение снимка составляет 3 м, что соответствует масштабу карты 1:25000. Именно этот масштаб был принят для слоев создаваемой карты.

В ходе дешифрирования в качестве вспомогательного материала был использован снимок SPOT 5, пространственное разрешение которого составляет 5 м, дата съемки – 11.08.2012.

Рис. 1. Фрагмент исходного снимка Cosmo-SkyMED. Дата съемки – 25.09.2014, пространственное разрешение – 3 м, поляризация – HH

Обработка данных осуществлялась в программах NEST, ERDAS Imagine, QGIS.

Предварительная обработка данных Cosmo-SkyMED была выполнена в NEST и включала геокодирование, орторектификацию, радиометрическую коррекцию, устранение спекл-шумов. В ходе предварительной обработки использовался продукт ASTER GDEM – глобальная цифровая модель рельефа, построенная по данным Terra/ASTER. ASTER GDEM охватывает исследуемые в данной работе территории, обладает высокой точностью и при этом предоставляется на бесплатной основе [1].

Для улучшения изображения была выполнена его дополнительная фильтрация. Фильтры могут быть использованы для выделения контуров, изменения резкости, сглаживания, размытия изображения [2]. Все это позволяет упростить дальнейшее дешифрирование снимка. Программа NEST включает большой набор фильтров, которые были тщательно проанализированы. В результате были выбраны фильтры, выделяющие границы, – Roberts Cross North-East и Compass Edge Detector [3]. Полученные отфильтрованные изображения были использованы непосредственно для распознавания объектов.

Тематическая обработка включала визуальное и полуавтоматическое дешифрирование с использованием дополнительных материалов. Набор исходных данных включал топографические карты на территорию Мурманской области, данные OpenStreetMap, результаты натурных измерений карьера «Центральный». Различные способы автоматического дешифрирования позволяют распознать те или иные объекты, но четкое выделение их границ и контуров в итоге все равно осуществляется силами оператора. Распознавание объектов осложнено в силу особенностей радарных изображений: трудности возникают из-за угла наклона съемки. Кроме того, возможность дешифрирования объектов зависит от их размера. Векторизация распознанных объектов проводилась в программе QGIS в ручном и полуавтоматическом режиме. Это обусловлено масштабом карты и требуемой точностью. В результате были получены геоинформационные слои на каждый класс объектов.

а *б*

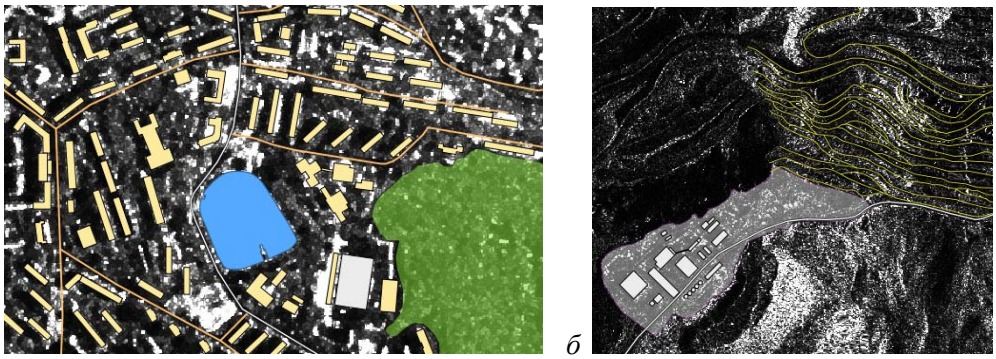


Рис. 2. Фрагмент дешифрированного снимка: *а* – жилой квартал г. Кировска; *б* – промплощадка и уступы бортов карьера «Центральный»

Характеристики дешифрируемых объектов:

1. Гидрография. Объекты площадной гидрографии были выделены по результатам контролируемой классификации, выполненной по радарному снимку в программе ERDAS. Лучше всего выделяются объекты площадью более 1500 м^2, с небольшими объектами возникают трудности. Точность выделения рек и каналов напрямую зависит от их ширины: хорошо дешифрируются объекты шириной более 10 м. Кроме того, дешифрирование может быть осложнено наличием прибрежных объектов, характером берегов. В связи с этим выделение объектов линейной гидрографии выполнялось исключительно вручную с использованием дополнительных материалов.

2. Населенные пункты и промышленные объекты. Выделение данных объектов осуществлялось в ручном режиме. Наилучшим образом дешифрируются здания и строения площадью от 1000 м^2.

3. Дорожная сеть. Автомобильные и железные дороги выделялись вручную с достаточной точностью, за исключением некоторых дорог, проходящих через населенные пункты и частично заслоненных зданиями. Кроме того, трудности возникают с определением количества путей железных дорог – они практически не распознаются. В целом лучше всего выделяются дороги шириной более 10 м.

4. Рельеф. Известно, что по радарным снимкам можно построить ЦМР, но для этого нужна многопроходная серия снимков с определенным временным интервалом и соотношением пространственного базиса. В данной работе по снимку дешифрировался общий характер рельефа, очертания объектов. Стоит отметить, что на территории карьера отчетливо дешифрируются уступы и откосы.

5. Растительность. В процессе дешифрирования растительного покрова удалось выделить только определенные объекты (например, городские парки). В дальнейшем планируется использовать возможности текстурного анализа.

Выводы

Радарные снимки высокого разрешения позволяют выполнить дешифрирование большей части объектов местности. Для более точного и достоверного дешифрирования необходимо использовать вспомогательные материалы и выполнять тщательную предварительную обработку снимков для улучшения изображений. Разработанная методика может быть использована для обновления большинства элементов содержания крупномасштабных карт.

Список литературы

1. Дубинин М.Ю. Общее описание ASTER GDEM [Электронный ресурс] // GIS-Lab: Географические информационные системы и дистанционное зондирование. 2009. – URL: http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html

2. Карионов Ю.И., Малявина Н.К. Предварительная оценка дешифровочных свойств радарных космических снимков TerraSAR-X [Электронный ресурс] // Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. 2008. – URL: http://www.racurs.ru

3. Next ESA SAR Toolbox User Manual [Электронный ресурс] // European Space Agency. 2014. – URL: http://corp.array.ca/nest-web/help/index.html

УДК 519.24

ГАРАНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ И ТЕХНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

А. Н. Рогалев[(1)], А. А. Рогалев[(2)]
[(1)]ИВМ СО РАН
e-mail: rogalyov@icm.krasn.ru
[(2)]ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: ran@akadem.ru

В самых разнообразных областях человеческой деятельности неизменно возникает потребность в анализе влияния различных возмущений на состояние объекта или системы. Для этого анализа необходимо знать границы зон опасных состояний и пороговые значения параметров системы, которые соответствуют границам этих зон. Цель этой работы состоит в применении методов гарантированного оценивания решений систем дифференциальных уравнений [1–7] к нахождению оценок множеств решений и множеств значений функционалов, построенных на решениях этих систем.

Для многих систем, особенно технических, характерно то, что они функционируют в течение конечного промежутка $u(\cdot),v(\cdot)$ времени. При этом представляет интерес не только факт устойчивости или неустойчивости этих систем, но и количественные оценки решений, а также принадлежность значений этих решений областям безопасности функционирования. Многие параметры реальных объектов могут быть измерены только с ошибкой. Чтобы обеспечить гарантированность оценок, требуется учитывать все значения этих параметров. В этой работе предлагается оценивать области решений при конечных, постоянно действующих возмущениях гарантированными методами, основанными на аппроксимации оператора сдвига вдоль траектории. Предполагается, что состояние исследуемого управляемого объекта однозначно характеризуется вектором состояний y в фазовом пространстве состояний. Движение объекта $y(t)$ зависит от внешних воздействий двух типов. Воздействия, определяемые нашим выбором, назовем управлениями, и будем обозначать вектором $u()$. Соответственно факторы, на которые мы повлиять не можем, назовем возмущениями или помехами и будем обозначать вектором $v()$. Выбор возможных реализаций $u(\cdot),v(\cdot)$ стеснен ограничениями $u \in U, v \in V$, отражающими особенности рассматриваемой задачи. Так, в качестве этих воздействий могут быть взяты углы отклонения рулей, энергетические ресурсы, ограничения на допустимые условия эксплуатации системы и т. п.

Рассмотрим динамическую систему, состояние которой в каждый момент времени $t \in T = [t_0, t_{\max}]$ характеризуется вектором $y(t) \in R^n$ и описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, u), \tag{1}$$

где $f - n-$мерная вектор-функция; $m-$мерный вектор u в каждый момент времени характеризует действие возмущающих сил, о которых известно, что

$$u(t) \in U(t),\ U(t) \subset R^m. \tag{2}$$

Пусть задана некоторая функция $u_{base}(t)$, удовлетворяющая условию (2) при всех $t \in T$, начальное состояние $y_{base}(t_0)$ и соответствующее им решение $y_{base}(t)$ системы

(1). Назовем это решение невозмущенным движением системы, а всякое решение уравнения (1), отвечающее всевозможным начальным значениям $y_0 \in Y_0$ и функциям $u(\cdot)$, удовлетворяющих при всех $t \in T$ условию (2), – возмущенным движением системы.

Для описания возмущенного движения наряду с системой (1) – (2) можно использовать следующую пару включений

$$\frac{dy}{dt} \in F(t,y), \tag{3}$$

$$y(t_0) \in Y_0, \tag{4}$$

где множество $F(t,y) \subset R^n$ при всех $(t,y) \in T \times R^n$ характеризует влияние постоянно действующих возмущений, а множество $Y_0 \subset R^n$ характеризует возмущения начального состояния системы. От описания системы в форме (1)–(2) легко перейти к описанию в форме (3), полагая

$$F(t,y) = \bigcup \left\{ f \in R^n : f = f(t,y,u) \right\}.$$

Под решением дифференциального включения (3), соответствующим начальному состоянию y_0, будем понимать абсолютно непрерывную функцию $y : T \to R^n$ такую, что $y(t_0) = y_0$, $\frac{dy(t)}{dt} \in F(t,y(t))$ почти при всех $t \in T$. В дальнейшем всюду предполагается, что $y_{base}(t_0) \in Y_0$ и функция $y_{base}(t)$ является решением дифференциального включения (3), соответствующего начальному состоянию $y_{base}(t_0)$.

Пусть при каждом $t \in T$ задано множество $Y(t) \subset R^n$ такое, что $Y_0 \subset Y(t_0)$. Понятие технической устойчивости определяется следующим образом.

Определение. Систему (3) назовем устойчивой относительно $\{Y_0, F, Y\}$ на T, если каждое ее решение $y(\cdot)$, соответствующее начальному состоянию $y_0 \in Y_0$, удовлетворяет условию $y(t) \in Y(t)$ при всех $t \in T$. С другой стороны, рассматривая соотношение (3)–(4) как некоторую управляемую систему, можно определить понятие множества достижимости.

Определение. Множество $Y(t_0, Y_0, \tau)$ назовем множеством достижимости системы (3) в момент времени τ, порожденным множеством Y_0 в момент времени t_0, если для каждой точки $y \in Y(t_0, Y_0, \tau)$ существует решение $y(\cdot)$ дифференциального включения (3) такое, что $y(t_0) \in Y_0$, $y(\tau) = y$.

Их этих определений следует очевидное утверждение.

Утверждение 1. Система (3) устойчива относительно $\{Y_0, F, Y\}$ на T, если при всех $t \in T$ $Y(t_0, Y_0, \tau) \subset Y(t)$.

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

$$v(\cdot) \in V. \tag{5}$$

Решение этой задачи позволит проверить условия (2) в форме $G(t) \in V$. Для многих задач ограничения на возмущающие воздействия могут носить только геометрический характер. Это значит, что в каждый момент времени *t* возмущение *w(t)* может быть любым из некоторого выпуклого компактного множества *Q*. Один из

этапов исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем связан с необходимостью построения областей допустимых отклонений фазовых переменных исследуемой системы от послеаварийного установившегося режима. В ряде случаев эта задача сводится к оцениванию области притяжения послеаварийного положения равновесия рассматриваемой модели системы.

Рассмотрим позиционную с учетом действия регулятора скорости модель электроэнергетической системы, при определении которой принимаются следующие допущения: синхронная электроэнергетическая система: станции – шины бесконечной мощности [7].

$$\frac{dy_1}{dt} = y_{2,},$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -16.52(y_2 + 1.134)\sin(y_1 + 1.256) + 2.161\sin 2(y_1 + 1.256) + 16.05, \qquad (6)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = -0.257 y_3 + 0.0674\cos(y_1 + 1.256) + 0.19u + 0.0235538.$$

Начальное положение системы и ограничения:

$$y_1(0) = 0.115,\ \ y_2(0) = 1.926,\ \ y_3(0) = 0.055,\ \ \left|u \le 2.589\right|.$$

Примеры границы множеств всех решений системы (6) изображены на рис. 1, 2.

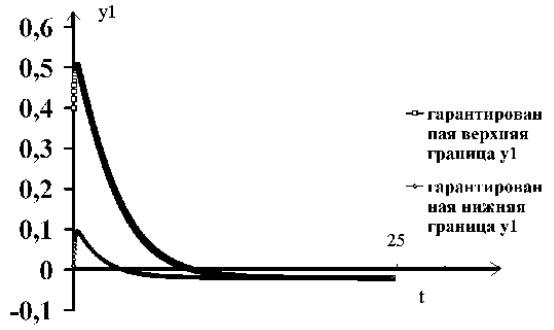


Рис. 1

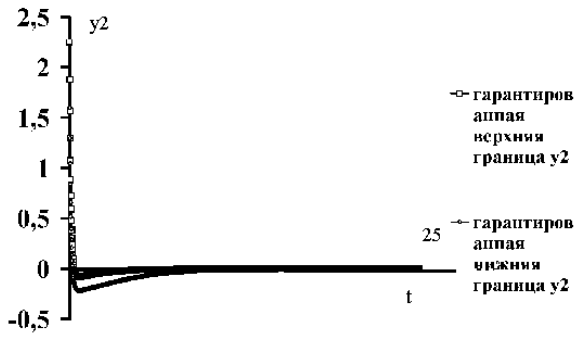


Рис. 2

Список литературы

1. Новиков В.А., Рогалев А.Н. Построение сходящихся верхних и нижних оценок решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1993. Т. 33, № 2. С. 219–231.

2. Рогалев А.Н. Гарантированные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе преобразования символьных формул // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 5. С. 102–116.

3. Рогалев А.Н. Гарантированные оценки и построение множеств достижимости для нелинейных управляемых систем // Вестник СибГАУ. 2010. 5(31). С. 148–154.

4. Рогалев А.Н., Рогалев А.А. Численный расчет включений фазовых состояний в задачах наблюдения за движением самолета // Вестник СибГАУ. 2012. 1(41). С. 53–57.

5. Rogalev A.N. Calculation of Guaranteed Boundaries of Reachable Sets of Controlled Systems // ISSN 8756-6990, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Allerton Press. 2011. V. 47, № 3. P. 287–296.

6. Рогалев А.Н. Безопасность сложных систем и оценки областей допустимых отклонений // Современные технологии, системный анализ, моделирование. Иркутск, 2014. № 4 (44). С. 84–91.

7. Путилова А.Т., Тагиров М.А. Критерии устойчивости электроэнергетических систем. Электрические станции, сети и системы (Итоги науки и техники, 1969). М.: ВИНИТИ, 1969. С. 5–63.

УДК 574

ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД, ОЦЕНКА УЩЕРБА

Т. А. Рыбина
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
e-mail: rybinata@mail.ru

В работе приводится методика оценки площадей пожаров на крупной территории. Особое внимание уделяется выбору спектральных каналов для опознавания гарей и проблемам их автоматического дешифрирования, сложностям цветопередачи при создании мозаики космических снимков. Получены площади пожаров (лесных и торфяных) в муниципальных районах области. Приводится оценка ущерба животному миру в результате уничтожения среды их обитания.

Ключевые слова: распространение пожаров, площадь гари, Томская область.

Введение

Томская область расположена в таежной зоне, значительная ее часть заболочена. Серьезной проблемой для населения и предприятий области являются природные пожары. Наиболее крупные пожары произошли в 2012 г., когда население административного центра области г. Томска задыхалось от смога. Для оценки площадей и распространения пожаров был создан векторный слой гарей на основе снимков Landsat-8, имеющихся в свободном доступе. Методика создания векторного слоя гарей и анализ распространения пожаров приводятся ниже.

Методы

Перед началом работ были созданы каталог космических снимков и схема покрытия области. С сервера USGS скачивались снимки только летнего периода 2013 г. с минимальной облачностью. Если часть снимка была повышенной облачности, дополнительно скачивался снимок поздних дат с меньшей облачностью. Информация о снимке – название, дата съемки, географическая зона – заносились в каталог снимков. Каждому снимку присваивался свой идентификационный номер id. Размещение снимков на территории области фиксировалось на схеме покрытия в виде полигонов. Каждому полигону присваивался тот же id, что и в каталоге.

Всего для покрытия территории области было использовано 16 малооблачных снимков космического аппарата Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м, относящихся к 44, 43 и 45 географической зоне (рис. 1).

Для опознавания контуров гари была проведена работа по выбору воспринимаемого цветового синтеза свежих гарей (рис. 2). При использовании синтеза естественных цветов (для версии 8 аппарата Landsat) – это каналы 4–3–2 – свежие гари выглядят фиолетовыми и схожи с цветами болот. В искусственном спектре – каналы 5–4–3 – гарь имеет зеленый цвет, схожий с цветом топей. Для работы мы предпочли использовать синтез каналов 7–5–3, поскольку в нем четко различаются свежие гари – ярко-красного цвета – хорошо отличаемые от цветов естественных ландшафтов.

Работа с каналами снимка проводились с помощью алгоритмов работы в программном обеспечении ENVI.

Векторизация контуров гари проводилась в программном комплексе ArcGis вручную, поскольку методы обучения не позволили четко установить их границы из-за:

– мозаичности пожара (выгорает подлесок, кроны деревьев зеленые);

– разницы в спектральных характеристиках типов растительности (лиственные и хвойные леса, болота, луга);

– наложения гарей разных сроков на одном участке (дву-, трехлетней давности).

Растровая подложка космических снимков, или мозаика, создавалась для установления типа пожара (лесной или торфяной) и анализа размещения пожаров по области (рис. 3).

ID карты	Директорий	Data Y.m.d	Projection	Datum	X Pixel/Y Pixel
1	LC81460202013197LGN00	2013-07-16	UTM, Zone 45 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
2	LC81480202013195LGN00	2013-07-14	UTM, Zone 45 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
3	LC81480212013195LGN00	2013-07-14	UTM, Zone 45 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
4	LC81500202013209LGN00	2013-07-28	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
5	LC81500212013209LGN00	2013-07-28	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
6	LC81520182013207LGN00	2013-07-26	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
7	LC81520192013207LGN00	2013-07-26	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
8	LC81530192013198LGN00	2013-07-17	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
9	LC81540182013205LGN00	2013-07-24	UTM, Zone 43 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
10	LC81540202013173LGN00	2013-06-22	UTM, Zone 43 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
11	LC81540192013221LGN00	2013-08-09	UTM, Zone 43 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
12	LC81460202013197LGN00	2013-08-09	UTM, Zone 45 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
13	LC81500182013209LGN00	2013-07-28	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
14	LC81520202013175LGN00	2013-06-24	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
15	LC81490182013218LGN00	2013-08-06	UTM, Zone 45 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15
16	LC81500192013209LGN00	2013-07-28	UTM, Zone 44 North	WGS-84	30*30 Meters Pan=15

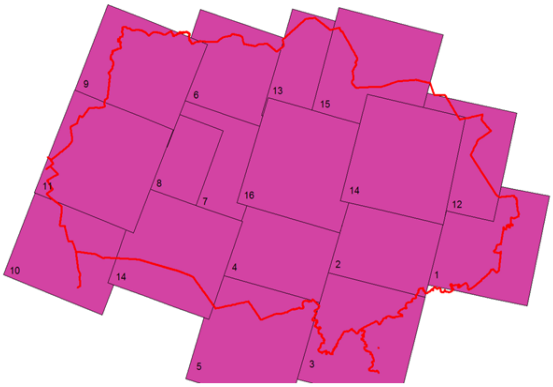


Рис. 1. Каталог снимков и схема покрытия территории области снимками Landsat8

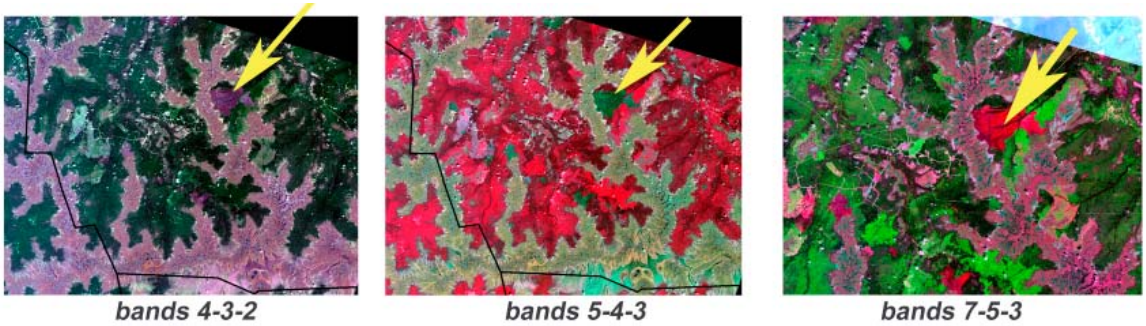


Рис. 2. Выбор синтезов каналов Landsat-8 для векторизации гари (стрелкой показан один участок гари)

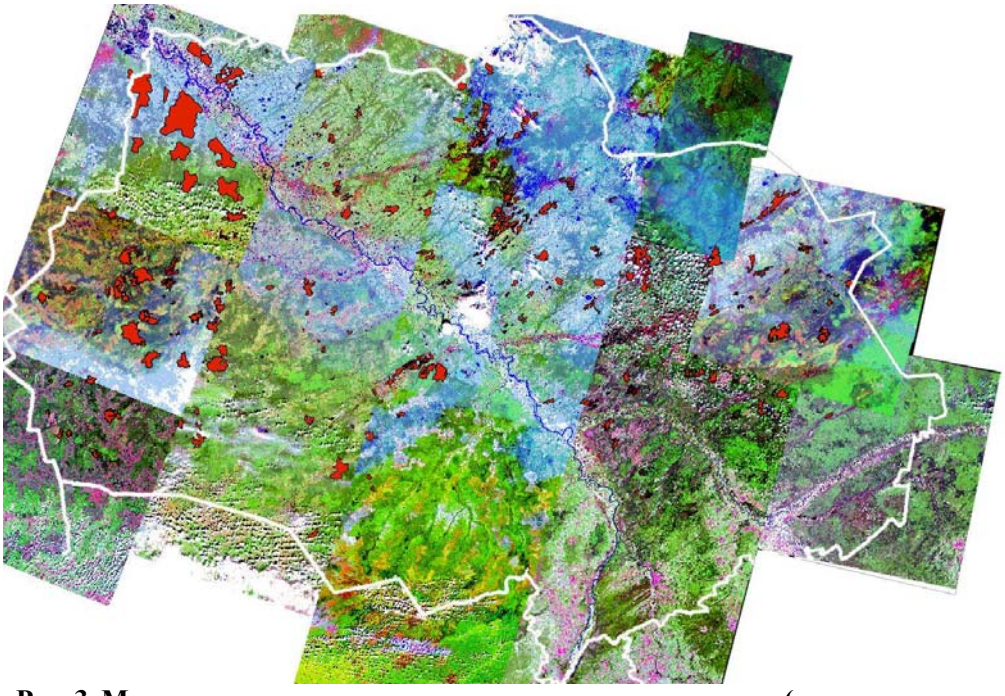


Рис. 3. Мозаика космических снимков с контурами пожаров (красные полигоны)

Нами выполнялась цветовая коррекция снимков, но общая мозаика оказалась довольно пестрой. Достичь одинаковой цветопередачи мозаики удалось только между снимками одной географической зоны и близких дат съемки. Сходство цветопередачи смежных снимков зависит от:

– облачности снимка. Сложно найти смежные снимки с близкими датами съемки и малой облачностью;

– периода вегетации растительности. Несмотря на то, что в работе использовались только летние снимки, цветопередача зависит от концентрации хлорофилла (молодые листья, зрелые листья), фенологической фазы доминирующих растений (вегетация, цветение);

– изменения гидрологического режима территории и состояния аэрозолей воздуха в летний период (расход воды, температура воды, количество растворенных веществ).

Результаты

Векторизация участков гарей показала, что за летний период 2012–2013 гг. на территории области было установлено 404 очага пожаров, общей площадью гарей 9824,09 км^2, что составляет 3,1 % её территории (таблица).

Анализ размещения лесных и болотных экосистем подвергшихся пожару показал, что 30 % пожаров области – торфяные. Граница пожара часто проходит между минеральным грунтом леса и торфяной залежью верхового болота. Это наиболее опасный тип пожаров, поскольку может длиться годами, осушая болото подземно. В целом от пожара пострадало 6260 км^2 лесов и 3305,9 км^2 болот.

Для оценки интенсивности пожаров вблизи крупных населенных пунктов использовались сведения о количестве проживающих людей в муниципальных районах области и их плотности на единицу площади, эти данные приведены в таблице.

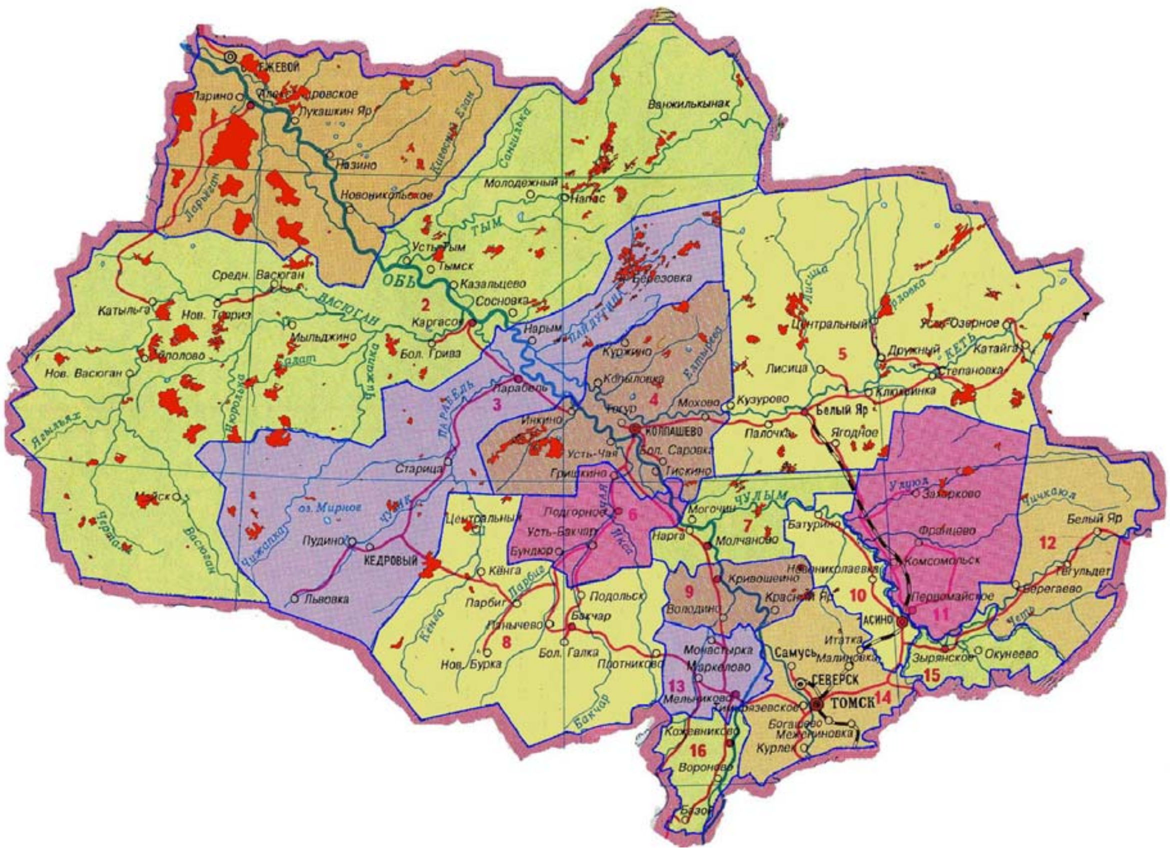
Анализ распространения пожаров показал, что максимальные площади и ущерб от пожаров выявлен в крупных северных районах области, труднодоступных и малонаселенных (Каргасокский, Александровский, Верхнекетский). Наглядно это представлено на рис. 4.

Минимальное распространение пожаров установлено в южных районах области, небольших по площади, но густонаселенных (Томский, Асиновский). Такое неравномерное распределение площадей пожаров на территории области экономически оправдано: пожарные служат защите человека в крупных населенных пунктах.

Таблица

Распространение пожаров в муниципальных районах области

Муниципальный район	Число очагов пожаров	Площади пожаров, км^2			Население р-на, чел. (А)	Площадь р-на, км^2 (Б)	Плотность насел. П=А/Б чел./км^2
		общая	торфяные	лесные			
Каргасокский	147	3297	1671	1625	20 019	86 900	0,23
Александровский	22	2959	550	2409	8 256	29 900	0,28
Верхнекетский	80	1392	574	817	16 303	43 349	0,38
Парабельский	88	997	75	922	12 366	35 846	0,34
Колпашевский	18	564	296	26	38 799	17 112	2,27
Бакчарский	13	298	2,9	295	12 418	24 700	0,50
Первомайский	10	122	14	107	17 564	15 554	1,13
Молчановский	7	99	89	10	12 724	6 351	2,00
Кривошеинский	6	49	27	22	12 499	4 400	2,84
Тегульдетский	5	26	–	26	6 377	12 300	0,52
Асиновский	5	8	7	1	34 503	5 943	5,81
Томский	3	6	–	6	71 751	10 064	7,12
Итого:	404	9824	3305,9	6260	–		



Муниципальные районы: 1 – Александровский; 2 – Каргасокский; 3 – Парабельский; 4 – Колпашевский; 5 – Верхнекетский; 6 – Чаинский; 7 – Молчановский; 8 – Бакчарский; 9 – Кривошеинский; 10 – Асиновский; 11 – Первомайский; 12 – Тегульдетский; 13 – Шегарский; 14 – Томский; 15 – Зырянский; 16 – Кожевниковский

Рис. 4. Распределение пожаров на территории муниципальных районов области

Прошедшие пожары нанесли вред не только людям, но и природным экосистемам – среде обитания животных. Для восстановления растительности, и соответственно местообитаний животных, в таежной зоне должно пройти не менее 15 лет.

Чтобы рассчитать ущерб местообитаниям охотничьих животных после пожаров, нами использовалась методика [1], принятая в Томской области во исполнение Приказа Министерства природных ресурсов РФ № 107 от 28 апреля 2008 г. Согласно ей ущерб определяется исходя из площади уничтожения с учетом коэффициентов (коэффициент воздействия КВ = 4 и коэффициент превышения Т = 1,16). Расчетная величина ущерба животному миру составляет свыше 4 558 375,9 руб. (без учета биологической продуктивности).

Исследования были выполнены при поддержке гранта РФФИ № 13-05-98026 р_сибирь_а, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ – НШ-5946.2014.5, а также grant BIO-GEO-CLIM (Resolution of RF Government No. 220, Agreement No. 14.B25.31.0001).

Список литературы

1. Методические рекомендации по определению размера вреда окружающей среде (Животный мир). ОГУ «Облкомприрода». Томск, 2006.

УДК 528.88, 528.854, 504.4, 004.932.2, 004.93'14

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «КАНОПУС-В», «РЕСУРС-П» И «МЕТЕОР-М» ДЛЯ МОНИТОРИНГА И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПАВОДКОВОЙ СИТУАЦИИ

С. А. Рылов[(1)], О. Г. Новгородцева[(2)], И. А. Пестунов[(1)], О. А. Дубровская[(1)], Ю. Н. Синявский[(1)]
[(1)]Институт вычислительных технологий СО РАН
e-mail: RylovS@mail.ru
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru
e-mail: olga@ict.nsc.ru
e-mail: yorikmail@gmail.com
[(2)]СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета»
e-mail: novg-oksana@yandex.ru

DATA PROCESSING TECHNOLOGY FOR «CANOPUS-V», «RESURS-P» AND «METEOR-M» SATELLITE IMAGES FOR MONITORING AND MAPPING OF FLOOD SITUATION

S. A. Rylov[(1)], O. G. Novgorodtseva[(2)], I. A. Pestunov[(1)], O. A. Dubrovskaya[(1)], Yu. N. Sinyavskiy[(1)]
[(1)]Institute of Computational Technologies SB RAS
e-mail: RylovS@mail.ru
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru
e-mail: olga@ict.nsc.ru
e-mail: yorikmail@gmail.com
[(2)]State Research Center "Planeta" – Novosibirsk
e-mail: novg-oksana@yandex.ru

Предложена технология обработки спутниковых изображений высокого и среднего разрешения для мониторинга паводковой ситуации, позволяющая определять границы и количественные оценки площадей подтоплений. Технология применяется в СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» при создании карт паводковой ситуации по спутниковым данным «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для потребителей Росгидромета и региональных служб МЧС.

Ключевые слова: спутниковые данные, мониторинг, паводки, выделение водных объектов, алгоритм кластеризации ECCA.

Введение

Паводковая обстановка на реках Сибирского федерального округа (СФО) является одной из наиболее острых проблем и требует постоянного контроля. В период весеннего половодья и дождевых паводков уровень воды в бассейнах рек СФО часто превышает расчетный уровень критических отметок подъема воды, что приводит к подтоплению не только пойменных и садовых участков, но и населенных пунктов. В середине мая 2015 г. на реках Новосибирской области наблюдались самые сильные превышения уровня воды за последние 46 лет. Уровень воды в реке Обь поднимался до отметки в 527 сантиметров при критической отметке для дачных участков в 360 см, а для жилых домов – в 550 см. Причиной сложившейся паводковой ситуации послужил обильный приток воды из рек, впадающих в Новосибирское водохранилище и выше него по течению. Увеличенные объемы сброса воды в нижний бьеф Новосибирской ГЭС привели к затоплению 6200 дачных участков в пойме реки Обь.

Карты паводковой обстановки являются одним из основных источников информации для региональных служб МЧС при принятии решений. Основные данные для мониторинга паводковой ситуации – ежедневные оперативные наблюдения за состоянием водных объектов. Русла сибирских рек, таких как Обь, Енисей и их комплексы, слишком велики, чтобы при наземном изучении находиться в едином поле зрения наблюдателя, и не могут изучаться сразу по всей площади распространения потенциальных зон затопления. Использование данных дистанционного зондирования позволяет эффективно решать эту проблему.

В данной работе представлена технология обработки данных высокого и среднего пространственного разрешения с российских космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» [1] для оперативного мониторинга паводковой ситуации. Эта технология позволяет выделять границы и площади подтоплений по данным ДЗЗ для составления карт паводковой обстановки.

Краткий обзор методов выделения водных объектов

В настоящее время известен целый ряд методов выделения водных объектов по данным оптической спутниковой съемки [2]: 1) пороговые методы с использованием определенного спектрального канала или комплексного спектрального признака (индекса); 2) пороговое дерево решений на основе заданных спектральных характеристик; 3) классификация с обучением; 4) использование алгоритмов кластеризации [3; 4] и др.

Самым простым способом выделения водных объектов является пороговое разделение пикселей по значениям яркости в заданном канале. Обычно используется спектральный канал из ближнего или среднего инфракрасного диапазона, потому что в этих диапазонах наблюдается сильное поглощение излучения водой, в отличие от растительности и сухой почвы. Однако этот метод подвержен влиянию шума и допускает ошибки, относя теневые области и часть антропогенных объектов к воде [5].

Помимо исходных спектральных каналов широко распространено использование различных индексов, особенно водного индекса NDWI [6]. Данный индекс использует видимый зеленый (G) и ближний инфракрасный (NIR) каналы:

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}.$$

NDWI усиливает контраст между водными поверхностями и территориями, не покрытыми водой. Предполагается, что водным объектам соответствуют положительные значения этого индекса, а остальным – отрицательные. Однако многочисленные исследования показали, что зачастую оптимальный порог отличен от нуля [7–9]. Использование водного индекса является достаточно эффективным методом, но он допускает ошибки на теневых областях [5; 10].

Построение дерева решений, использующего заданные пороги по нескольким спектральным каналам и индексам (вегетационному, водному и др.), позволяет сократить количество ошибочно отнесенных к воде объектов. Например, с помощью NDVI можно отделить «зеленую воду» (с повышенным значением NDVI) от переувлажненной почвы [2].

Для методов классификации с обучением необходимо задание обучающих выборок, что требует привлечения экспертных знаний и значительных временных затрат. Это не позволяет использовать классификацию для обработки спутниковых данных в оперативном режиме [11].

Методы кластеризации (например, широко распространенный алгоритм ISODATA) позволяют автоматически разделить изображение на некоторое количество кластеров, из которых эксперт выбирает относящиеся к водным объектам [12]. Однако

при кластеризации зачастую к классу воды могут быть ошибочно отнесены переувлажненные почвы, тени от облаков и др. [11].

На практике применение описанных выше методов к спутниковым снимкам высокого и среднего пространственного разрешения «Канопус-В», «Ресурс-П», «Метеор-М» и применение их в оперативной работе оказалось неудовлетворительным для выделения водных объектов.

Метод выделения водных объектов

В данной работе предлагается новый двухэтапный метод выделения водных объектов и переувлажненных почв, основанный на использовании алгоритма кластеризации ECCA [13] и дерева решений, построенного с использованием средних значений спектральных характеристик кластеров.

На первом этапе производится сегментация изображения по спектральным признакам с помощью алгоритма кластеризации ECCA. Данный алгоритм является непараметрическим и обеспечивает выделение кластеров различной формы и плотности. Алгоритм ECCA основан на сеточном подходе и характеризуется высоким быстродействием, что крайне важно при оперативном мониторинге. При кластеризации в качестве информативных признаков используются красный и ближний инфракрасный каналы, а также вегетационный индекс NDVI. Экспериментальные исследования показали, что данная комбинация признаков является наиболее эффективной при выделении водных объектов. В частности, использование NDVI позволяет разделять водные и теневые области. Параметры алгоритма ECCA подбираются автоматически, обеспечивая разбиение изображения на 40-50 кластеров. В результате водные объекты выделяются в один или несколько кластеров.

На втором этапе осуществляется классификация полученных кластеров на «водные» и «неводные». Для этого используется дерево решений. Для каждого кластера вычисляют средние значения пяти спектральных характеристик: индексов NDWI и NDVI, а также нормированных на диапазон [0, 255] значений в красном и ближнем инфракрасном каналах и индекса NDVI. Использование средних значений характеристик кластеров обеспечивает повышение качества разделения при использовании порогового метода. В результате множество всех кластеров разделяется на четыре класса: 1) вода, 2) «зеленая вода», 3) переувлажненные почвы и 4) «неводные» классы.

Предложенный метод реализован на языке программирования Java в виде программного продукта. Время обработки спутниковых изображений размером десятки миллионов пикселей составляет всего несколько секунд. В отличие от известных методов предложенный подход позволяет выделять водные объекты на изображениях не только низкого и среднего, но и высокого (2–10 м) пространственного разрешения. Кроме того, данный метод позволяет выделять почвы с повышенным содержанием влаги в отдельный кластер. Однако тени от зданий, присутствующих на изображении, могут быть ошибочно отнесены в класс «переувлажненные почвы».

На рис. 1 и 2 приведены примеры обработки изображений, полученных со спутника «Канопус-В».

Составление карт паводковой обстановки

Результаты кластеризации служат основой для построения тематических карт паводковой обстановки, содержащих информацию о границах выхода воды на пойму и границах переувлажненных почв. Для построения карт паводковой обстановки использовалась геоинформационная система ArcGIS, в которой выполнялась дальнейшая обработка полученной картосхемы. Обработка заключалась в сглаживании границ, векторизации и генерализации данных. В качестве картографической основы для отображения паводковой обстановки использовались векторные карты масштаба

1:100 000 и 1:25000, а также электронная карта OpenStreetMap (http://openstreetmap.ru). Карты паводковой обстановки снабжены легендой и рамкой с элементами зарамочного оформления – градусной сеткой и всеми необходимыми выходными данными (названием карты с упоминанием территории затопления, названием спутника и сенсора, данные с которого были взяты для определения паводковой обстановки). Пример карты, построенной с использованием данных со спутника «Канопус-В», приведен на рис. 3.

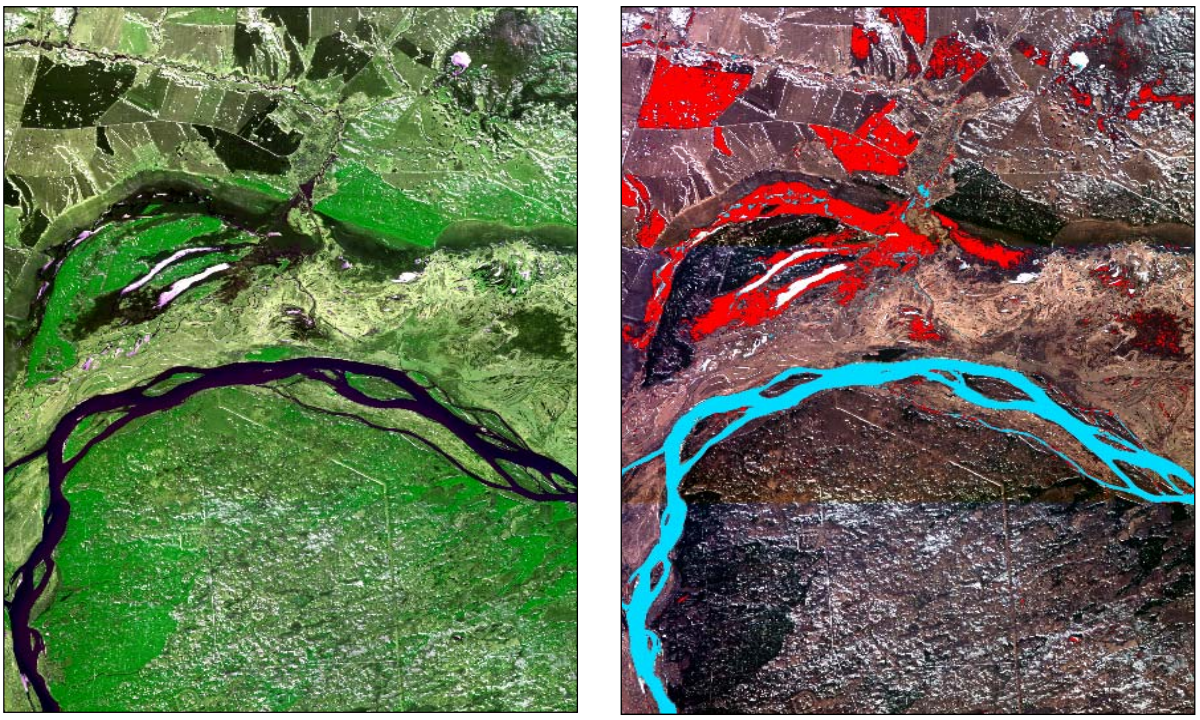


Рис. 1. Пример обработки изображения, полученного со спутника «Канопус-В» 13 апреля 2014. Слева – RGB-композит исходного изображения (красный, ближний инфракрасный и зеленый каналы), справа – результат выделения воды (выделена голубым цветом) и переувлажненных почв (выделены красным цветом)

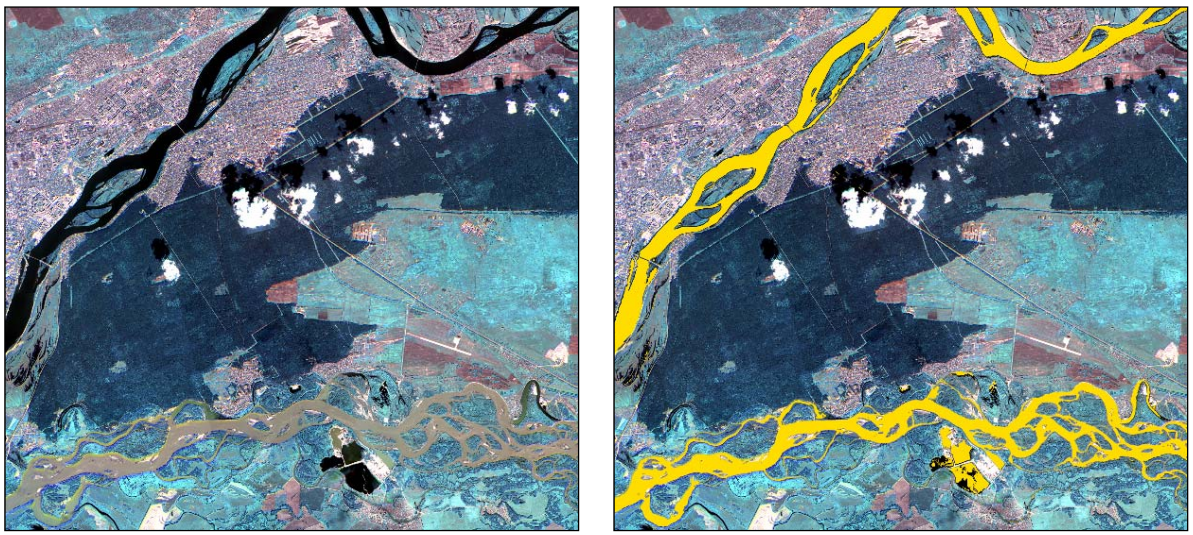


Рис. 2. Пример обработки изображения, полученного со спутника «Канопус-В» 25 июня 2015. Слева – RGB-композит исходного изображения (красный, зеленый и синий каналы), справа – результат выделения воды (выделена желтым цветом)

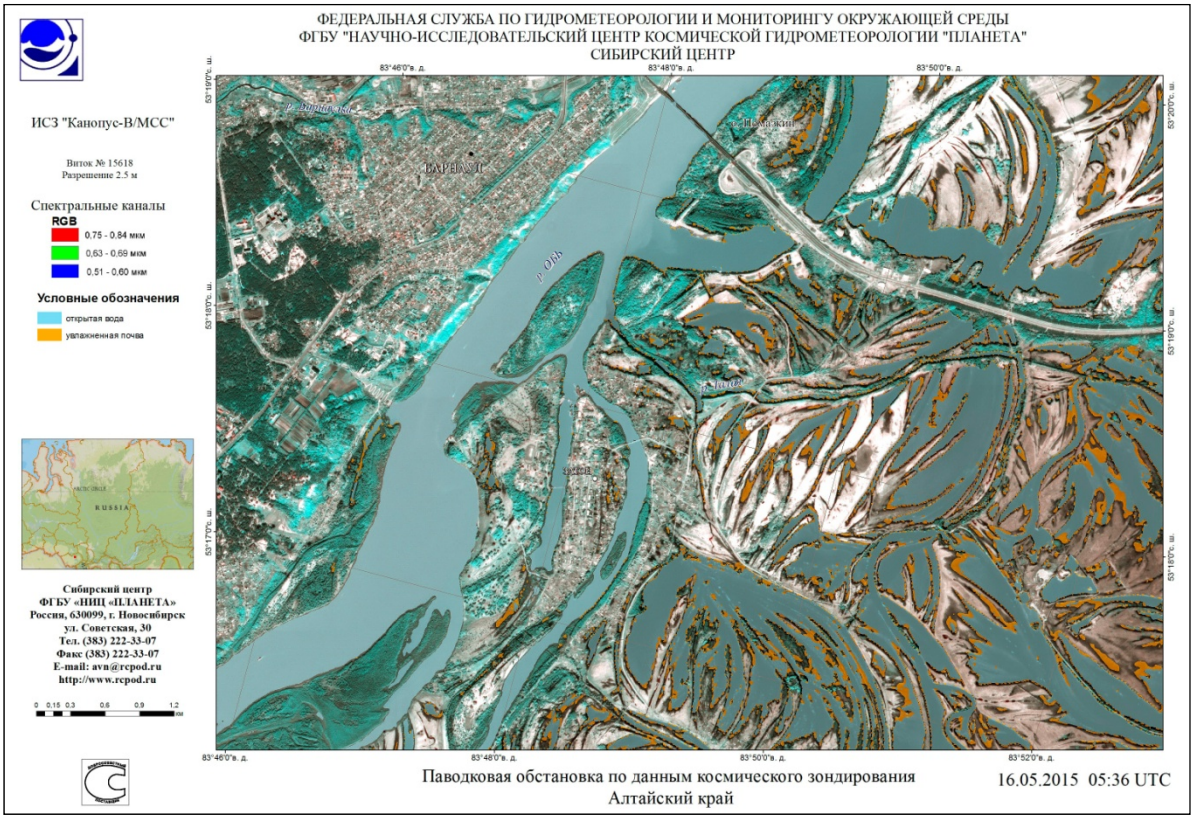


Рис. 3. Пример карты паводковой обстановки

Заключение

Предложенная технология позволяет в оперативном режиме обрабатывать данные со спутников «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» и строить карты паводковой обстановки. Кроме этого, в результате мониторинга формируется база данных, содержащая векторные данные участков подтопления и позволяющая вести временной анализ паводковой ситуации. Технология применяется в режиме опытной эксплуатации СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» при создании карт паводковой ситуации для потребителей Росгидромета и региональных служб МЧС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 14-07-00249-а, 14-07-31320-мол_а) и РНФ (грант № 14-14-00453).

Список литературы

1. Оптико-электронные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. – URL: http://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#optic (дата обращения: 01.07.2015).

2. Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33, Is. 21. P. 6854–6875.

3. Пестунов И. А., Синявский Ю. Н. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. № 4/2 (52). С. 110–125.

4. Пестунов И.А., Рылов С.А., Бериков В.Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия. 2015. Т. 51, №. 4. С. 12–22.

5. Gedik E. et al. A new robust method for bridge detection from high resolution electro-optic satellite images // Proceedings of the 4th GEOBIA. 2012. P. 298–302.

6. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, №. 7. P. 1425–1432.

7. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. Vol. 75, №. 11. P. 1307–1317.

8. Purba G.S., Chakravorty B., Kumar M. Identification of flood affected areas-need for a scientific approach // Proceedings of Indian Disaster Management Congress, Organized by National Institute of Disaster Management and Central Water Commission. 2006. Vol. 30. P. 2006.

9. McFeeters S. K. Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: a practical approach // Remote Sensing. 2013. Vol. 5, №. 7. P. 3544–3561.

10.Bochow M. et al. Automatic shadow detection in hyperspectral VIS-NIR images // Proceedings of the 7th EARSeL Workshop of the Special Interest Group in Imaging Spectroscopy, Edinburgh, UK. 2011. P. 11–13.

11.Антонов В.Н., Новгородцева О.Г. Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в сибирском федеральном округе // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 8. С. 81–86.

12.Sivanpillai R., Miller S.N. Improvements in mapping water bodies using ASTER data // Ecological Informatics. 2010. Vol. 5, №. 1. P. 73–78.

13.Пестунов И.А., Бериков В.Б., Куликова Е.А., Рылов С.А. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных // Автометрия. 2011. Т. 47, №. 3. С. 49–58.

УДК 528.852

ГИСТОГРАММНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ[1]

В. С. Сидорова
ФГБУН РАН «Институт вычислительной математики и математической геофизики» (ИВМиМГ СО РАН)
e-mail: svs@ooi.sscc.ru

HISTOGRAM CLUSTERING REMOTE SENSING DATA

V. S. Sidorova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

Рассматриваются алгоритмы кластеризации данных дистанционного зондирования Земли, основанные на гистограммном подходе, с понижением размерности данных. Алгоритмы применяются к многоспектральным и текстурным данным.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, кластеризация, многомерная гистограмма, кластерная разделимость, текстура, собственный вектор.

Задачей кластеризации является нахождение областей скоплений данных. Обычно пользуются методами: к-средних, гистограммными. Методы к-средних и основанные на них требуют правильного задания числа кластеров, иначе решения может не быть вообще. Гистограммные алгоритмы непосредственно находят скопления данных по многомерной гистограмме признаков и представляются наиболее подходящими для автоматизации кластеризации. Однако хранение многомерной гистограммы требует много памяти. Быстрый алгоритм [1] с помощью графов одновременно решает три проблемы кластеризации: найти модальные векторы кластеров, отнести все вектора в свои кластеры и определить границы между ними. Кроме того, алгоритм [1] экономит память, храня только присутствующие многомерные вектора данных и значения гистограммы для них. Причем способ записи векторов позволяет сохранить линейную зависимость скорости алгоритма от числа различных векторов. Таким образом, в [1] предложен быстрый гистограммный непараметрический кластерный алгоритм, разделяющий векторное пространство признаков по унимодальным кластерам, не требующий никакой априорной информации, в частности, числа и формы кластеров. К данным дистанционного зондирования, когда число измерений относительно мало по сравнению с объемом, этот метод применим. Алгоритм был реализован автором и описан в [2, 3]. Однако детальность кластеризации определялась в этом методе детальностью задания данных, а именно: в каждом спектральном канале отсекались младшие биты. Срезание младших битов (одного, двух и т. д. в каждом спектральном канале) приводит к очень большой разнице в результатах. Кроме того, алгоритм не гарантирует хорошей разделимости кластеров, которое определяет качество кластеризации в целом [4]. Алгоритм [5], плавно меняя детальность представления данных, оценивает по введенной мере [5] среднюю разделимость кластеров и выбирает распределение с лучшей.

Поскольку данные дистанционного зондирования Земли разнородны, т. е. одно изображение может содержать различные объекты с различной разделимостью, был создан иерархический алгоритм, который автоматически позволяет работать независимо в кластерах, постепенно увеличивая детальность представления данных.

[1] Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-07-00068) и программы № 43 Президиума РАН (проект № 32).

Определение различной детальности (задается квантованием пространства признаков) в разных областях данных позволяет существенно уменьшить число кластеров. В зависимости от целей алгоритм может находить оптимальное распределение по кластерам [6], либо кластеры с отделимостью не хуже заданной [7]. Разработаны также модификации рассмотренных алгоритмов для текстурных признаков [8; 9]. В связи с этим решаются задачи: определения размера окрестности (квадратного окна) для сбора статистик, обработки ложных кластеров, возникающих на границах различных текстур в плоскости изображения. Алгоритмы применялись для систем признаков: матриц совместного появления и вектора разностей [10], системы модельных признаков SAR [11].

Данные могут быть трансформированы в пространство независимых собственных ортонормированных векторов. Меньшую потерю информации и равноправие к каждому направлению дает квантование, которое сохраняет ячейку квантования гиперкубической в собственном пространстве признаков (а не в форме гиперпараллелепипеда). Это условие будет выполнено, если число уровней квантования вдоль каждой оси собственного пространства пропорционально квадратному корню из соответствующего собственного числа. (Собственное число характеризует разброс вдоль оси), а именно:

$$\frac{N_{e1}}{S_{e1}} = \frac{N_{e2}}{S_{e2}} = \ldots = \frac{N_{ek}}{S_{ek}} \ , \qquad (1)$$

где N_{e1}, N_{e2}, …, N_{ek} – числа уровней квантования вдоль для соответствующих собственных векторов по k ортонормированным осям; S^2_{e1}, S^2_{e2}, …, S^2_{ek} – собственные числа ковариационной матрицы исходных данных.

Зададим максимальное число уровней квантования в собственном пространстве равным N_{emax} = 256. Тогда в соответствии с (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 соответствующая компонента одинакова для всех векторов и никакой роли в кластеризации не играет.

При кластеризации текстурных изображений сравнение собственных чисел позволят найти наиболее информативные признаки до кластеризации. Проведем кластеризацию изображения лесного ландшафта на аэроснимке рис. 1, *a*. Возьмем 6 признаков по окну 16*16: средний тон *M*, стандартное отклонение *D* и 4 признака статистики разностей [10] $\boldsymbol{P}^{r,\theta}(N)$, *i*-я компонента которого является вероятностью того, что модуль разности уровней серого тона в паре соседних точек, разделенных векторным расстоянием $\{r,\theta\}$, равен *i*. N – число уровней серого тона. Признаки: $MEAN = \sum_i^N P_i^{r,\theta} * i$, $CON = \sum_i^N P_i^{r,\theta} * i * i$, $AS = \sum_i^N P_i^{r,\theta} * P_i^{r,\theta}$, $ENT = -\sum_i^N P_i^{r,\theta} * \log(P_i^{r,\theta})$ для $\boldsymbol{r} = 1$, $\theta = 0$. Если для самого большого собственного числа 70 взять N_{emax} = 256 уровней по новой оси, то для остальных соответствующих новых собственных признаков нужно взять число уровней квантования N_{ei} в соответствии с (1) (табл.).

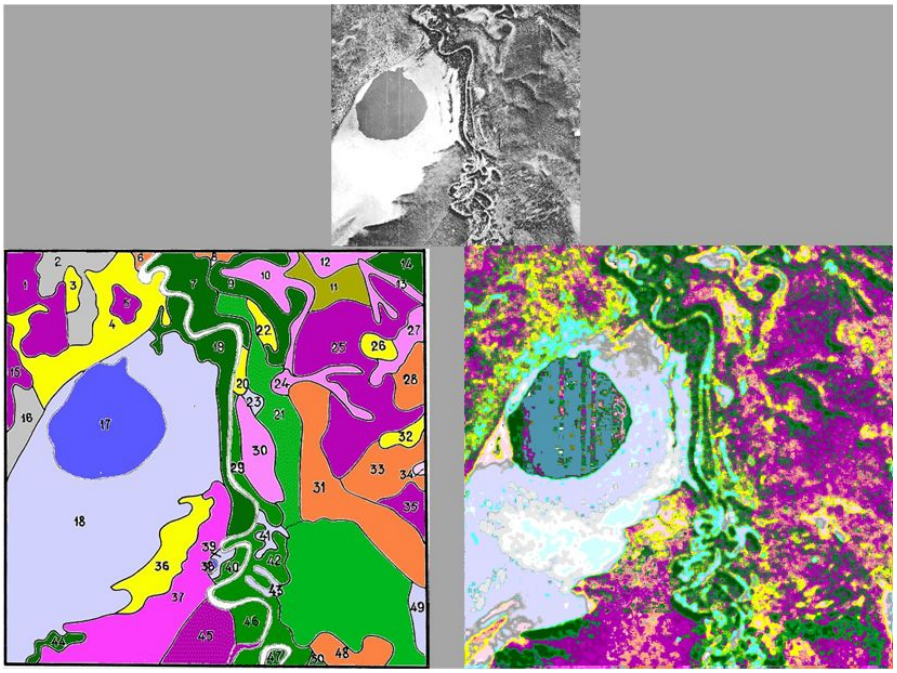
На рис. 1, *b* – картосхема выделов наземной таксации. Выдел определяется по возрастной фазе преобладающего типа леса. На рис. 1, *c* карта кластеров или глобальная сегментация на основе кластеризации по трем признакам (+) по заданной отделимости каждого унимодального кластера не больше d = 0,06 (пределы для $0 < d < 1$). Глубина просмотра данных составила 97 уровней квантования; для нее разделились кедровники и сосняки, очень близкие по визуальному восприятию. Причем большинство кластеров

унимодальные, каждый со своим сжатием данных, плюс небольшой объем граничных кластеров. Полученная карта кластеров соответствует карте выделов рис. 1, *b*.

Таблица

i	S_{ei}	$k = S_{max} / S_{ei}$	$N_{ei} = N_{emax}/k$	ОТБОР
1	70	1.	256	+
2	14,2	4,93	52	+
3	33,6	2,08	124	+
4	0,18	389	<1	–
5	0,37	189	<2	–
6	0,53	132,1	<2	–

a



b *c*

Рис. 1. a) Аэроснимок лесного ландшафта масштаба 1:50000 (1178×1157) (разрешение: 1 пиксель / 5*5 м^2 (на земле)). b) Картосхема выделов наземной таксации, кедровников и сосняков в различных фазах развития, лиственных насаждений: березовых и осиновых. В левой части снимка большое болото и круглое озеро. c) Кластерная карта. Самые темные кластеры (зеленые) относятся к кедровникам. Более светлые – лиловые, оранжевые, розовые – к соснякам, еще более светлые – к лиственным лесам, и самые светлые – к болоту. Получено всего 51 кластер, 20 из них относится к лесу

Кластеризация пятиспектрального изображения со спутника NOAA 17. Апрель 7, 2003 (разрешение 1 км; ориентиры: З – Омск, В – Абакан, С – Томск, Ю – Павлодар).

Объем файла > 4 мегабайт. В собственном пространстве 3 спектральных вектора. Получено 60 кластеров, 7 этапов иерархии. Время работы – меньше 2 мин. на РК 1,6 ГГц 512 МБ. Порог отделимости каждого кластера задан d = 0,04, получено 60 кластеров.

Данные семи спектральных каналов (в видимом и инфракрасном диапазонах) с ИСЗ «Landsat-8» (разрешение 15 м; 08.02.2014) позволили сократить размерность пространства с семи до трех при переходе к собственным векторам. Кластеризация в

новой системе векторов проводилась тем же иерархическим гистограммным алгоритмом с заданной предельной разделимостью кластеров $d = 0{,}15$. Углы розового и фиолетового кластеров на северо-востоке соответствуют загрязнению снега территории Омской области в соответствии с преобладанием юго-западных ветров в области (рис. 3).

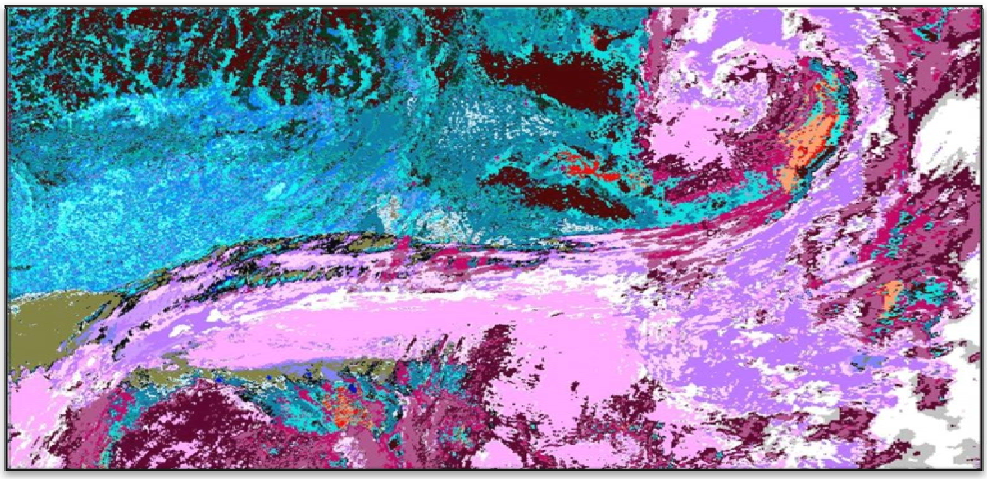


Рис. 2. На кластерной карте розовые тона соответствуют облакам циклона различной прозрачности (внизу), вверху: голубые – заснеженной части, темные – тайге, синие внизу – воде озер, оранжевые – оттаявшей поверхности. Красный кластер лежит в области 7 активного нарушения поверхности Земли (Кузбасс)

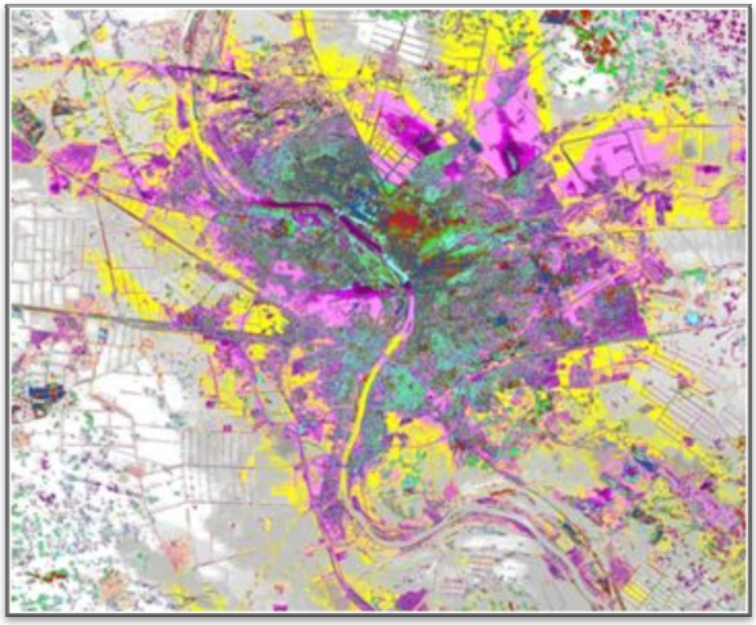


Рис. 3. Кластеризация Омской области. Получено 27 унимодальных кластеров

Список литературы

1. Narendra P.M., Goldberg M.A. Non-parametric Clustering Scheme for LANDSAT // Pattern Recognition. 1977. No. 9. P. 207–215.

2. Сидорова В.С. Кластеризация многоспектральных изображений с помощью анализа многомерной гистограммы // Сб.: Математические и технические проблемы обработки изображений. Новосибирск: СО АН СССР, 1986. С. 52–57.

3. 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.

4. Halkidi M., Batistakis Y. and Vazirgiannis M. On clustering validation techniques // Journal of Intelligent Information Systems. 2001. № 17(2–3). P. 107.

5. Сидорова В.С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом // Автометрия. 2007. Т. 43, № 1. С. 37–43.

6. Sidorova V.S. Hierarchical Cluster Algorithm for Remote Sensing Data of Earth // Pattern Recognition and Image Analysis. 2012. Vol. 22, No. 2. P. 373–379.

7. Sidorova V.S. Detecting Clusters of Specified Separability for Multispectral Data on Various Hierarchical Levels // Pattern Recog. Image Anal. 2014. Vol. 24, No. 1. P. 151–155.

8. Сидорова В.С. Алгоритм кластеризации текстурных данных дистанционного зондирования // Автометрия. 2010. Т. 46, № 5. С. 43–52.

9. Sidorova V.S. Unsupervised classification of forest's image by texture model features // Pattern Recognition and Image Analysis. 2009. Vol. 19, N 4. P. 698–703.

10. Weszka J., Dyer C. and Rosenfeld A. A comparative study of texture measures for terrain classification // IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern. 1976. Vol. SMC-6, no. 4. P. 269–285.

11. Kashyap R.L. and Chellapa R. Estimation and choice of neighbors in spatial interaction models of images // IEEE Trans. Inform. Theory. 1983. Vol. 1. P. 60–72.

УДК 004.925

ЛОКАЛИЗАЦИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АЭРОФОТОСНИМКОВ

А. А. Ткачева
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет
им. академика М. Ф. Решетнева»
Институт информатики и телекоммуникаций
e-mail: tkacheva@sibsau.ru

Данные лазерного сканирования и аэрофотоснимков повсеместно используются в практике инвентаризации лесов в качестве исходных данных для построения различных визуальных моделей. В данном исследовании приводится разработка алгоритма сегментации крон деревьев из исходного массива данных, а затем и создание трёхмерной модели земной поверхности участка леса и ландшафтных объектов на основе данных лазерного сканирования и аэрофотоснимков. Для решения задачи классификации облака точек использовался модифицированный метод вычисления линейного превышения; для решения задачи локализации деревьев в облаке точек был рассмотрен метод сегментации точек, основанный на принципе относительного расстояния между деревьями.

Ключевые слова: лидар, лазерное сканирование, трёхмерное моделирование, аэрофотоснимки, дистанционное зондирование земли, локализация деревьев.

Введение

В настоящее время повсеместно используются имитационные модели роста древостоев, подобные модели в разных странах применяются при планировании различных лесохозяйственных работ и анализа различных морфологических показателей лесных массивов. Наибольшее распространение получило описание модели дерева в виде простейших геометрических примитивов [1], таких как сфера или конус, например, ArcGIS (рис. 1).

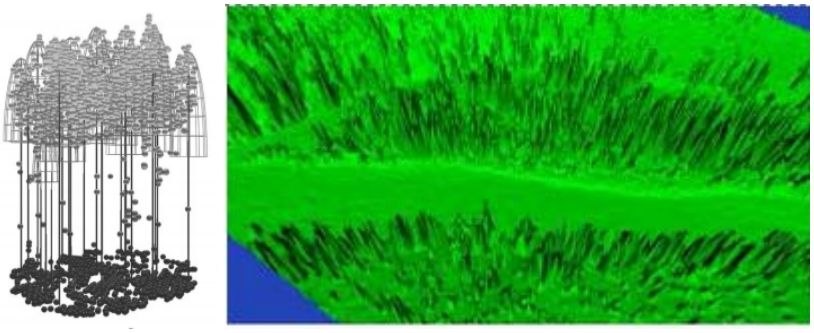


Рис. 1. Модели крон деревьев в существующих ГИС-системах

Однако такие модели, несмотря на несомненный плюс, заключающийся в простоте моделирования и описания, имеют ряд недостатков, их невозможно использовать для приблизительных расчетов морфологических показателей: например, освещенности под пологом леса, объема древесины, влажности леса (прогнозирование возникновения пожаров) и др., а также невозможна анимация ландшафтной сцены – имитация воздействия солнечного света, ветра на крону дерева [2].

При решении задачи моделирования растительности на основе данных лазерного сканирования и аэрофотоснимков выделяются следующие этапы:

1-й этап. Обработка аэрофотоснимков, определение породы дерева по аэрофотоснимку;

2-й этап. Обработка данных воздушного лазерного сканирования, локализация формы крон деревьев;

3-й этап. Трёхмерное моделирование ландшафтной сцены.

Обработка аэрофотоснимков

Первоочередной задачей в трёхмерном моделировании ландшафта является задача определения породы дерева и соответственно типа ветвления. Определить породу дерева по уже предварительно сегментированному облаку точек воздушного лазерного сканирования каждого из деревьев не представляется возможным, при данном наборе исходных данных можно определить форму кроны. Для решения задачи определения класса объекта-дерева (береза, сосна, пихта, кедр и др.) необходимо дополнительно осуществить аэрофотосъемку региона. Отметим, что деревья на аэрофотоснимках древостоя относятся к малым и слабоконтрастным изображениям, границы контуров объектов представляют собой не контрастные линии, а размытые переходные полосы, но несмотря на эти проблемы, данные снимки подлежат дешифрированию.

Существуют алгоритмы классификации двух видов – с обучением и без обучения (кластеризация). При классификации с обучением пикселы снимка группируются на основе сравнения их яркостей в каждой спектральной зоне с эталонными значениями. При кластеризации же все пикселы разделяют на группы-кластеры по какому-либо формальному дешифровочному признаку, не прибегая к обучающим данным. Затем кластеры, полученные в результате автоматической группировки пикселов, дешифровщик относит к тем или иным объектам. К прямым дешифровочным признакам относят размеры, форму, тени, фототон или цвет и структуру (рисунок) изображения объектов на аэрофотоснимке.

Критерием отнесения дерева к тому или иному классу в нашем случае является цветовая составляющая объекта на аэрофотоснимке – яркостная компонента изображения Y в цветовом пространстве YUV. Перечень фототонов и цветов изображения топографических объектов на аэроснимках приведен в табл. 1. Яркостная характеристика определялась эвристическим способом, путем анализа нескольких фрагментов аэрофотоснимков.

Таблица 1

Перечень фототонов и цветов изображения объектов на аэроснимках

Объекты	Снимки		
	черно-белые	цветные	спектрозональные
Лиственничные леса	Светло-серый	Светло-зеленый	Светло-зеленый
Березовые леса	Светло-серый	Зеленый	Зеленовато-желтый
Хвойные леса	Серый	Зеленый	Зеленый
Лиственные леса	Серый	Зеленый	Красновато-коричневый
Лиственные кустарники	Серый	Зеленый	Желтовато-коричневый

В табл. 1 приведены те типы лесов и пород деревьев, которые встречаются в Сибирском федеральном округе. Результаты сегментирования аэрофотоснимка представлены на рис. 2.

Достоверность компьютерного дешифрирования формально характеризуется отношением числа правильно классифицируемых пикселов к их общему числу и составляет в среднем 70–85 %, заметно падая с увеличением набора дешифрируемых объектов. Также стоит отметить, что при сканировании поздней весной или в начале

лета в связи с неполным развитием крон у лиственных, а также поздним летом или в начале осени, когда лиственные деревья фиксируются на аэроснимках более светлым фототоном, чем темнохвойные, задача кластеризации решается эффективнее.

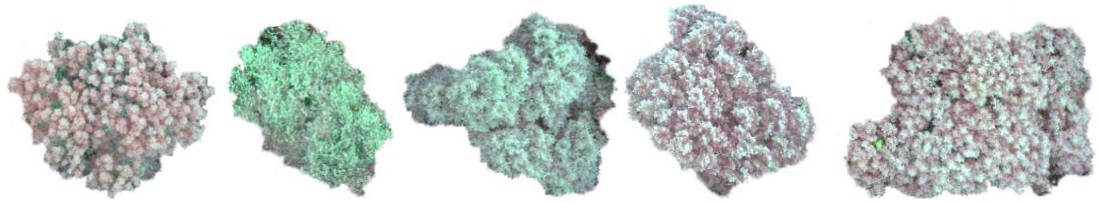


Рис. 2. Результаты сегментирования крон деревьев

Обработка данных лазерного сканирования

При моделировании ландшафтных сцен наибольшее распространение получило воздушное лазерное сканирование как способ получения исходных данных о моделируемой территории. LiDAR-данные позволяют получить информацию об исходном рельефе земной поверхности и о высоте лесного полога. Первоочередной задачей является классификация исходного облака данных на точки поверхности ландшафта и точки лесной массы. Существует несколько методов классификации исходного облака точек: метод определения минимумов ячеек (метод основан на том, что точки Земли по своей природе находятся ниже точек других объектов) и метод линейного вычисления превышений (метод построен на предположении о том, что две точки принадлежат к профилю Земли, если между соседними сегментами нет острых углов).

Превышение h точки $J(x_j, y_j, z_j)$ относительно точки $I(x_i, y_i, z_i)$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$h = (x_j - x_i)^2 + k(z_j - z_i)^2, \quad (1)$$

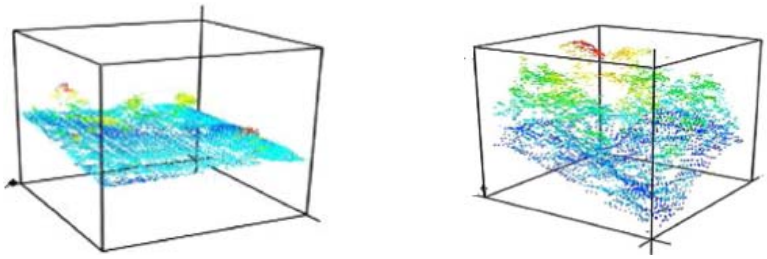
где (x_i, z_i), (x_j, z_j) являются профильными координатами конечных точек $I(x_i, y_i, z_i)$ и $J(x_j, y_j, z_j)$ на отрезке; k задается пользователем и является шкалой функции приближения координат x и z на заданном отрезке.

Предлагаемый в статье метод классификации на точки поверхности ландшафта и точки растительности основан на том, что на исходное облако точек накладывается квадратная сетка с шириной ячейки w. Предполагается, что исходная ландшафтная сцена может в себе содержать холмы, горы и равнины, причем для каждого типа ландшафта характерны свои верхняя и нижняя граница перепада высот. Соответственно для каждой ячейки выбирается собственная стратегия интерполяции поверхности ландшафта. В каждой ячейке сетки вычисляется параметр R, определяющий перепад высот и соответственно тип местности.

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где $\bar{y}$ – минимальное значение, которое принимает координата y в ячейке; $\hat{y}_i$ – среднее значение координаты y в ячейке.

Параметр R принимает значения от 0 до 1, чем ближе значение к единице, тем равниннее считается ландшафт. На рис. 3 представлены участки ландшафта, соответствующие равнинной территории и поверхности склона.

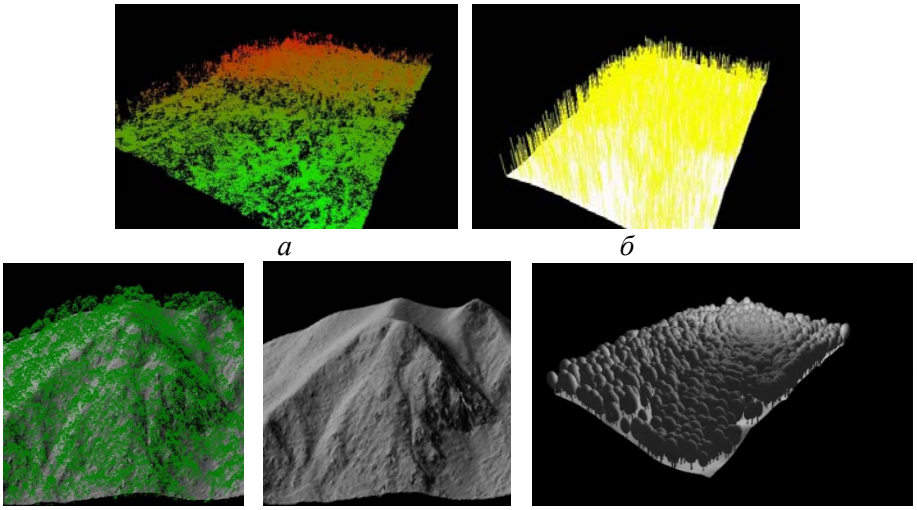


а *б*

Рис. 3. Исходное облако точек: *а* – равнинного ландшафта; *б* – поверхности склона

Заключение

Полученное облако точек поверхности ландшафта является массивом исходных данных для моделирования поверхности склона, для этого используются интерполяционные сплайны. Растительность моделируется с помощью алгоритма Space Colonization и L-систем [3].



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 4. Полученные результаты: *а* – исходное облако точек; *б* – локализация крон деревьев; *в* – работа алгоритма на склоне; *г* – моделирование поверхности ландшафта на склоне; *д* – восстановление трехмерной модели сцены

Экспертная оценка качества получаемых моделей поверхности была выведена путем визуального сравнения и оценки множества моделей, полученных в результате работы алгоритмов с различными входными параметрами (рис. 4).

Список литературы

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса // Геолидар, Геоскосмос. 2007. 230 с.

2. Favorskaya M.N., Tkacheva A.A. Rendering of Wind Effects in 3D Landscape Scenes // Original Research Article Procedia Computer Science. 2013. Vol. 22. P. 1229–1238.

3. Ткачева А.А. Применение алгоритма Space Colonization при трехмерном моделировании сложных природных объектов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. Вып. 1 (53). Красноярск, 2014. С. 85–91.

УДК 528.8.04, 528.88

ВЕРИФИКАЦИЯ VGPM (ВЕРТИКАЛЬНО ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА) ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Ю. В. Шамбарова[(1)], И. Е. Степочкин[(2)], С. П. Захарков[(1)]
[(1)]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток
e-mail: shambarova@poi.dvo.ru
[(2)]МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток

VERIFICATION OF VGPM (VERTICALLY GENERALIZED PRODUCTION MODEL) IN THE NORTHWESTERN PART OF THE JAPAN SEA

Yu. V. Shambarova[(1)], I. E. Stepochkin[(2)], S. P. Zakharkov[(1)]
[(1)]V.I. Il`ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru
[(2)]Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoi, Vladivostok, Russia

В работе на основе экспериментальных данных рассматривается возможность применения VGPM модели (вертикально обобщенной модели первичной продукции), основанной на спутниковых данных для расчета первичной продукции в северо-западной части Японского моря. В результате было выявлено, что модель VGPM имеет ряд недостатков и малоприменима в исследуемых водах как при использовании по спутниковым данным, так и при использовании in-situ данных. Был проведен ряд работ по выявлению причин такого несоответствия.

Ключевые слова: первичная продукция фитопланктона, спутниковые данные, VGPM, концентрация хлорофилла-а.

Введение

Японское море расположено в северо-западной части Тихого океана между материковым берегом Азии, Японскими островами и островом Сахалин в географических координатах 34°26'–51°41' с. ш., 127°20'–142°15' в. д. Район исследования – северо-западная часть Японского моря, с координатами 34°–49° с. ш.; 128°–142° в. д.

Оценка величин первичной продукции (ПП), одного из основных компонентов экосистемы, является важной задачей современной науки. С одной стороны, образование органического вещества – первого звена трофической цепи – формирует условия для допустимого извлечения морских биоресурсов, необходимых в жизнедеятельности человека. С другой – продуктивность океанов связана с распределением углекислого газа между атмосферой и гидросферой и, следовательно, влиянием парникового эффекта атмосферы на климат.

Растущий интерес к количественной роли океанов в глобальной климатической системе побудило к разработке различных моделей первичной продуктивности. При помощи спутниковых моделей для определения ПП стало возможным наблюдение за пространственно-временной изменчивостью величин ПП в океанических масштабах: от межгодовой к десятилетней изменчивости и от региональной до глобальной изменчивости параметра [1]. Это главное преимущество спутниковых моделей перед in-situ методами определения и оценки ПП. У глобальных спутниковых моделей есть недостатки, которые связаны с ошибками оценки первичной продукции. Ошибки

определяются несовершенствами моделей расчета ПП. Некоторые из этих ошибок возможно разрешить разработкой региональных алгоритмов расчета хлорофилла и первичной продукции.

Оценки ПП имеют решающее значение для понимания многих важных океанических процессов, поэтому крайне важно проводить проверку производительности различных спутниковых моделей ПП, а также выяснять преимущества и недостатки изучаемой акватории. С этой целью нами была рассмотрена стандартная модель VGPM, основанная на спутниковых данных. Нами была проведена проверка VGPM модели, сравнение оценок ПП, полученных по стандартной модели VGPM с величинами ПП, измеренными in-situ, и ряд других процедур для выявления недостатков спутниковой модели в изучаемой акватории.

Используемые методы и данные

В работе были использованы открытые спутниковые данные 3 уровня о ПП (http://orca.science.oregonstate.edu). Данные содержат пространственные массивы с регулярной фиксированной географической сеткой с шагом 9 км. Данные, содержащиеся в каждом массиве, усреднены по времени за период 8 дней.

В работе была рассмотрена общепринятая модель VGPM (Vertically Generalized Production Model), которая была описана учеными Behrenfeld и Falkowski в 1997 г. в журнале Limnology and Oceanography [1]. Расчет интегрированной по глубине первичной продукции по спутниковым данным ведется по формуле:

$$IPP = 0.66125 * PBopt * \frac{PAR}{PAR+4.1} * Zeu * Chlopt * H, \quad (1)$$

где IPP – значение первичной продукции, интегрированной по глубине; PAR – ежедневная PAR над морской поверхностью (кванты моля $1/m^2$); Zeu – «euphotic» глубина, которая определена как физическая глубина в 1 % от E_0 (m); Chl opt – концентрация хлорофилла-а (mg/m^3); H – длительность светового дня (h); PBopt – полиномиальная функция температуры, основной параметр, контролирующий ПП, которые зависит от различных факторов среды и рассчитывается следующим образом:

$$PBopt\,(T) = 1.2956 + 0.2749T + 6.17 \cdot 10^{-2}\mathrm{T}^2 - 2.05 \cdot 10^{-2}\mathrm{T}^3\,3 + 2.462 \cdot 10^{-3}\mathrm{T}^4 - 1.348 \cdot 10^{-4}\mathrm{T}^5 + 3.4132 \cdot 10^{-5}\mathrm{T}^6 - 3.27 \cdot 10^{-8}\mathrm{T}^7. \quad (2)$$

Разработка модели велась на основе большого набора данных измерений первичной продукции фитопланктона, выполненных методом 14C в различных акваториях Мирового океана, и проведенная затем валидация модели показала высокую (от 0,72 до 0,78) корреляцию смоделированных и in-situ значений всех без исключения параметров.

Определение in-situ данных о величине ПП в северо-западной части Японского моря проводилось с использованием радиоуглеродной модификации скляночного метода [2]. Помимо этого в работе используются уже имеющиеся данные по величине ПП, полученные этим методом в ходе предыдущих рейсов.

Для анализа изменчивости концентрации хлорофилла-а (Кхл), температуры поверхности океана, фотосинтетически активной радиации и других исследуемых характеристик по спутниковым данным использовались данные 3 уровня радиометра Modis Aqua с регулярной географической сеткой 9 км, находящиеся в открытом доступе на сайте http://oceancolor.gsfc.nasa.gov . Помимо спутниковых данных о Кхл в работе были использованы in-situ данные о Кхл, полученные при помощи стандартного спектрофотометрического метода. Стандартный спектрофотометрический метод основан на анализе спектров поглощения экстракта хлорофилла-а в 90 % ацетоне [3].

Результаты и обсуждение

При сравнении оценок ПП на основе спутниковых данных по стандартной модели VGPM с величинами, измеренными in-situ, были выявлены большие различия, хотя модельные данные полностью соответствовали in-situ данным по датам и географическим координатам точек.

Помимо этого было проведено сравнение оценок ПП на основе спутниковых данных по модели VGPM с величинами ПП, рассчитанными по этой же модели, но с применением in-situ данных. В результате было выявлено, что модель VGPM малоприменима в исследуемых водах как при использовании по спутниковым данным, так и при использовании данных in-situ. Проведен ряд работ по выявлению причин такого несоответствия.

Во-первых, ранее авторами в работе [4] было выявлено, что необходимо проводить коррекцию спутниковых оценок концентрации Кхл в прибрежной зоне северо-западной части Японского моря, основываясь на судовых измерениях. И для снижения погрешности необходима верификация и региональная корреляция спутниковых данных по судовым подспутниковым измерениям. Выявлено, что низкая точность VGPM модели связана в основном с переоценкой Кхл, входящего в модель. Это связано с погрешностями спутникового значения Кхл в прибрежных водах 2 типа (Залив Петра Великого). Для преодоления этого недостатка необходима оптимизация спутникового алгоритма Кхл, для улучшения оценок Кхл и исключения возможных неверных решений, подходящего для вод 2 типа [5].

Во-вторых, низкая точность стандартной VGPM модели может быть связана с ошибками параметра Pbopt, который встроен в модель. Степень точности моделирования этого параметра, который зависит от суточного освещения, преобладания видов фитопланктона, адаптации к слабому и сильному освещению, типа морских вод и т. д. – важный фактор при определении ПП. Анализируя диаграмму рассеяния судового ПП и посчитанного по стандартной модели VGPM из судовых данных с использованием Pbopt, нами выявлено, что при таком подходе рассчитанная по модели ПП с применением судовых данных, в частности и для Pbopt, занижена по сравнению с данными in-situ ПП.

Для всех моделей требуется описание ежедневных комплексных изменений Pbopt. Из-за ограниченности данных нам не представляется возможными анализ Pbopt, построение отношений Pbopt к температуре поверхности океана и к Кхл, который необходим для понимания, какова роль этого параметра в завышении оценок стандартной VGPM. Для лучшего понимания проблем, связанных с ошибками спутниковых данных и модели VGPM в исследуемом районе, необходим более обширный набор данных. Для этого авторами планируется в последующей работе участие в морских экспедициях в северо-западной части Японского моря.

Некоторые недостатки VGPM модели, выявленные в ходе работы, возможно разрешить разработкой региональных алгоритмов расчета хлорофилла и первичной продукции в исследуемой акватории. Региональная модель для оценки ПП в северо-западной части Японского моря может быть разработана с учетом оптимизации спутникового алгоритма Кхл с in-situ данными и используя информацию изменений Pbopt.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 14-05-31219 мол-а, практическая часть работы выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 15-35-21032 мол-а-вед.

Список литературы

1. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnology and Oceanography. 1997. Т. 42, №. 1. С. 1–20.

2. Сорокин Ю.И. Первичная продукция в Охотском море // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. С. 103–110.

3. Кобленц-Мишке О.И. Экстрактный и безэкстрактный методы определения фотосинтетических пигментов в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. М.: Наука, 1983. С. 114–125.

4. Возможность использования данных зонда SBE для калибровки спутниковых данных концентрации хлорофилла-А в Японском море / С.П. Захарков, Ю.В. Шамбарова, Т.Н. Гордейчук, И.В. Стоник, Е.А. Штрайхерт // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2014. Т. 177. С. 209–218.

5. Sathyendranath S. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 2000. P. 1–145.

УДК 528.8.04, 528.88

ПРИМЕНЕНИЕ МТ-ГРАФА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ПОИСКА В ЗАДАЧЕ ОЦЕНИВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К. В. Шатрова, М. В. Носков, Ю. А. Маглинец
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
e-mail: KShatrova@sfu-kras.ru
e-mail: MNoskov@sfu-kras.ru
e-mail: YMaglinets@sfu-kras.ru

APPLICATION OF THE METRIC TOPOGRAPHIC GRAPH FOR ORGANIZATION OF THE REGION OF SEARCH IN THE PROBLEM OF THE EVALUATION OF AGRICULTURAL LANDS

K. V. Shatrova, M. V. Noskov, Yu. A. Maglinets
Siberian Federal University
Institute of Space and Information Technologies
e-mail: KShatrova@sfu-kras.ru
e-mail: MNoskov@sfu-kras.ru
e-mail: YMaglinets@sfu-kras.ru

В работе описывается применение МТ-графа для организации области поиска оптимального маршрута на местности. Выполнена модификация МТ-графа для учета рельефа местности, сезонности, погодных факторов и других характеристик подстилающей поверхности.

Ключевые слова: ГИС, модели представления пространственных данных, графовые модели, поиск пути на плоскости.

Введение

Задача оценивания земель сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) решается в целом ряде приложений, таких как расчет кадастровых и рыночных оценок ЗСХН, ранжирование земель и др. [2–3]. Одним их ключевых факторов, используемых при оценивании, является расчет транспортной доступности исследуемого пространственного объекта (объекта оценивания). Оценка вычисляется как мера трудоемкости перемещения материальных объектов от данного объекта до других объектов, необходимых для ведения хозяйственной деятельности человека (объектов интереса). Так, для орошаемых сельскохозяйственных угодий и пастбищ необходимы в непосредственной близости водные объекты, вода из которых может использоваться соответственно для полива и создания водопоя для крупного рогатого скота; наличие в непосредственной близости от объекта исследования дорожной сети облегчает доступность территории для сельскохозяйственной техники; непосредственная близость к населенным пунктам позволяет сократить транспортные издержки.

Предположим, что в локальной окрестности объекта оценивания находится n объектов интереса. Тогда задача оценивания транспортной доступности объекта оценивания сводится к решению совокупности задач поиска пути между парой фиксированных точек, принадлежащих соответственно объекту оценивания и i-му объекту интереса, $i \in [1 \ldots n]$, последующему оцениванию каждого из найденных путей и расчету интегральной оценки для объекта оценивания.

Постановка задачи

Для поиска пути на земной поверхности способность двигаться по прямой ограничивается наличием препятствий и сложностью прохождения территории. Пусть Ω – область в R^2. Выделим в Ω два класса попарно непересекающихся подобластей $M = \{m_i\}$, $N = \{n_j\}$, где $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, l$, $m_r \cap m_s = \emptyset$, $n_p \cap n_t = \emptyset$, $m_k \cap n_l = \emptyset$, $r, s = 1, \dots, k, p, t = 1, \dots, l$.

Будем называть подобласти, принадлежащие M – разрешёнными, а подобласти принадлежащие N – запрещенными для движения.

Исходя из вышеназванных условий, задачу поиска пути сформулируем следующим образом: пусть m'и $m'' \in M$, необходимо найти длину кратчайшей кривой, соединяющей m'и m'', не пересекающую ни одного элемента запрещенного множества.

Если в поставленной нами задаче считать границы областей из M и N кусочно-гладкими, то приближенное решение поставленной нами задачи можно получить, пользуясь известными алгоритмами решения задачи о кратчайшем пути в графе, взяв в качестве вершин графа вершины всевозможных различных ломаных линий, соединяющих m'и m''. Так, в [1], где в качестве запрещенных областей предлагаются многоугольники, в качестве вершин графа предлагаются вершины многоугольников. Однако, как показано в [1], классические алгоритмы нахождения кратчайшего пути на графе не подходят для решения реальных задач ввиду высокой вычислительной сложности.

Для решения таких задач наиболее подходящими, утверждается в [1], являются графы, построенные на регулярной декомпозиции. Так, в качестве модели, позволяющей получить решение задачи навигации беспилотного транспортного средства, авторами [1] введено понятие МТ-графа.

$$MT =< V, E, p, w, \rho >, \quad (1)$$

где V – множество вершин графа; E – множество ребер графа; $p(v)$ – каждой вершине ставит в соответствие значение функции P (для соответствующей вершины области поверхности). Вершину v будем называть проходимой, если $p(v) = 0$, и непроходимой, если $p(v) = 1$; $w(e)$ – каждому ребру ставит в соответствие элемент из расширенного множества действительных чисел, причем $w(e_{ij}) = \infty$, если одна из вершин, образующих это ребро, является непроходимой; $\rho(v_i, v_j)$ – каждой паре вершин ставит в соответствие число, равное расстоянию (по некоторой метрике в U) между центрами областей, которым соответствуют вершины v_i и v_j.

В настоящей работе рассматривается задача оценивания транспортной доступности наземных (геопространственных) объектов. Рассмотренный выше формализм является недостаточным для решения анализируемой задачи в силу следующих причин: 1) при движении на местности необходимо учитывать особенности рельефа; 2) необходимо учитывать влияние дорожной сети, так как ее наличие (отсутствие) существенно влияет на выбор маршрута; 3) необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на скорость перемещения материального потока между двумя вершинами графа – таких как сезонные факторы, свойства рельефа, характеристики перемещаемых материальных потоков, характер подстилающей поверхности и проч.

Модификация МТ-графа

Учет семантических меток вершин графа

Для вычисления функции для конкретного ребра графа $e_i(c_k, c_l)$ необходимо обладать знанием о типах поверхностей соединяемых им вершин c_k, c_l. Предположим, что в результате дешифрирования каждой вершине графа c_i установлена в соответствие

семантическая метка s_j, обозначающая вид поверхности, влияющий на сложность перемещения условного транспортного средства.

Для учета указанной выше информации введем словарь меток S и функцию интерпретации $f_s(c_k)$, устанавливающую в соответствие каждой вершине графа метку из наперед заданного множества (словаря) меток:

$$f_s(c_k) \to S. \quad (2)$$

Это позволяет уточнить способ вычисления $w(e)$ следующим образом:

$$w(e) = f(s_m, s_n), \quad (3)$$

где s_m, s_n – семантические метки вершин, определяющих ребро e.

В рамках предлагаемой модификации МТ-графа предлагается иной подход к классифицированию объектов пространственных данных, таким образом вычисление функции $p(c)$ сводится к разделению классификации элементов словаря S на «доминирующие», «барьеры» и «комбинированные» типы поверхностей [3].

$$p(c) = f(s_i), \quad (4)$$

где s_i – семантическая метка вершины c.

Учет рельефа местности

С учетом рельефа местности соотношение (3) модифицируется следующим образом.

$$w(e) = f(s_m, s_n, h(c_k) - h(c_l)), \quad (5)$$

где $h(c_k)$, $h(c_l)$ – высота над уровнем моря, заданная для вершин, определяющих ребро e.

Учет модификаторов погодных условий

В зависимости от конкретных условий поиска на местности формируется вектор измерений ситуативных факторов, влияющих на проходимость той или иной вершины графа. Так, для задачи прохождения сельскохозяйственной техники важны такие параметры, как влажность почвенного покрова, температура воздуха, наличие осадков и т. д. Введем понятие вектора измерений ситуативных факторов $X(c_i)$. С учетом погодных (ситуативных) условий соотношение (5) модифицируется следующим образом:

$$w(e) = f(s_m, s_n, h(c_k) - h(c_l), X(c_k), X(c_l)). \quad (6)$$

Учет модификаторов сезонных факторов

Рассмотренные выше факторы влияют на расчёт функции $w(e)$, но не затрагивают другие элементы МТ-графа. Однако на практике прохождение маршрутов по земной поверхности существенно зависит от времени года и сезонных изменений, таких как высота снежного покрова, замерзание и разливы рек, прокладка зимников и др. Такого рода изменения влияют на вычисление не только функции $w(e)$, но и функций $p(c)$ и $f_s(c)$, которые параметризуются с учётом фактора временных изменений и приводятся к виду $p(c, date)$ и $f_s(c, date)$ соответственно, где $date$ – дата актуальности информации. Альтернативный вариант – использование семейства МТ-графов, построенных для одного и того же участка территории за различные временные периоды.

Учет данных различного пространственного разрешения

С учетом того, что в общем случае МТ-граф может быть построен на основе данных различного пространственного разрешения, введем понятие иерархического МТ-графа, построенного на основе использования модели квадродерева.

Иерархический МТ-граф – орграф, полученный путем объединения МТ-графов, соответствующих одному и тому же участку земной поверхности, с различными линейными размерами исходных поверхностей u_i, $U = u_1 \cup u_2 \cup \ldots \cup u_{n-1} \cup u_n$, определяемых пространственной дискретизацией космоснимков. Для установки соответствия вершинами исходных графов введем множество дуг (направленных ребер) Y, соединяющих вершины различных уровней иерархии.

Способ формирования вершин графа поиска:

1) Задается метрический размер m для c_i на земной поверхности;

2) Участок земной поверхности, для которого решается задача поиска, покрывается регулярной сеткой, состоящей из квадратных ячеек со стороной m;

3) Вершины графа поиска определяются путем регулярной декомпозиции пространства поиска, основываясь на априорной информации о наличии в соответствующем участке земной поверхности проходимых и непроходимых фрагментов, исходя из следующего правила:

- на рассматриваемом участке поверхности присутствуют один или более непроходимых элементов – формируется элемент запрещенного множества;
- на рассматриваемом участке поверхности присутствуют один или более проходимых элементов – формируется элемент разрешенного множества;
- на рассматриваемом участке поверхности присутствует комбинация проходимых и непроходимых элементов – формируется элемент разрешенного множества.

Способ вычисления весов ребер: вес ребра равен сумме вкладов в этот вес двух смежных вершин, деленной на 2, $e = (v_1 + v_2)/2$.

Заключение

Предложена модификация МТ-графа для моделирования транспортной доступности пространственных объектов, позволяющая в сравнении с известными моделями представления получать более точные оценки стоимости пути на основе учета временного и сезонного контекста, а также дополнительной информации о дорожной сети. Модифицированный МТ-граф принимает вид:

$$MT^M =< C, E, Z, X, p^*, w^*, \rho >, \quad (7)$$

где Z – множество взвешенных ребер, соединяющих элементы множества C, для которых существует маршрут с предпочтительным движением; X – вектор ситуационных факторов, установленный в соответствие каждому из элементов множества C, влияющих на сложность проходимости соответствующей вершины; p^* – функция, определяющая проходимость вершины множества C с учетом сезонных факторов; w^* – функция, определяющая стоимость перемещения по дуге из множества E с учетом рельефа и ситуативных факторов.

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

Список литературы

1. Яковлев К.С., Баскин Е.С. Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. 1. С. 5–12.

2. Терехов А.Г., Витковская И.С., Батырбаева М.Ж., Спивак Л.Ф. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным LANDSAT и MODIS.

3. Шатрова К.В., Маглинец. Ю.А. Представление пространственных данных для организации области поиска оптимального маршрута // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы Междунар. науч. конф. 2014. С. 345–348.

УДК 528.8:574

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ 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

ANALYSIS OF SURFACE AND SATELLITE OBSERVATIONS OF SNOW COVER POLLUTION BY DUST

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

Рассмотрены задачи восстановления полей загрязнения снежного покрова от пылящих точечных, линейных и площадных источников по данным наземных и спутниковых наблюдений. С использованием моделей реконструкции разработаны методы совместного анализа характерных изображений ореолов и данных контактных наблюдений загрязнения снежного покрова в окрестностях источников пыли.

Ключевые слова: модель, параметр, оценка, реконструкция, тона серого цвета, функциональная связь.

Закономерности распространения в атмосфере и выпадения на земную поверхность тяжёлых примесей представляют значительный интерес для решения многих практических задач и изучения турбулентных свойств атмосферы. Движение в атмосфере облака тяжёлых частиц определяется в основном двумя факторами: действием силы тяжести в сочетании с силами сопротивления со стороны воздуха и полем ветра. При скоростях оседания порядка 0,5–1 м/с вполне пригодна для использования кинематическая схема выпадения частиц на поверхность земли. При описании распространения более мелких фракций аэрозольных примесей следует учитывать эффекты турбулентного перемешивания в атмосфере.

При проведении численного анализа распространения примесей требуется информация о параметрах источников, функции распределения спектра размеров частиц, которая, как правило, отсутствует. В этом случае возникает необходимость постановок соответствующих обратных задач переноса примеси в атмосфере.

1. Модель оценивания поля длительных выпадений пыли. При построении моделей оценивания поля выпадений пыли вполне возможен вариант использования «кинематической» схемы распространения частиц в атмосфере, т. е. пренебрегая их турбулентным рассеиванием. В этом случае движение частиц в поле ветра представляет собой падение с постоянной стоксовой скоростью, и перенос примеси можно описать следующим уравнением:

$$u\frac{\partial q}{\partial r} - w\frac{\partial q}{\partial z} = 0, \qquad (1)$$

с граничным условием

$$q\big|_{r=0} = \psi(z) \equiv Q\,\delta(z-H)\,, \tag{2}$$

где $q(r,z)$ – концентрация примеси в плоскости (r,z); u – средняя горизонтальная скорость ветра в направлении оси r; w – скорость оседания частиц по оси z, ось z направлена вертикально вверх; Q, H – мощность и эффективная высота источника; δ – дельта функция Дирака.

Перенос примеси происходит по характеристикам уравнения (1) и решение задачи (1), (2) представляется в явном виде

$$q(r,z) = \psi(z + \frac{w}{u} r)\,. \tag{3}$$

Описание спектра размеров частиц $N(w)$ полидисперсной примеси в источнике по скоростям оседания проводилось с использованием следующей двупараметрической функции

$$N(w) = \frac{n^{n+1}}{w_k\,\Gamma(n+1)} \left[\frac{w}{w_k} \exp(-\frac{w}{w_k}) \right]^n \,. \tag{4}$$

Тогда с использованием (3), (4) и свойств дельта-функции плотность выпадений примеси в радиальном от источника направлении представляется в виде

$$\begin{aligned} \sigma(r,\vec{\theta}) &= \int_0^\infty w\,q\big|_{z=0} N(w)dw = \int_0^\infty w \frac{u}{r} \delta(w - \frac{Hu}{r})\, N(w)dw = \\ &= \frac{H\,u^2}{r^2} N(\frac{H\,u}{r}) = \theta_1\, r^{-\theta_2} \exp(-\frac{\theta_3}{r}) \end{aligned}\,, \tag{5}$$

где $\theta_1 = \dfrac{u}{\Gamma(n+1)} \left(\dfrac{n\,H\,u}{w_k} \right)^{n+1}$, $\theta_2 = n+2$, $\theta_3 = \dfrac{nHu}{w_k}$.

Оценку неизвестного вектора параметров $\vec{\theta}$ в выражении (5) можно провести по данным наблюдений поверностной концентрации осадка методом наименьших квадратов.

2. Численный анализ загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирского электродного завода (НЭЗ). На космических снимках отчетливо проявляется осаждение на снежный покров аэрозолей промышленного происхождения [1; 2]. На них участки загрязненного снега выглядят как темноватые пятна, причем почернение изображения непосредственно зависит от степени запыления и отражает атмосферную динамику процессов переноса пыли от источника, что создаёт возможности их взаимной количественной интерпретации.

Экспериментальные исследования. НЭЗ расположен в равнинной местности в 50 км южнее Новосибирска. Основное производство основано на технологии пиролиза графита, изготовленного из антрацита Горловского разреза, кокса, каменноугольного пека, кубовых остатков нефтехимии. Полиароматические углеводороды (ПАУ) составляют значительную часть выбросов завода в атмосферу. Выброс смолистых веществ, включающих бенз(а)пирен (БП) и другие ПАУ, формируется в основном в цехе обжига и осуществляется через две 180-метровые трубы.

Отбор проб снега в окрестностях НЭЗ проводился по двум радиальным относительно трубы маршрутам, направленным на север и северо-восток. Основные выпадения примесей в зимнее время происходят в основном в северо-восточном секторе. Точки пробоотбора на маршрутах размещались с учётом предварительной информации об источниках выброса ПАУ, условий местности, системе дорог, размещения населённых пунктов и лесных насаждений, состояния снежного покрова, климатических характеристик повторяемости и скорости ветра в зимнее время и т. д.

Предварительный анализ данных экспедиционных и химико-аналитических исследований показал, что концентрация БП в снеге, несмотря на значительную высоту трубы, с удалением от источника быстро уменьшается. Характер изменения концентрации БП с удалением от завода позволяет утверждать, что в данном случае вклад доли относительно мелких частиц, содержащих БП, в ближней зоне выпадений (до 3 км) относительно не велик.

Численная реконструкция. Для оценки трёх параметров в (5) необходимо использовать наблюдения не менее, чем в трёх точках по маршруту отбора снеговых проб. Их выбор проводился с использованием методов и алгоритмов построения локально оптимальных планов наблюдения. На рис. 1 приведены результаты восстановления поля концентрации БП по трём опорным точкам измерений в северо-восточном направлении от источника. Из анализа рис. 1 вытекает удовлетворительное согласие измеренных и вычисленных концентраций различных ингредиентов примеси в контрольных точках наблюдений.

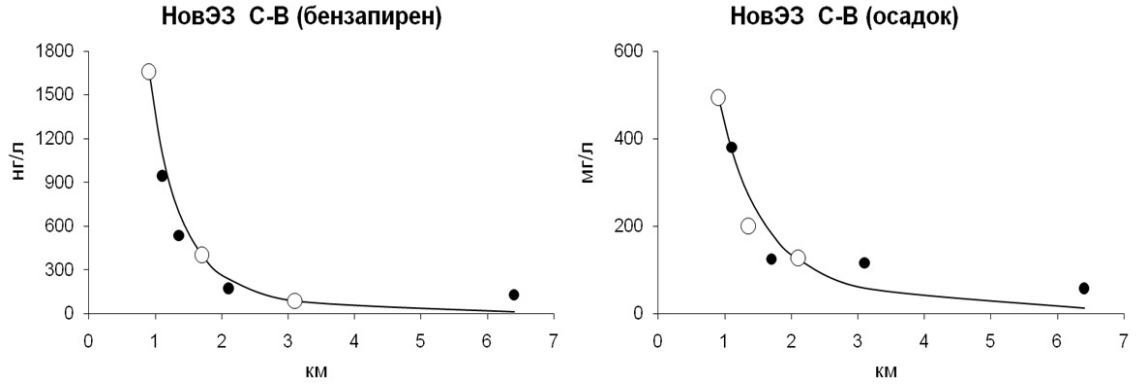


Рис. 1. Численно восстановленные концентрации бенз(а)пирена, осадка пыли в снеге на северо-восточном маршруте пробоотбора. ○ – опорные точки, ● – контрольные точки наблюдений

Максимум приземной концентрации достигается на расстоянии менее 1 км от трубы, что указывает на весьма высокие скорости оседания выбрасываемых частиц.

Оцифровка ореолов загрязнения. В работе использовались снимки ИСЗ, полученные с сайта компании DigitalGlobe. В результате обработки снимков 2 марта 2011 г. и 31 марта 2009 г. были получены изображения окрестностей НЭЗ, на которых все цветовые градации были переведены в тона серого цвета (рис. 2). Это (дешифровка) позволило выделить ореол загрязнения от основных очагов (завода, угледробилки и технологической автотрассы) по выбранным направлениям.

Функциональные связи между наземными и спутниковыми наблюдениями выпадений пыли. На рис. 3, 4 приведены результаты сравнительного анализа данных обоих видов наблюдений для точечного и площадного источников.

Из рис. 3, 4 вытекает, что в ближней зоне выпадений пыли для точечного источника характерна степенная связь, для площадного источника – линейная. Для региональных масштабов выпадений пыли реализуется логарифмическая связь.

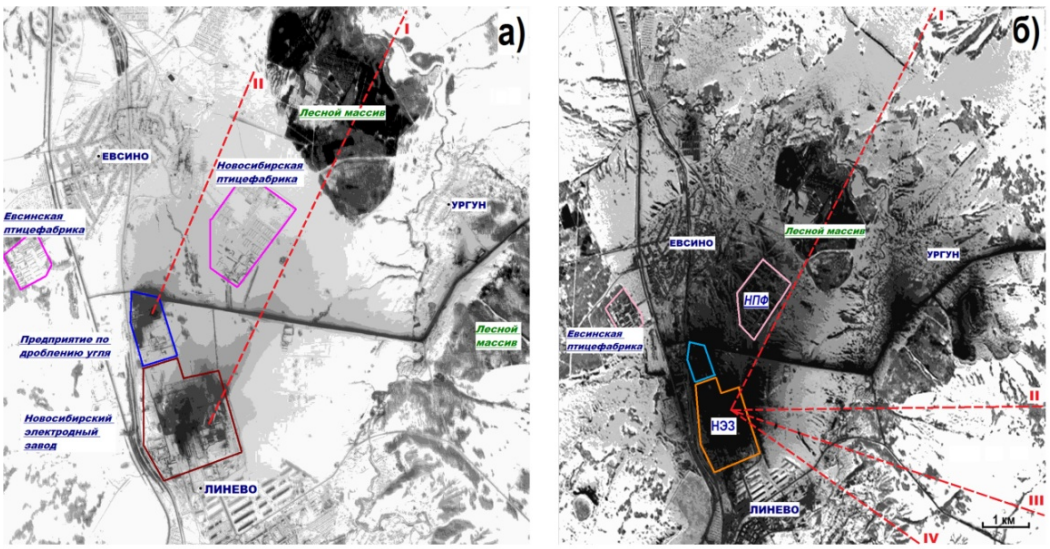


Рис. 2. Поля выпадений пыли в окрестностях Новосибирского электродного завода (НЭЗ), оцифрованные в тонах серого цвета по спутниковым снимкам от а) 2 марта 2011 г., б) 31 марта 2009 г. – – – – – сечения полей выпадений пыли по направлениям наибольшего выноса

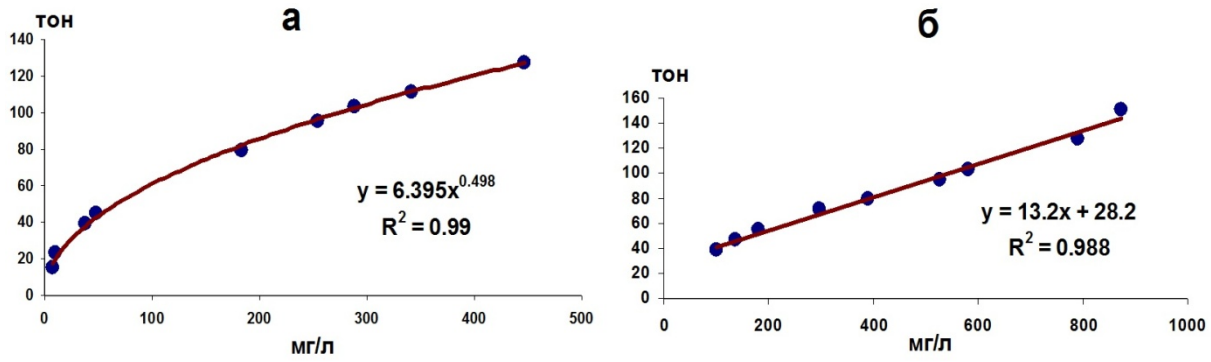


Рис. 3. Функциональная связь в северо-восточном направлении между интенсивностью изменения тонов серого цвета (снимок 2.03.2011 г.) и полями выпадения пыли от высотных труб обжигового цеха НЭЗ (а) и от площадного источника – предприятия по дроблению угля (б)

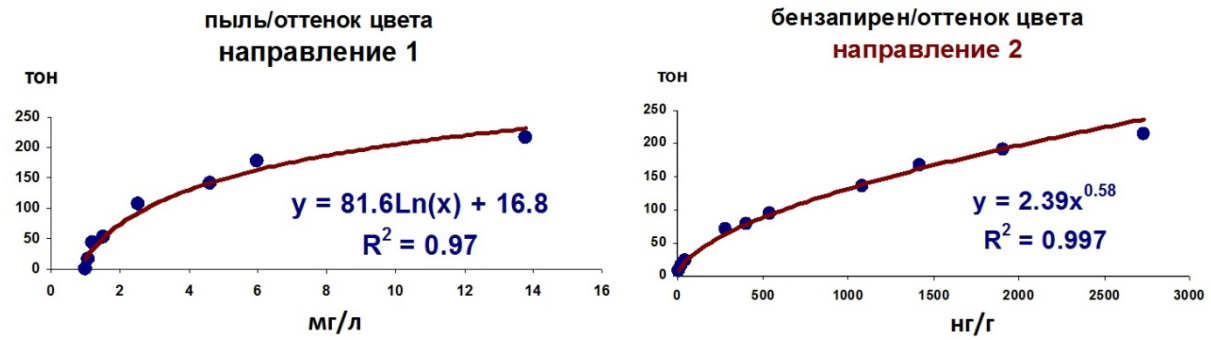


Рис. 4. Функциональная связь между интенсивностью изменения тонов серого цвета (снимок 31.03.2009 г.) и полем региональных выпадений пыли от высотных труб обжигового цеха НЭЗ в направлении 1 и выпадениями бенз(а)пирена в направлении 2

Результаты проведённых исследований позволяют существенно оптимизировать выполнение наземного мониторинга загрязнения окрестностей промышленных предприятий в зимний период времени. С использованием данных спутниковых наблюдений и сравнительно небольшого количества точек отбора проб снега показана возможность восстановления полей многокомпонентного загрязнения территорий и оценивания суммарного выброса аэрозольных примесей.

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. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 182 с.

Секция
«МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»

УДК 528.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И РАДАРНЫХ ДДЗ В КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ПАВОДКОВ В КАЗАХСТАНЕ

О. П. Архипкин, Г. Н. Сагатдинова
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
e-mail: oarkhipkin@rambler.ru

THE USE OF OPTICAL AND RADAR REMOTE SENSING DATA IN SPACE MONITORING OF FLOOD IN KAZAKHSTAN

O. P. Arkhipkin, G. N. Sagatdinova

Описаны задачи, ГИС-технологии и выходные результаты космического мониторинга прохождения паводковых вод и наводнений, которые используются в практической деятельности органов ЧС Казахстана различного уровня. При мониторинге используются данные дистанционного зондирования (ДДЗ) различного разрешения, в том числе радарные.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, чрезвычайные ситуации, ГИС-технологии, паводки, зоны затопления, радарные данные, водохранилища.

Введение

Результаты космического мониторинга прохождения паводковых вод и наводнений используются в практической деятельности казахстанскими органами ЧС различного уровня (республиканских, областных, районных) уже более 12 лет. Главными задачами космического мониторинга паводков являются: оперативный космический мониторинг схода снежного и ледяного покрова; оперативный космический мониторинг прохождения паводковых вод и наводнений; космический мониторинг динамики водной поверхности водохранилищ. Для решения этих задач были разработаны соответствующие ГИС-технологии [1], которые базируются на приемных станциях ИТЦ СКАНЕКС, установленных в Астане и Алма-Ате. Они обеспечивают несколько раз в день прием ДДЗ с американских спутников EOS (Terra и Aqua) и Suomi NPP в режиме прямого сброса.

В последние года на постоянной основе используются также данные среднего разрешения – оптические Landsat и радарные данные Sentinel-1A, которые выставляются в Интернете в свободном доступе. Правда регулярность их получения не слишком высока, а регион и дата съемки от нас не зависят. В случае возникновения кризисных ситуаций в каком-либо регионе для него могут заказываться оптические и радарные космоснимки высокого разрешения. При этом решается проблема оперативности получения ДДЗ для этих регионов в необходимый период времени. В последние годы активно отрабатываются методы оптимального (и по цене, и по оперативности) использования радарных данных.

Результаты мониторинга оперативно передаются в Кризисный центр МЧС РК, а также в областные департаменты ЧС и по указанных ими адресам других заинтересованных организаций.

В текущем году в ряде регионов Казахстана (прежде всего в Карагандинской, Акмолинской и Павлодарской областях) во второй половине апреля прошел сильный для условий Казахстана паводок. Этот период использовался для отработки ГИС-технологии комплексного использования оптических и радарных ДДЗ различного разрешения для дистанционного контроля прохождения паводковых вод и наводнений.

Краткое описание технологии оперативного космического мониторинга схода снежного покрова и прохождения паводковых вод

В процессе оперативного космического мониторинга схода снежного и ледяного покрова и прохождения паводковых вод в среде ГИС формируются обзорные выходные карты, на которых отражается состояние и сход снежного и ледяного покрова и выделяются водные объекты на исследуемой территории. При этом определяются следующие основные классы подстилающей поверхности:

– снежный покров с выделением зон снеготаяния, которые представляют собой территории, где температура поверхности превышает 0 ^{o}C;

– территории, свободные от снежного покрова;

– водные объекты, покрытые льдом;

– водные поверхности, которые включают в себя постоянные водные объекты, свободные ото льда, и зоны затопления.

Выделяются также территории, закрытые облачным покровом, который не позволяет идентифицировать подстилающую поверхность Земли.

Отдельно формируются карты динамики заполнения водной поверхности водохранилищ, на которых отражается как ее текущее состояние, так и сравнение с различными предшествующими состояниями, в том числе и за предыдущие годы. В особую задачу выделен контроль динамики заполнения Гидрокомплекса Чардаринское водохранилище – Коксарайский противопаводковый контррегулятор, который введен в 2011 г. в промышленную эксплуатацию для снижения риска затопления паводковыми водами территорий в среднем течении реки Сырдарья.

Решение указанных выше прикладных задач проводится в три уровня. На первом проводится ежедневный анализ по данным низкого разрешения MODIS (разрешение 250 м). В процессе мониторинга с помощью специальных программных модулей, разработанных в среде ArcGIS, в автоматизированном режиме осуществляется классификация изображений MODIS с целью выделения указанных выше основных классов. Ценность таких данных, несмотря на низкое разрешение, состоит в том, что они получаются ежедневно, охватывают всю исследуемую территорию и дают возможность оперативно оценивать текущее состояние исследуемых объектов и отслеживать динамику их развития. На этом уровне определяется водная поверхность только крупных и больших водохранилищ.

На втором уровне привлекаются данные среднего разрешения (разрешение 15–70 м), в том числе радарные. Эти данные снимаются не каждый день, имеют более узкую полосу съемки по сравнению с данными низкого разрешения, но позволяют получить более точную информацию о состоянии изучаемых объектов.

Очень полезными данными этого уровня являются ДДЗ Landsat (пространственное разрешение 30 м), которые снимаются сценами 180x180 км и обладают высокой точностью привязки. Доступ к ним бесплатный, однако космосъемка охватывает не очень большую площадь, имеет период повторяемости 16 суток и снимаемая территория определяется собственниками спутника без учета пожелания пользователей. При необходимости оперативно уточнить результаты первого уровня на больших территориях используются на платной основе данные среднего разрешения типа AWIFS с индийского спутника RESOURCESAT-2 (пространственное разрешение 56 м), которые снимаются полосой шириной 740 км.

Отметим важность использования радарных данных. Они позволяют получать данные и днем, и ночью и видеть территорию, покрытую облаками. Это играет особо важную роль в случаях, когда вся территория покрыта плотной облачностью, что наблюдается довольно часто. Среди этих данных отметим получаемые бесплатно радарные данные с двойной поляризацией (VV/VH) со спутника SENTINEL-1 A (в режиме IWS; 3 looks), имеющих пространственное разрешение 25 м в полосе 240 км.

На третьем уровне используются радарные и оптические данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого (разрешение 1–10 м) и сверхвысокого (разрешение выше 1 м) разрешения. Эти данные используются при необходимости получить особо точную и полную информацию об объекте исследования. На этом уровне можно оценивать динамику водной поверхности практически любых водохранилищ.

Главными недостатками данных ДЗЗ, используемых на втором и третьем уровнях, являются их высокая стоимость (несколько тысяч долларов США за один космоснимок), необходимость 100 % предоплаты и предварительного заказа (за 1–2 недели до съемки). Однако сейчас ситуация меняется в лучшую сторону. Так, при возникновении критических ситуаций при паводках и наводнениях (крупные затопления населенных пунктов, прорыв плотин и т. п.) эти данные можно оперативно и бесплатно получить от международных организаций, которые курируют ЧС. Так НЦ КИТ получал такие данные в рамках международного проекта «Sentinel Asia».

Что касается оперативности заказа и получения ДДЗ высокого разрешения при возникновении крупных ЧС то, например, компания Airbus Defence and Space (Франция-Германия) разработала специальную программу [2] для этих целей, которая позволяет максимально ускорить все процедуры. В Казахстане же в текущем году один спутник высокого разрешения уже запущен, а второй готовится к запуску. После их ввода в эксплуатацию возможности оперативного использования данных высокого разрешения в интересах органов ЧС значительно возрастут.

Особенности космического мониторинга паводков в 2015 г.

В 2015 г. имелось несколько зон с хорошим паводком. Для всех этих зон были получены динамики развития паводка по данным MODIS (рис. 1) и данные Landsat (рис. 2), а для большей их части еще и поляриметрические радарные данные SENTINEL-1 A. Для 5 зон была также проведена оперативная съемка поляриметрических радарных данных TerraSar-X в режиме StripMap (разрешение 3 м). При этом территория съемки определялась по оперативным данным MODIS о зонах затопления (рис. 1), а сама съемка осуществлялась на следующий день после заказа.

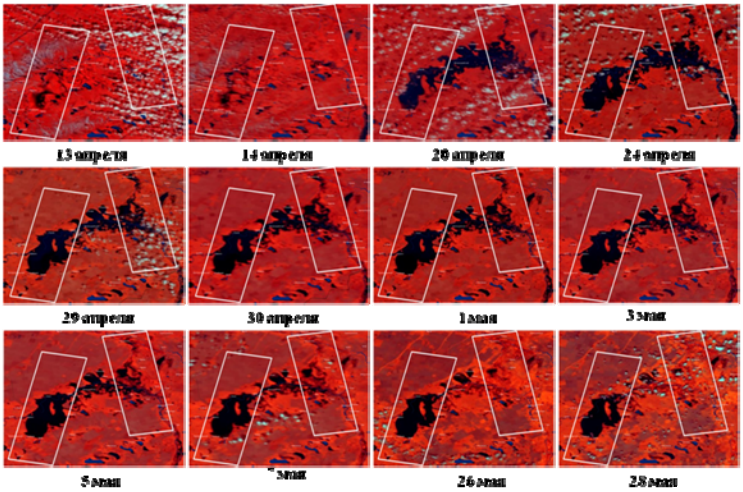


Рис. 1. Динамика зон затопления по данным MODIS в 2015 г. на р. Нура Акмолинской области в районе космосъемки TerraSar-X за 27 (слева) и 25 апреля (справа)

Поляриметрические радарные данные позволяют проводить оценку водных поверхностей как по разным поляризациям, так и по их rgb комбинациям. Так, на рис. 3 представлена rgb комбинация (VV, VH, VV*VH).

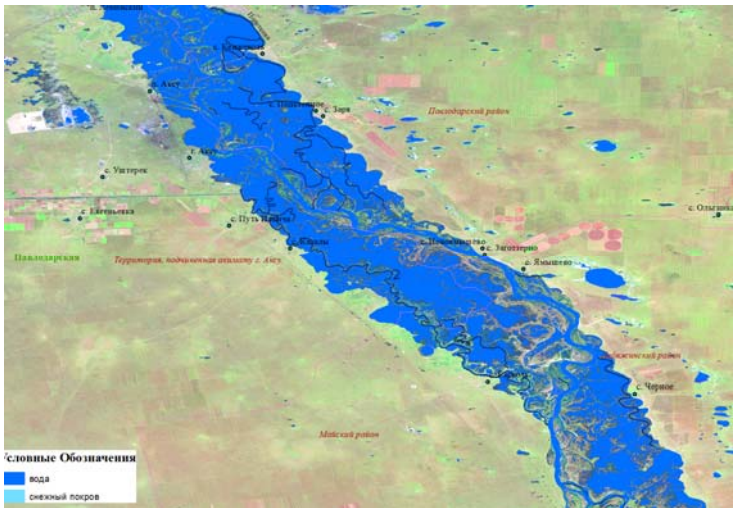


Рис. 2. Зоны затопления на р. Иртыш в районе г. Аксу Павлодарской области по данным космоснимка Landsat за 6 мая 2015 г.

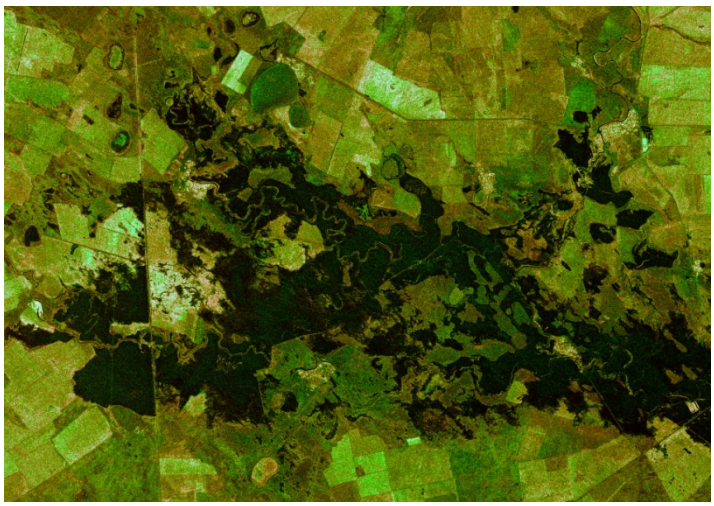


Рис. 3. Зоны затопления на р. Баксук в районе с. Жанатурмыс Акмолинской области по данным радарного космоснимка Sentinei-1 A за 19 апреля 2015 г.

Основные результаты

1. Выходные результаты ГИС-технологии космического мониторинга паводков используются органами ЧС Казахстана для оценки ситуации со сходом снежного покрова и прохождения паводковых вод уже более 12 лет.

2. В настоящее время активно разрабатываются вопросы использования радарных данных, в том числе поляриметрических при мониторинге паводков.

Список литературы

1. Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N. Development of Flood Space Monitoring in Kazakhstan // Geoscience and Remote Sensing New Achievements. Edited by Pasquale Imperatore & Daniele Riccio. ISBN 978-953-7619-97-8. Vukovar, Croatia: In Teach. 2010. Pp. 419–436.

2. Беснард М. Сервис мгновенного заказа съемки от Airbus в случаях чрезвычайных происшествий // Доклад на III Междунар. конф. «ГИС – интеграционные решения будущего». Совзонд. 15–17 апр. 2015 г. ftp://ftp.sovzond.ru/forum/2015/16.04_pdf/Besnard.pdf

УДК 528.8:581.14

ИЗУЧЕНИЕ НАЧАЛА ВЕГЕТАЦИИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырногов
ИБФ СО РАН
e-mail: irina.pugacheva@mail.ru

THE STUDY OF THE ONSET OF GREEN-UP IN KRASNOYARSK TERRITORY BY THE SATELLITE DATA

I. Yu. Botvich, A. P. Shevyrnogov
Institute of Biophysics, SB RAS

В работе представлена методика определения дат наступления периода вегетации растительности, основанная на комплексном анализе отражательных и излучательных характеристик растительных объектов (по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua). Проведено изучение начала вегетации растительности юга Красноярского края и республики Хакассии на основе спутниковой информации.

Ключевые слова: вегетация, растительность, спутниковые данные.

Введение

Материалы фенологических наблюдений являются наиболее показательными данными, отражающими реакцию биоты на климат. Обладая высокой чувствительностью к климатическим вариациям и коротким временем отклика, даты фенофаз часто используются в качестве индикаторов глобального потепления [1; 2]. Данные о границах периода вегетации также необходимы для моделирования роста и развития растительного покрова, определения урожайности сельскохозяйственных культур, планирования лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности.

Появление спутниковой информации предоставило возможность дистанционно определять даты наступления периода вегетации, как в региональном, так глобальном масштабе.

Первые данные о продолжительности периода вегетации были получены в результате обработки спутниковой информации NOAA-AVHRR [3] и были значительно уточнены с появлением прибора Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) на борту спутников Terra и Aqua [4]. В настоящее время используется ряд методов для определения границ периода вегетации:

– математические (логистические) методы (кривая значений вегетационного индекса представляется в виде нескольких логистических функций) [4]. Подобный метод используется в статьях *Fisher et al., 2006; Fisher and Mustard, 2007*; *Hmimina et al., 2013*;

– пороговые методы (threshold method) (дата начала периода вегетации определяется при достижении определенного значения величины спектрального отражения (индекса)). Данный порог подбирается индивидуально для каждого типа растительного покрова в зависимости от климатической зоны. Этот метод используется в статьях White et al., 1997; White and Nemani, 2003; White and Nemani, 2006; Delbart et al., 2006; Медведва и др. 2008; Sohee Kim et al., 2012.

Величина порога в «threshold method» определяется опытным путем с привлечением полевых геоботанических данных. В то время как параметры логистических уравнений определяются статистическим способом. Точность

логистического метода снижается за счет большого числа статистически-определенных параметров (более двух), предположении о логистическом росте растительного покрова и низкого временного разрешения спутниковых данных (влияние облачности и т. п.) [13].

На основании выше указанного весьма актуальным является разработка методики определения границ вегетации без привлечения полевых геоботанических данных и имеющих высокую точность расчета.

В настоящей работе представлена методика определения дат наступления периода вегетации, основанная на комплексном анализе отражательных и излучательных характеристик растительных объектов по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua с пространственным разрешением 250 метров.

Методика и объекты исследования

Для верификации разрабатываемой методики используются данные полевых геоботанических описаний (подспутниковых наблюдений) и многолетние данные фенонаблюдений, полученные на заповедных территориях (по программе Летописи природы). При этом изучаются агрофитоценозы и древесная растительность юга Красноярского края и республики Хакасия.

Регистрация дат начала периода вегетации проводилась на основе спутниковой информации Modis/Terra и Modis/Aqua, а обработка спутниковой информации – с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного на основе языка IDL 6.0 (the Interactive Data Language). Разработанное программное средство предусматривает выполнение предварительной и тематической обработки спутниковой информации Modis/Terra и Modis/Aqua, осуществляет расчет дат начала периода вегетации для выбранной территории.

Методика определения даты начала периода вегетации основывается на комплексном анализе спутниковых данных, полученных в красном (620–670 нм), ближнем инфракрасном (841–876 нм) каналах совместно с данными о радиационной температуре, восстановленной по данным измеренным радиометром Modis в тепловых инфракрасных каналах №31 (10.780-11.280 мкм) и №32 (11.770-12.270 мкм).

Разработанная методика автоматизированного построения карт дат наступления периода вегетации включает следующие шаги:

– в ходе предварительной обработки снимков производится преобразование проекции снимков, из Sinusoidal projection в Universal Transverse Mercator (UTM). Для построения маски выпавших значений данных исключается информация с облачным покровом, тенями от облаков, полученная при Зенитном угле наблюдения более 40°.

– в ходе тематической обработки спутниковых изображений производится расчет средних значений NDVI (дневных) и среднесуточных значений радиационной температуры по данным прибора Modis спутниковTerra и Aqua.

– построение карты даты перехода среднесуточной температуры через порог +5 °С в период подъема температуры на основе ранее полученных среднесуточных значений радиационной температуры (T_{mean}).

– классификация типов земной поверхности (Isodata), основываясь на данных временных серий прибора Modis. Основной задачей данной классификации является выделение сельскохозяйственных угодий, вечнозеленой растительности и водных объектов по данным временных значений NDVI с 250-метровым пространственным разрешением.

– построение карты дат начала периода вегетации. Выбранный момент времени считается датой начала периода вегетации, если выполняются определенные условия.

1. В качестве даты начала вегетации может быть выбран день ($t+\Delta t$) со среднесуточной температурой выше +5 °С при условии, что все последующие дни имеют температуру выше 0 °С.

2. Тангенс угла наклона касательной прямой (tg α), проведенной к графику функции y=NDVI(T) в точке с абсциссой $T_{t+\Delta t}$ превышает значения тангенсов углов наклонов касательных прямых в точках с абсциссой T_t, $T_{t-\Delta t, \ldots}$ при среднесуточной температуре выше +5 °C.

Обсуждения и результаты

Использование нормализованного отношения спектральных диапазонов красной (ρ_{red}) и ближней инфракрасной (ρ_{NIR}) областей оптического спектра, значений NDVI позволяет охарактеризовать физиологическое состояние, динамику фитопигментов и биологическую продуктивность растений. Изучение радиационной температуры, восстановленной по спутниковым данным, дает информацию о температуре поверхности исследуемого объекта и определяется прежде всего его физико-химическим состоянием.

Для определения даты начала периода вегетации важными являются наблюдения за особенностями сезонного развития растительности. Использование температурного ограничительного порога позволяет определить дату теоретического начала весеннего роста и, следовательно, развития растительности.

На рисунке представлен фазовый портрет растительного объекта в двумерном пространстве значений среднесуточной яркостной температуры и значений NDVI.

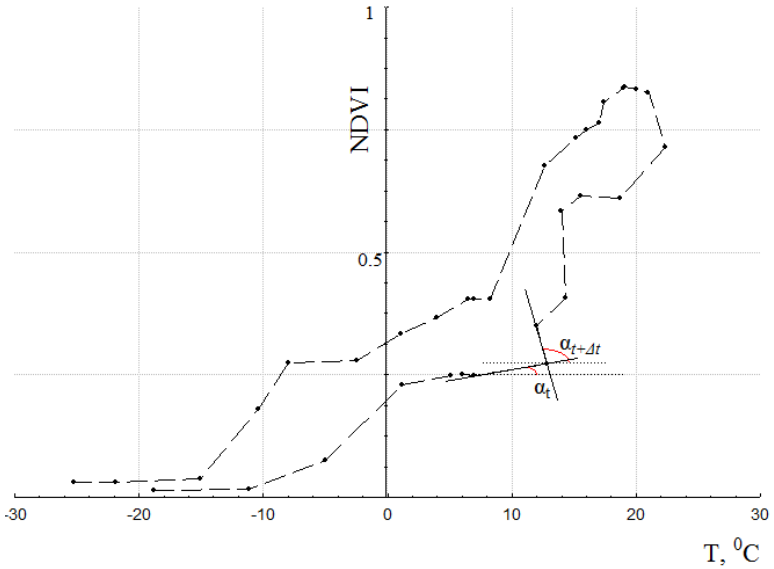


Рис. Фазовый портрет растительного объекта в двумерном пространстве значений среднесуточной яркостной температуры и NDVI

Анализ полученных данных показал, что форму фазовой кривой NDVI(T) растительного объекта условно можно разделить на несколько зон. Рассмотрим участок кривой со среднесуточной температурой более +5 °C. По Шульцу, переход среднесуточной температуры через +5 °C свидетельствует о начале оживления весны. Форма участка фазовой кривой в виде плато в течение определенного периода времени свидетельствует о стабилизации фитоценоза, нахождении его в неизменном состоянии. В данном случае наличие плато свидетельствует об отсутствии вегетации. Для начала роста растениям необходимо накопление определенного объем тепла (суммы положительных температур). В момент времени, когда требуемый объем тепла накоплен, ход кривой y = NDVI(T) нарушается. Это свидетельствует о появлении критической точки (с абсциссой $T_{t+\Delta t}$) в функционировании фитоценоза – начале вегетации растительности. Как видно на рис., значения NDVI начинают стремительно

расти. Согласно данным наземных полевых исследований данный рост значений обусловлен началом активной вегетации растительности – появлением зеленой фитомассы. До появления всходов растений на почве значения NDVI изменяются несущественно. Основной причиной колебания здесь являются изменения характеристик почвенного покрова.

Одним из главных преимуществ предложенного метода является отсутствие необходимости установления пороговых значений. Метод основывается на анализе спутниковой информации полученной в одно и то же время в разных спектральных диапазонах. Использование наземных данных, в том числе и метеорологических, полученных с наземных метеорологических станций, не требуется.

Список литературы

1. Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R. Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981–1991 // Nature. 1997. № 386. P. 698–702.
2. Bogaert J., Zhou L., Tucker C.J., Myneni R.B., Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // J. Geophys. 2002. Res 107(D11). 10.1029/2001JD001075.
3. Reed B.C., Brown J.F., VanderZee D., Loveland T.R., Merchant J.W., & Ohlen D.O. Measuring phenological variability from satellite imagery// Journal of Vegetation Science. 1994. V.5. P. 703–714.
4. 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.
5. 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.
6. Fisher J.I., Mustard J.F. Cross-scalar satellite phenology from ground Landsat and MODIS data// Remote Sensing of Environment. 2007. V 109 (3). P. 261–273.
7. 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.
8. White M.A., Thornton P.E., Steven W.R. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability // Global Biogeochemical Cycles. 1997. V. 11. P. 217–234.
9. White M.A., Nemani R.R.. Canopy duration has little influence on annual carbon storage in the deciduous broadleaf forest // Global Change Biology. 2003. V. 9. P. 967–972.
10. White M.A., Nemani R.R. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 104. P. 43–49.
11. Delbart N., Toan T.L., Kergoa, L., Fedotova V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: a free of snow-effect method using MOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004) // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 101. P. 52–62.
12. Медведева М.А., Барталёв С.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. ст. 2008. Вып. 5 (2). С. 313–321.
13. 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.

УДК 528.8

ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ИНДЕКСА NDVI РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО МНОГОЛЕТНИМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

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

Проведены исследования вариаций вегетационного индекса NDVI растительного покрова мерзлотного региона по данным многолетних спутниковых наблюдений (набор данных проекта GIMMS, май-сентябрь 1982–2013 гг.). Построена карта трендовой динамики NDVI. Показаны особенности вариаций NDVI на территории центральной Якутии после крупномасштабных лесных пожаров. В работе использованы данные сети метеостанций Росгидромета, ГУ «Авиалесоохрана», спутника Terra/MODIS и модели GLDAS.

Ключевые слова: NDVI, влажность, лесные пожары, вечная мерзлота.

Введение

В условиях глобального изменения климата мониторинг изменений природной среды является одной из наиболее актуальных задач экологии. Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов растительный покров является чувствительным «индикатором» изменений в биосфере и климате. В мерзлотных регионах состояние растительности зависит от изменений климатических факторов и гидротермического режима мерзлотных почв. За последние три десятилетия на северных широтах наблюдается тенденция роста вегетационного индекса NDVI [1–6].

В работе приведены результаты исследований вариаций индекса NDVI растительности мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири по данным спутниковых наблюдений. Показаны особенности годовых вариаций NDVI на территории центральной Якутии на фазе восстановления растительного покрова после крупномасштабных лесных пожаров.

Данные

Анализ вариаций NDVI за период 1982–2013 гг. проводился по данным проекта GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies), основанным на многолетних наблюдениях спутников NOAA. Вегетационный сезон рассматривался с мая по сентябрь. По данным модели GLDAS (Global Land Data Assimilation System) была построена влажность почвы на глубине 1–2 м. Значения температуры приземного слоя воздуха и атмосферных осадков взяты из архива данных Росгидромета. Все данные получены из открытых источников (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Giovanni; http://glcf.umd.edu/data/gimms; http://meteo.ru/data). Площадь лесных пожаров на территории Горного лесхоза (центральная Якутия) оценивалась по данным ГУ «Авиалесоохрана» и данным спутника Terra/MODIS.

Обсуждение

На рис. 1 приведена карта трендов NDVI растительного покрова в азиатской части России, построенная за период май-сентябрь 1982–2013 гг. Белыми контурами обозначены административные границы. Согласно цветовой градации рис. 1 положительным значениям тренда NDVI соответствуют оттенки зеленого цвета, отрицательным – оттенки красного цвета. Из рис. 1 видно, что зоны с наибольшими значениями (~10–15 %) тренда NDVI располагаются севернее Приленского плато. По данным сети метеостанций Росгидромета в целом по региону наблюдается

положительная тенденция приземной температуры воздуха. На остальной территории Восточной Сибири, на Среднесибирском плоскогорье (районы Хантайского и Вилюйского водохранилищ) и на полуостровах Чукотский и Камчатский наблюдаются локализации наибольших отрицательных трендов NDVI.

В центральной части Якутии (рис. 1) на Приленском плато черным контуром показаны границы Горного лесхоза. Площадь лесхоза составляет ~45 тыс. км^2, преобладающий тип растительности на территории участка – лиственница. Здесь также в меньшем количестве произрастает береза и другие типы растительности.

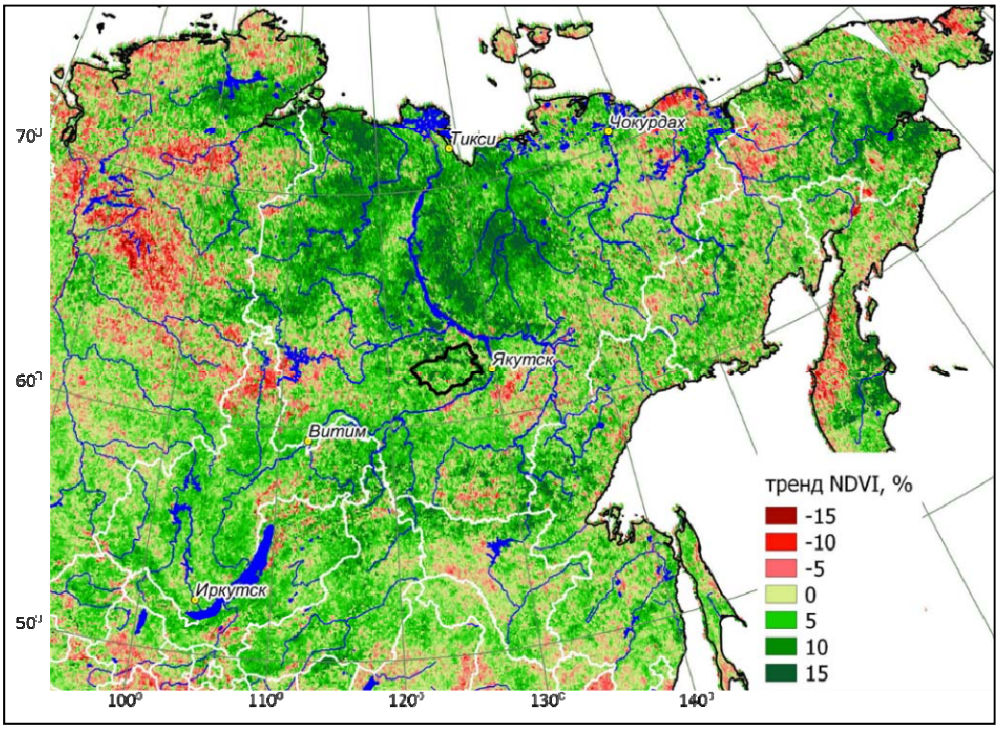


Рис. 1. Карта тренда NDVI по данным GIMMS за май-сентябрь 1982–2013 гг. Горный лесхоз выделен черным контуром

На рис. 2 показаны графики среднесезонных вариаций рассматриваемых параметров на территории Горного лесхоза: 1 – NDVI, 2 – влажность почвы на глубине 1–2 м, 3 – площадь гарей по данным Авиалесоохраны, 4 – площадь гарей по данным спутника Terra/MODIS.

Показано, что в течение последних трех десятилетий наблюдается тенденция роста NDVI и влажности почвы. Отмечается хорошая корреляционная связь NDVI с влажностью почвы (r = 0,66), с температурой воздуха (r = 0,57) и ее отсутствие с вариациями атмосферных осадков (рис. 3), уровень которых довольно низок.

Характер сезонных вариаций индекса NDVI и влажности почвы имеет изменчивый характер при устойчивом положительном тренде. В 2002 г. на территории Горного лесхоза произошли крупномасштабные лесные пожары общей площадью до 400 тыс. га, что отразилось в резком падении индекса NDVI. Площадные данные о лесных пожарах, полученные по наземным и спутниковым наблюдениям 2001–2002 гг., имеют некоторые расхождения. Из всей выгоревшей площади около 74 % пришлось на покрытую лесом территорию.

В течение 5–6 «послепожарных» лет наблюдается непрерывный устойчивый рост влажности почвы, которое можно объяснить тем, что вызванное лесными пожарами резкое снижение альбедо земной поверхности нарушило тепловой баланс грунтов и

привело к увеличению глубины сезонной оттайки вечной мерзлоты и, следовательно, к повышению влажности почвы. Аналогичные результаты приведены в работах [7–8], где показано, что пожары 2002 г. в центральной Якутии вызвали повышение температуры грунта на 0,5–1 ^{0}C и увеличение мощности сезонно-талого слоя на 0,3–0,5 м. Естественно, что благоприятные условия (влажность и температура) способствовали повышению качества растительности – в послепожарный период наблюдается устойчивый рост NDVI. В дальнейшем восстановление отражательных характеристик растительного покрова привело к восстановлению теплового режима мерзлотных грунтов и, соответственно, к снижению влажности почвы.

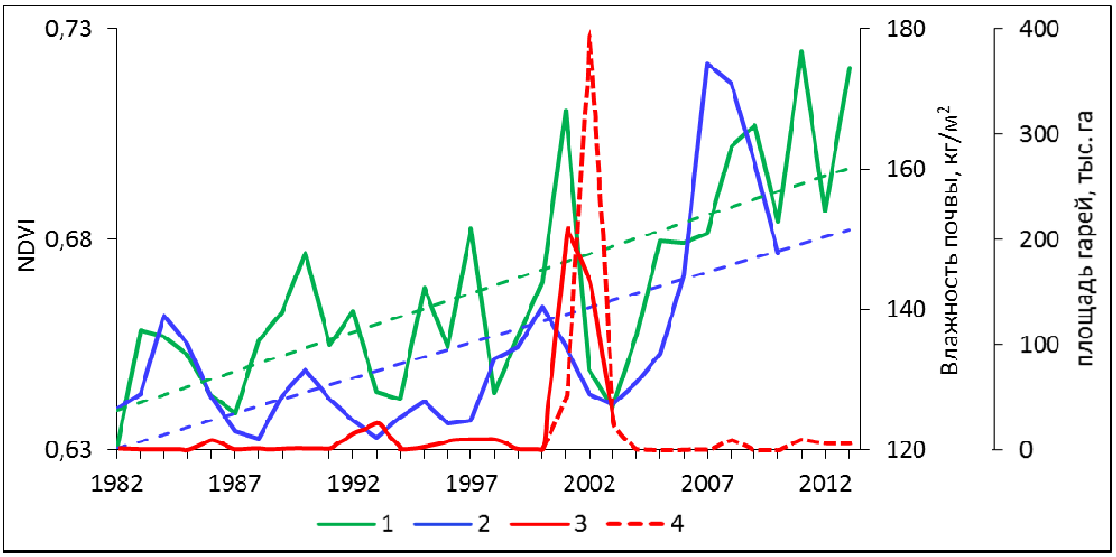


Рис. 2. Среднесезонные вариации NDVI, влажности почвы на глубине 1–2 м и площади гарей Горного лесхоза

На рис. 3 показаны графики среднесезонных вариаций температуры воздуха и суммы атмосферных осадков по данным метеостанций, расположенных на территории участка. Здесь также наблюдается высокая тенденция роста температуры воздуха, что характерно и для всего региона Якутии. Общий тренд осадков крайне незначителен.

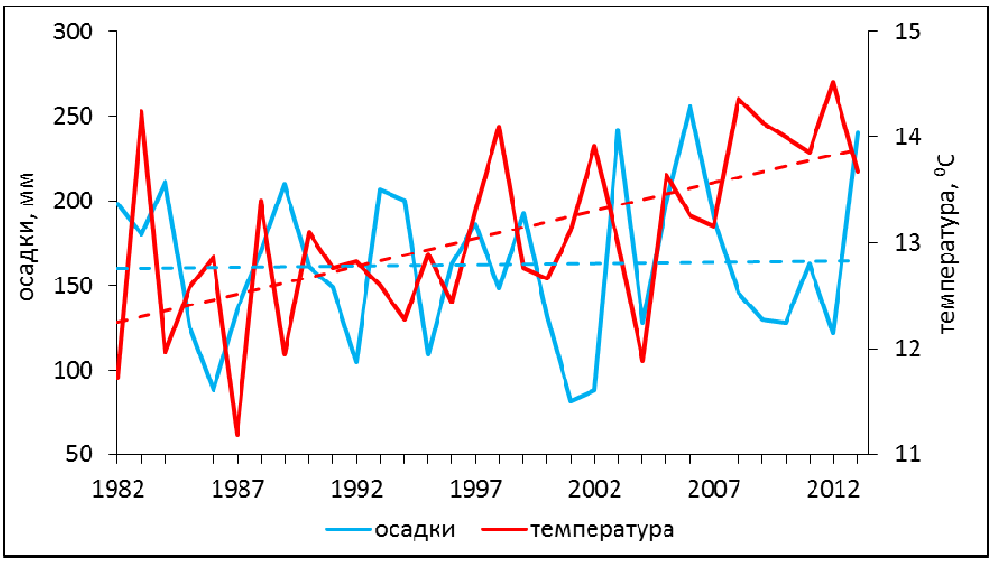


Рис. 3. Среднесезонные вариации температуры воздуха и суммы атмосферных осадков Горного лесхоза

Выводы

Трендовая динамика NDVI растительного покрова Восточной Сибири за период 1982–2013 гг. различна, но в целом преобладает тенденция роста. Наиболее высокие положительные изменения (~10–15 %) NDVI наблюдаются в северной части Якутии. Также отмечаются отрицательные зоны NDVI на Среднесибирском плоскогорье и на Дальнем Востоке.

На территории Горного лесхоза (центральная Якутия) за тот же период наблюдается тенденция роста индекса NDVI, влажности почвы и температуры воздуха. Следует отметить хорошую корреляционную связь NDVI с влажностью почвы r = 0,66, температурой воздуха r = ,57 и ее отсутствие с атмосферными осадками, уровень которых мал, а 30-летний тренд крайне незначителен.

Крупномасштабные лесные пожары 2002 г. в центральной Якутии вызвали заметное увеличение влажности почвы на глубине 1–2 м и рост индекса NDVI в течение «послепожарных» 5–6 лет с последующим снижением до трендовых значений.

Список литературы

1. N. Delbart, G. Picard, T. Le Toans, L. Kergoat, S. Quegan, I. Woodward, D. Dye, V. Fedotova. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale // Glob. Chang. Biol. 2008. V. 14, Iss. 3. P. 603–614.

2. 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, Iss. 10. P. 4799–4818.

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. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Особенности сезонных вариаций индекса растительности NDVI в зоне вечной мерзлоты // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. ; науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 52–56.

7. Федоров А.Н., Мачимура Т., Герасимов Е.Ю. и др. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии // Наука и образование. 2008. № 4. С. 64–67.

8. Скрябин П.Н., Варламов С.П. Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 3. С. 44–49.

УДК 528.88, 631.92

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

И. Н. Горохова
ФГБНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева
e-mail: g-irina@rambler.ru

REMOTE MONITORING OF SOIL-VEGETABLE COVER ECOLOGICAL CONDITION OF URBAN ECOSYSTEM

I. N. Gorokhova
V. V. Dokuchaev Soil Science Institute

Представлены результаты экологического мониторинга почвенно-растительного покрова с использованием материалов дистанционных съемок на ключевые участки, которые расположены в разных функциональных зонах г. Москвы и проведено сравнение информативности аэросъемки, космической съемки сверхвысокого разрешения и съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, почвенно-растительный покров, экологическое состояние, дешифрирование.

Введение

Москва – один из самых зеленых городов мира, в котором лесопарки и парки занимают около тридцати процентов площади. Однако в последние 10–15 лет процесс озеленения происходит медленнее, чем рост численности населения города и обеспеченность горожан зелеными насаждениями постоянно снижается.

Практически все зеленые насаждения Москвы имеют искусственное происхождение, их структура не соответствует региональным типам естественной растительности, они подвержены жесткому техногенному и антропогенному прессингу, что приводит к снижению их площади. Растения невозможно также рассматривать в отрыве от почвы, которая в условиях города подвергается повышенному антропогенному воздействию. Поэтому для сохранения почвенно-растительного покрова мегаполиса крайне важным является ведение дистанционного мониторинга, обеспечивающего постоянный контроль сложившейся ситуации.

До 90-х годов изучение городских экосистем в нашей стране велось преимущественно наземными методами, что было обусловлено сложностью получения дистанционной информации на территорию крупного города. В настоящее время активно используются различные материалы дистанционного зондирования, которые помогают изучать состояние городской среды [1–3 и др.].

Целью исследований является мониторинг и анализ экологического состояния почвенно-растительного покрова разных функциональных зон города Москвы с использованием различных видов дистанционной информации и сравнение информативности аэросъемки, космической съемки сверхвысокого разрешения и съемки с БПЛА.

Объект и методы изучения

Объектом изучения стали ключевые участки «Нововладыкино» (промышленная зона, территория вдоль Алтуфьевского шоссе, жилые кварталы), «Лианозово» (Лианозовский лесопарк, лесопитомник, парк, сквер), расположенные в Северо-

Западном округе г. Москвы и «Курилово» (поселок городского типа с прилегающими лесами) на территории Новой Москвы. Площадь каждого участка составляет около 200 га.

Для дешифрирования использовались материалы крупномасштабной цветной аэрофотосъемки (1:10000, сентябрь 2000 г.), синтезированный спектрозональный космический снимок сверхвысокого разрешения QUICK BIRD (август 2010 г.), снимки с легкого беспилотного летательного аппарата «Птеро-М» (высота съемки 300 м, август 2012 г.) и современные геоинформационные технологии (ГИС оболочки MapInfo и Arcgis). По результатам исследований была создана цифровая экологическая карта на территории ключевых участков за 2000–2010 гг. («Нововладыкино», «Лианозово») и 2012 г. («Курилово»).

Оптимальный период съемки определен в августе–сентябре, когда лучше всего проявляется жизненность городских зеленых насаждений, с такими морфологическими особенностями, как хлороз и некроз листовых пластинок, разреженность крон, суховершинность и др.

Карта создавалась путем автоматизированного дешифрирования ортофотоплана, составленного по аэро- и космоснимкам. Результаты дешифрирования совмещались с единой государственной картографической основой (ЕГКО). При дешифрировании проводился анализ тона, структуры рисунка фотоизображения, формы и размера объектов, их расположение по отношению к инфраструктуре. Не меньшее внимание обращалось на косвенные дешифровочные признаки – выявление взаимных связей между элементами рельефа, растительностью и почвами.

Карта, созданная по материалам дистанционных съемок, корректировалась и дополнялась за счет данных, полученных путем традиционных наземных маршрутных обследований.

Проведение мониторинга почвенно-растительного покрова повлекло за собой необходимость создания геоинформационной системы, способной упорядочить информацию о мегаполисе. ГИС включает результаты наземных и лабораторных исследований, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова; цифровые ортофотопланы, составленные по дистанционным материалам, а также экологическую карту, созданную на единой государственной картографической основе г. Москвы.

Результаты исследований

Экологическое состояние почвенно-растительного покрова ключевого участка «Нововладыкино», определяемое по комплексу проведенных работ, свидетельствует о том, что за период с 2000 по 2010 гг. произошли следующие изменения: значительно улучшилось состояние газонов, сократилась площадь переуплотненных и сильноуплотненных почв за счет большого количества организованных дорожек с плиточным покрытием в скверах, увеличилась площадь древесно-кустарниковой растительности в парке «Отрада» (с 6,26 до 6,51 га) и в сквере на ул. Хачатуряна (с 9,87 до 12,67 га); на территории промышленных предприятий не осталось свалок. Вместе с тем увеличилась интенсивность транспортного потока и, как следствие, сократилась площадь газонов (с 5,19 до 2,54 га), и ухудшилось состояние древесных посадок вдоль шоссе. Площадь естественных почв уменьшилась за счет расширения промышленной зоны (с 17,89 до 13,16 га), также увеличилась площадь запечатанных (под асфальтом и зданиями) почв (с 119,63 до 133,68 га), и сократилась площадь зеленых насаждений на территории промышленных предприятий (с 4,84 до 3,79 га).

Экологический мониторинг почвенно-растительного покрова ключевого участка «Лианозово» за тот же период фиксирует следующие изменения: площадь древесно-кустарниковой растительности сократилась с 173,0 до 170,8 га, прежде всего в парке, сквере за счет прокладки дорожек и строительства дополнительных павильонов,

автостоянок. Также выявлено, что состояние лесопитомника и лесопарка ухудшилось, о чем свидетельствует изменение величины сомкнутости верхнего полога деревьев и образование прогалин и полян в лесу. В Лианозовском лесопитомнике сомкнутость полога (в долях единицы) в центральной и северо-западной частях снизилась с 0,67 до 0,47 и с 0,59 до 0,57 соответственно, а в лесопарке Лианозово в северной части с 0,4–0,3 до 0,3–0,2 и в центральной части с 0,58 до 0,45. Площадь открытых пространств увеличились в лесопитомнике с 27,4 до 29,5 га, а в северной части лесопарка с 4,9 до 5,7 га. Площадь дорожно-тропиночной сети, которая является одним из показателей усилившейся рекреационной нагрузки, изменилась в лесопарке с 1,7 до 2,5 га и в сквере у лесопитомника с 0,8 до 1,6 га.

Исследования ключевого участка «Курилово» выявили, что в почвенном покрове преобладают и сохранены ареалы естественных почв (123,76 га), расположенные в лесах, балках и на лугах вокруг поселка. Антропогенно-преобразованные группы почв под застройкой, дорогами, промпредприятиями и др. составляют 56,06 га, техногенные – 4,73 га. Зеленые насаждения ключевого участка представлены лесами (84,65 га), городскими (4,25 га) и садово-огородными (12,56 га) посадками. Леса состоят из производных березовых (67,6 га) и еловых одновозрастных деревьев (17,05 га). В результате строительства дорог вокруг поселка и, как следствие, подтопления почво-грунтов произошло падение деревьев (1,7 га) и усыхание крон (1,19 га) у берез. Еловые леса на площади 2,1 га оказались поражены и уничтожены вредителем жуком-типографом. Значительную площадь исследуемой территории занимают карьеры (6,27 га), один из которых (3,07 га) засыпан промышленно-бытовыми отходами и загрязнил почвенный покров, что подтверждено лабораторными химическими анализами (повышенное валовое содержание меди (68 мг/кг), подвижных форм свинца (6–14 мг/кг)).

Сравнение информативности дистанционных материалов

Аэрофотоизображение (1:10000) различных компонентов городской экосистемы более детальное и четкое, чем изображение на космических снимках сверхвысокого разрешения (0,6 м), хотя по информативности они достаточно близки. Поэтому аэрофотоснимки лучше использовать для создания базовых карт, регулярно обновляемых по материалам космической съемки.

По материалам аэро- и космической съемки сверхвысокого разрешения возможно: структурное разделение территории на жилые кварталы, промышленные предприятия, гаражные кооперативы, индивидуальные гаражи, автостоянки; разделение участков городской рекреации на лесопарки, парки, скверы, бульвары, сады, дворовые посадки; распознавание в лесопарках деревьев с преобладанием хвойных и лиственных пород; определение участков погибших, поваленных и усохших деревьев, выявление изменений санитарно-лесопатологического состояния зеленых насаждений; определение сомкнутости верхнего полога крон деревьев; границ и площадей природоохранных и водоохранных зон городского водного фонда (рек, водохранилищ, прудов), таких показателей как залесенность, заболоченность и заозеренность природоохранных зон, отслеживание появлений в зоне несанкционированных строений (расширяющихся промышленных предприятий, гаражных кооперативов) и свалок; оценка рекреационных нагрузок – площади дорожно-тропиночной сети, степени рекреационной нагрузки; выявление нарушенности вертикальной и горизонтальной структуры посадок городских зеленых насаждений, нарушенности газонов и ее степени; определение потенциальных участков с различным характером загрязнения почв; площади и баланс запечатанных и открытых почв. Вместе с тем невозможно определение видового состава отдельных деревьев, а измененное состояние листвы (хлороз, некроз), суховершинность фиксируются только у значительных по площади

групп и куртин зеленых насаждений. Загрязнение почв сильной и очень сильной степени возможно выделить только на ярко контрастирующих с окружающей территорией участках и под свалками.

Беспилотные технологии – новое современное направление в изучении экосистем. Они рассчитаны на исследование небольших (несколько десятков км^2) по площади, но необходимых для оперативного анализа территорий. Используемые нами снимки с легкого беспилотного летательного аппарата обладают высокой разрешающей способностью (до 10 см) и позволили быстро и надежно провести экологический анализ почвенно-растительного покрова урбанизированной экосистемы.

Информационные возможности материалов с БПЛА позволяют в лесу подсчитать количество деревьев верхнего яруса, определить происхождение леса (естественный, искусственный, производный), состояние (вырубки, суховершинность, снеголомы, ветровалы, поражение хвойных деревьев жуком-типографом и др.), возраст и видовой состав практически каждого дерева, в местах вырубки – видовой состав подроста. По снимкам с БПЛА также возможно выделить преобладающий тип естественных почв и очаги загрязнения, антропогенные и техногенные группы почв и их комплексы, переуплотненные, механически разрушенные, запечатанные почвы и др.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность ведения дистанционного мониторинга экологического состояния городских экосистем с использованием различных материалов дистанционного зондирования и постоянного обновления результатов мониторинга в рамках ГИС. Наиболее оптимальное время съемки и полевых исследований – август, сентябрь, когда лучше всего проявляется жизненность городских зеленых насаждений. В качестве базовой картографической основы лучше использовать крупномасштабную аэрофотосъемку, которую необходимо постоянно обновлять информацией с космической съемки сверхвысокого разрешения. Для оперативного и более детального анализа небольших территорий (особо охраняемые территории, например) эффективно использование информации с БПЛА.

Список литературы

1. Горохова И.Н. Использование космической съемки высокого разрешения для ведения мониторинга городских экологических систем // Почвоведение. 2011. № 2. С. 250–260.

2. Горохова И.Н., Борисочкина Т.И., Шишконакова Е.А. Оценка состояния урбоэкосистем на основе материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2013. № 4. С. 492–504.

3. Горохова И.Н., Борисочкина Т.И., Шишконакова Е.А. Использование снимков с беспилотного летательного аппарата для оценки экологического состояния почвенно-растительного покрова урбанизированной экосистемы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 74. 2014. С. 78–89.

УДК 528.873.041.3

РАСЧЁТ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ЗНАЧЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫМ ПО ТЕПЛОВЫМ СНИМКАМ (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-КУРИЛЬСКОГО РАЙОНА)

М. Ю. Грищенко[1,2], К. К. Чернулич[1]
[1]МГУ им. М. В. Ломоносова
[2]Государственный природный заповедник «Курильский»
e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

CALCULATION OF THE AIR TEMPERATURE VALUES USING THE SURFACE TEMPERATURE VALUES OBTAINED BY THE THERMAL IMAGERY (CASE OF YUZHNO-KURILSK DISTRICT)

M. Y. Grishchenko[1,2], K. K. Chernulich[1]
[1]Lomonosov MSU, Faculty of Geography
[2]State nature reserve "Kurilsky"
e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

В работе рассмотрено сопоставление значений температуры земной поверхности, полученных на основе обработки тепловых космических снимков со спутника Landsat 8 и значений температуры воздуха, измеренных с помощью метеорологических приборов на местности. Для имеющихся данных получена линейная зависимость, среднеквадратическая погрешность расчёта значений температуры воздуха по ней оценена в 3,2°С.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, температура земной поверхности, температура атмосферного воздуха, остров Кунашир.

Введение

Значения температуры воздуха обычно получают по данным метеостанций. Однако в последние годы XX в. сеть государственных метеостанций на Дальнем Востоке значительно сократилась, и сейчас по его значительным территориям метеорологических данных нет. Авторам представляется актуальным использование для получения значений температуры воздуха космическим снимков в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловых космических снимков), так как они характеризуются пространственной непрерывностью. По тепловым космическим снимкам можно получить значения температуры земной поверхности.

Вопросу перехода от значений температуры земной поверхности, полученных по тепловым космическим снимкам, к значениям температуры воздуха посвящено некоторое количество исследований. Известна работа Никлоса с соавторами (Университет Валенсии, физический факультет) [2], которые работали на территории на востоке Испании. В их исследовании представлено несколько вариантов зависимости между значениями температуры земной поверхности, полученными по спутниковым данным, и значениями температуры приземного слоя атмосферного воздуха, причём отдельно выделяются зависимости для дневных и ночных данных. Среднеквадратическая погрешность наиболее простой зависимости оценивается авторами в 2,35 °С.

В нашей работе исследована территория островов Кунашир и Малой Курильской гряды, на которых расположен государственный природный заповедник "Курильский" и административно подчинённый ему государственный природный заказник федерального значения «Малые Курилы». Заповедник проводит полевые измерения

температуры воздуха в пределах подведомственной территории и охранной зоны, выбор изучаемой территории обоснован наличием полевых данных. Цель работы: выявление связи между температурой земной поверхности, рассчитанной по тепловым космическим снимкам, и температурой приземного слоя атмосферного воздуха, полученной по результатам полевых измерений.

Исследуемая территория характеризуется значительным разнообразием ландшафтов. Для Кунашира характерен среднегорный рельеф, северная и западная часть более гористые, чем южная и восточная. На севере острова распространены темнохвойные леса, в южной части и по западному (охотоморскому) побережью – широколиственные и хвойно-широколиственные. Повсеместно на острове открытые пространства занимают заросли курильского бамбука. Остров Шикотан – крупнейший из островов Малой Курильской гряды – характеризуется низкогорным рельефом, высшая точка – 412 м (г. Шикотан). Для острова характерно широкое распространение зарослей бамбука вперемежку с участками хвойных и смешанных лесов. Остальные острова Малой Курильской гряды являются плоскими или холмистыми участками суши, для которых характерно развитие луговых ландшафтов.

Исходные материалы и методика

Полевые измерения температуры воздуха осуществлялись следующими приборами: регистраторы температуры Hioki 3650 (6 шт.); автоматическая метеорологическая станция (АМС) Oregon Scientific WMR88 (1 шт. в 2 точках); АМС DavisVantage Pro2 (1 шт. в 10 точках). Были также проанализированы данные государственной метеорологической станции в пос. Южно-Курильск.

В работе использовались космические снимки со спутника Landsat 8 за следующие даты: 2 снимка за 19 сентября 2013 г. и 1 снимок за 2 июня 2014 г.

Значения температуры земной поверхности были рассчитаны по методике, описанной в [1]. Её суть заключается в следующем. Расчёт температуры земной поверхности производится после радиометрической калибровки снимков и компенсации влияния оптической плотности атмосферы с учётом излучательной способности различных объектов земной поверхности. Расчёты выполняются отдельно для 10 и 11 каналов снимков со спутника Landsat 8, затем они усредняются.

Результаты

При сопоставлении измеренной и рассчитанной по методике [2] температуры воздуха (рис. 1) оказалось, что разница между ними составляет от 4 до 9 °С.

В связи со значительной разницей измеренных и рассчитанных значений температуры воздуха было произведено сопоставление значений температуры земной поверхности, полученных при обработке тепловых снимков, и значений температуры атмосферного воздуха, полученных при измерениях на местности с помощью метеоприборов (таблица). При этом было выявлено, что зависимость между измеренными значениями температуры воздуха и рассчитанными значениями температуры земной поверхности линейная.

Как можно видеть из таблицы, практически во всех точках температура воздуха ниже, чем температура поверхности Земли. Исключением из этой закономерности является точка около кордона Саратовский, что, вероятно, связано с особенностями орографии и погодных условий. Различия в температурах для большинства точек колеблются от 2 до 0,5°С. В трех точках в поселке Южно-Курильск разница составляет 4,4, 3,7 и 4,5°С, что обусловлено особыми микроклиматическими условиями.

Авторы использовали 2 уравнения зависимости между значениями температуры земной поверхности и воздуха: первое – с использованием всех точек полевых измерений, второе – без учёта точки в пос. Южно-Курильск. Общая

среднеквадратическая погрешность расчёта значений температуры воздуха для первого уравнения оценена в 5,4 °С, второго – в 3,2 °С (рис. 2, 3).

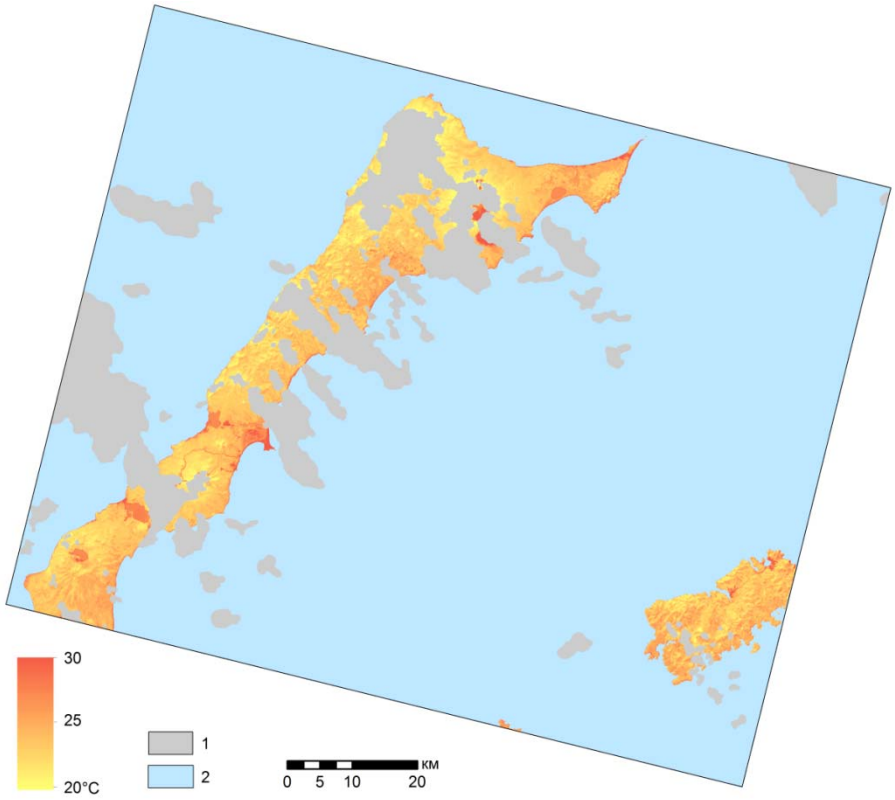


Рис. 1. Температура приземного слоя атмосферного воздуха на 19.09.2013, рассчитанная по методике [2] (для северной части территории). 1 – участки снимка, закрытые облачностью, 2 – акватории Охотского моря и Тихого океана, не участвовавшие в расчётах

Таблица

Соотношение значений температуры земной поверхности, полученных по космическим снимкам, и значений температуры атмосферного воздуха, полученных по данным метеоприборов

Снимок	Местоположение точки	Температура поверхности, °С	Температура воздуха, °С	Разница температур, °С
19.09.2013, 11:03 (северная часть)	Кордон Саратовский	16,2	15,5	0,7
	Южно-Курильск (ГМС)	21,0	16,6	4,4
	Южно-Курильск (Oregon)	23,7	20,0	3,7
	кальдера влк. Головнина	15,0	14,5	0,5
19.09.2013, 11:03 (южная часть)	Село Головнино	18,7	17,0	1,7
	кальдера влк. Головнина	15,0	14,5	0,5
	бухта Церковная	18,4	16,3	2,1
02.06.2014, 11:01 (северная часть)	Кордон Саратовский	9,4	11,5	-2,1
	Южно-Курильск (ГМС)	13,6	12,1	4,5

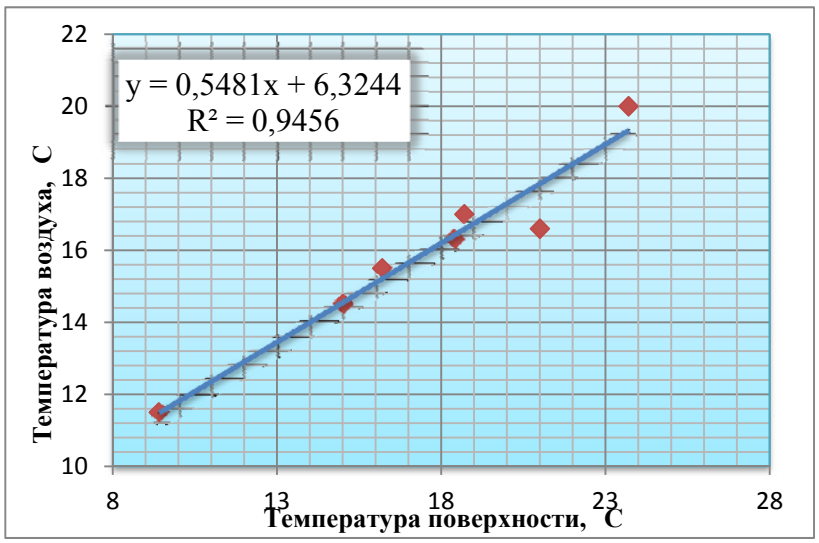


Рис. 2. Зависимость между значениями температуры земной поверхности и значениями температуры воздуха. Линия тренда и ее уравнение (2 вариант зависимости)

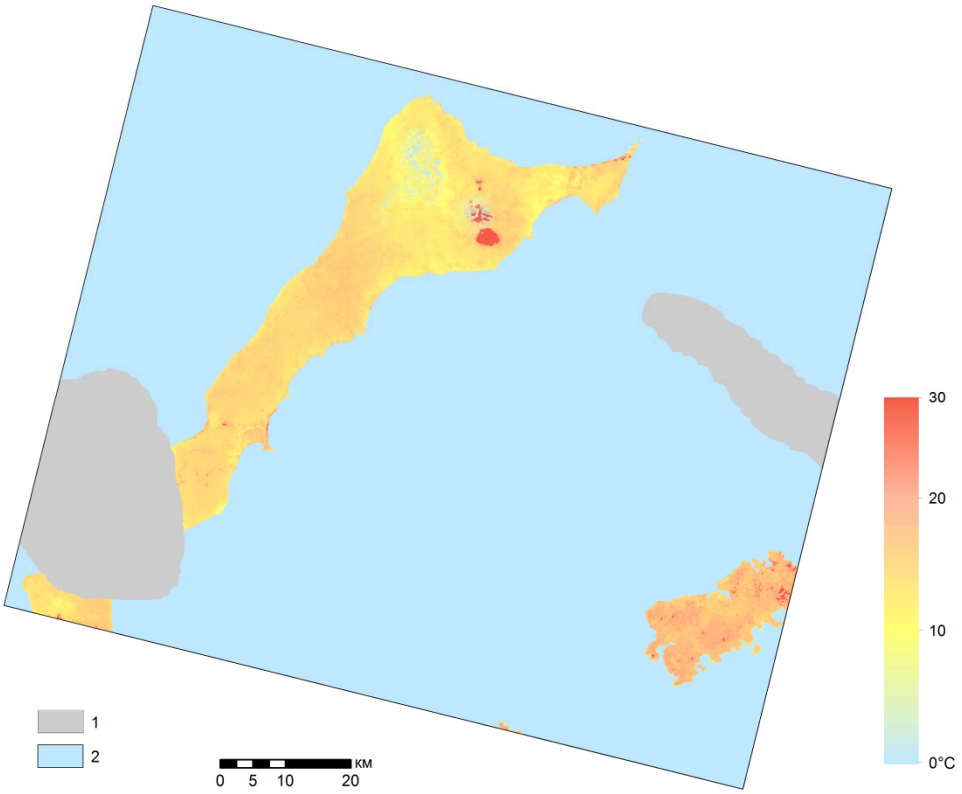


Рис. 3. Расчёт температуры приземного слоя атмосферного воздуха на 02.06.2014 (2 вариант зависимости, северная часть территории). 1 – участки снимка, закрытые облачностью, 2 – акватории Охотского моря и Тихого океана, не участвовавшие в расчётах

Выводы

При относительно небольшом количестве точек, в которых производились измерений температуры воздуха, при оценке связи значений температуры земной поверхности и температуры воздуха получен достаточно высокий коэффициент детерминации. Особенно высокий коэффициент детерминации получен для 2 вариант зависимости (0,95).

Выявлено, что дифференциация значений температуры земной поверхности обусловлена, главным образом, неоднородностью растительного покрова Южных Курил. Интересным является тот факт, что на островах Малой Курильской гряды земная поверхность значительно теплее, чем на острове Кунашир. По результатам обработки снимка за 2 июня 2014 г. острова Малой Курильской гряды характеризуются значениями температуры земной поверхности, на 5–7 °С превышающие температуры земной поверхности на Кунашире. При обработке снимков за 19 сентября 2013 г. выявлены различия от 1 до 5 °С.

Работа выполнена в рамках проектов, поддержанных грантами РФФИ 13-05-00904 и 13-05-12047 и грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-2248.2014.5.

Список литературы

1. Влияние урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок). Информационный отчет о НИР / В.И. Лялько, В.Е. Филиппович, С.А. Станкевич, А.Г. Мычак, О.В. Титаренко и др. Киев, ЦАКИЗ ИГН НАНУ. 2014. 21 с.

2. Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.

УДК 004.94

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕНИЙ

А. А. Евсюков
Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск
e-mail: alev@icm.krasn.ru

Работа посвящена разработке методов и средств для наблюдения за гидрологической обстановкой в регионе с последующим моделированием возможных затоплений. Инструментарий предназначен для индикации критических ситуаций, выявления угрозы ЧС и определения зон возможных затоплений с целью проведения оперативных мероприятий по уменьшению негативного воздействия стихии и оценки ущерба.

Ключевые слова: мониторинг гидрологической обстановки, моделирование затоплений.

Наводнения в результате прохождения весенних паводков в Сибирском регионе представляют большую опасность для жизнедеятельности человека. Ежегодно только в Красноярском крае происходит несколько десятков случаев затоплений населенных пунктов, коммуникаций, сельскохозяйственных угодий. Для оперативного проведения мероприятий по уменьшению негативного воздействия стихии ведутся ежедневные наблюдения за состоянием объектов гидрографии. Для Красноярского края, республик Хакасия и Тыва сбором гидрометеорологических данных занимается Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СУГМС), имеющее на территории этих субъектов более ста гидрологических и метеорологических пунктов наблюдения [1]. Собранные данные весьма ценны для органов МЧС, в частности для Территориального центра мониторинга и прогнозирования ЧС Главного управления МЧС России по Красноярскому краю [2].

Целью данной работы является разработка методов и средств мониторинга гидрологической обстановки, индикации критических состояний, моделирования подъемов воды, вызванных различными причинами, например высоким расходом воды, затором льда, прорывом плотины гидротехнического сооружения. Главное требование к разрабатываемым методам – быстрое определение угрозы ЧС и перечня объектов в зоне возможного затопления с целью проведения оперативных мероприятий по уменьшению негативного воздействия стихии и оценки ущерба. В качестве входных данных используется информация о высоте подъема воды (по информации с гидропостов) и характере ЧС, цифровая модель рельефа (ЦМР) и картографические слои (объекты гидрографии, хозяйственные объекты и пр.) Предлагается использовать средства ГИС-технологии совместно с технологией оперативной аналитической обработки данных (OLAP), чтобы по результатам оперативного анализа данных мониторинга проводить картографический анализ [3].

Получение и хранение данных

В основу автоматизированной системы мониторинга положены сбор и обработка данных, получаемых от разных источников: ведомственных сетей мониторинга, датчиков автоматического контроля обстановки, территориальных органов управления. Для мониторинга гидрологической обстановки используются данные из СУГМС.

Состав собираемых данных позволяет проводить оперативный контроль опасностей, анализировать динамику развития ситуации. Все данные мониторинга попадают в хранилище данных. Хранилище состоит из области длительного хранения, где размещены справочники, данные мониторинга обстановки, наборы картографической информации, а также аналитические объекты и процедуры загрузки

данных. Такая организация структуры данных определяет возможность применения средств OLAP-анализа, требующих высокой скорости доступа и обработки данных.

Построение модели обстановки

Для описания контролируемых обстановок происходит построение OLAP-моделей. При этом OLAP-технология применяется не только для выполнения стандартных операций над многомерными данными, но и для оперативного выявления опасностей (индикации) в процессе комплексного мониторинга обстановки.

Рассмотрим модель, описывающую гидрологическую обстановку. Модель использует данные из справочника гидропостов и таблицы уровней воды. Измерениями в модели являются идентификатор и наименование гидропоста, дата наблюдений. Показателями являются широта и долгота гидропоста, текущий и критический уровень воды и суточное изменение уровня. Последний показатель является агрегированным. Изменение уровня рассчитывается на основе разницы текущего уровня и уровня воды за предыдущую дату (при отсутствии каких-либо данных остается пустым).

Индикация критических состояний

Оценка рисков возникновения ЧС происходит на основе аналитических индикаторов, позволяющих сравнивать результаты аналитической обработки оперативных (первичных) данных с пороговыми значениями показателей обстановки. Пороговые (критические) значения наблюдаемых показателей имеют пространственно-временную привязку так же, как и исходные мониторинговые данные. Наличие пространственно-временной привязки мониторинговых данных делает возможным оперативное моделирование обстановки на карте. Разработанные средства географического моделирования позволяют отображать динамику изменения процессов на основе переключения временного измерения.

Визуально состояние обстановки отображается в виде цветового индикатора, раскрашенного по «принципу семафора». Нормальному состоянию обстановки соответствует зеленый индикатор. Если наблюдаемые показатели приближаются к критическому значению и достигают опасного уровня, требующего повышенного внимания, тогда индикатор аналитической модели становится желтым. При выходе за пределы допустимого интервала индикатор меняет цвет на красный – это означает, что ситуация требует немедленного реагирования.

Картографический анализ

Рассмотрим механизм отображения данных OLAP-анализа на карте. Для картографического представления оперативных данных используется модуль Яндекс. Карты для системы управления контентом Drupal. В картографический модуль внедрен шаблон метки, состоящий из графического объекта и текста. Шаблон включает в себя изображение и текст. Для гидрологической обстановки выбран показатель суточного изменение уровня воды (рис. 1). Контур метки раскрашен цветом индикатора, зеленым – в нормальном состоянии, желтым – при приближении к критическому значению уровня воды, красным – в случае его превышения. Кроме шаблона метки разработан шаблон информационного окна, содержащего более подробную информацию об объекте: наименование гидропоста, дату наблюдения, текущий и критический уровень воды.

Модуль Яндекс. Карты получает данные OLAP-модели из сгенерированного xml-файла, состоящего из данных, полученных в результате среза гиперкуба по текущей дате. На основе полученных данных формируется новый картографический слой. Размещение объектов производится с использованием встроенных методов кластеризации: объекты, изображения которых накладываются друг на друга при

заданном масштабе, объединяются в группы. Для навигации по группам разработан шаблон кластера, позволяющий получать информацию по каждому объекту группы.

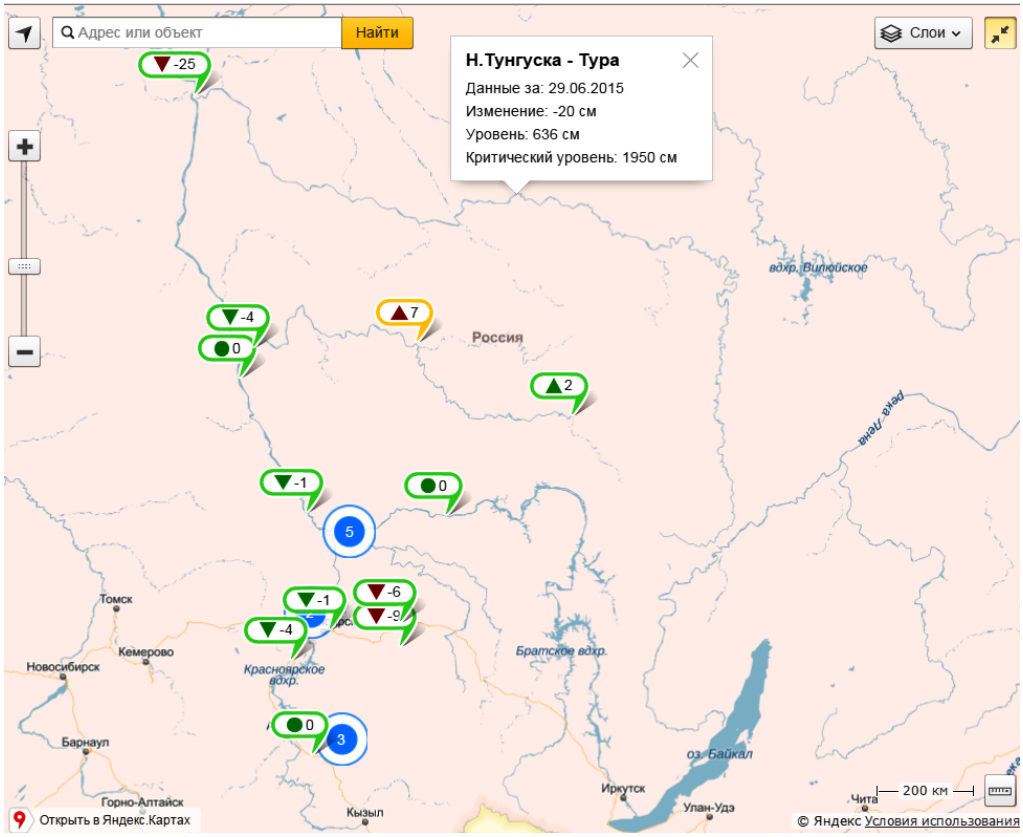


Рис. 1. Отображение гидрологической обстановки

Моделирование последствий ЧС

Для картографического анализа зон затопления рассмотрим линейное поднятие уровня воды (заполнение водохранилищ, рис. 2, *а*) и расчет зон затопления с учетом уклона реки (паводок, авария на гидротехническом сооружении, рис. 2, *б*). Для оценки затопления территории необходимо подготовить следующие входные данные:

– ЦМР, представляющая собой регулярную сетку высот, построенную на основе результатов радарной топографической съемки Земли SRTM [4];

– *опорный* линейный слой водотоков рассматриваемой местности;

– набор слоев карты, необходимый для определения объектов в зоне затопления.

При линейном поднятии уровня воды рассчитывается и визуализируется область, значения высоты внутри которой ниже уровня затопления. Задача сводится к построению замкнутой изолинии на регулярной сетке для заданной высоты δ, равной уровню затопления.

При моделировании затопления вдоль объекта гидрографии, имеющего уклон, используется *опорный* линейный слой водотоков рассматриваемой местности (на рис. 3 отмечен пунктиром). На основе данных мониторинга задаются уровни подъема воды для каждой реки из *опорного* слоя на всей протяженности, либо на их отдельных участках. С его помощью определяется R – множество *ключевых* узлов ЦМР. Узел сетки попадает в множество R, если он является одним из четырех ближайших узлов для вершины объекта *опорного* слоя, при этом имеет наименьшее значение высоты в сравнении с тремя другими соседними узлами сетки. На основе полученных *ключевых* точек происходит определение русла рек, заданных в *опорном* слое. Для определения зоны затопления из найденных *ключевых* узлов сетки строятся перпендикуляры к

ближайшим отрезкам *опорного* слоя, чтобы найти две точки пересечения с изолиниями ЦМР, высота в которых соответствует уровню воды δ' в *ключевой* точке. По найденным точкам пересечений строится изолиния, являющейся границей зоны затопления.

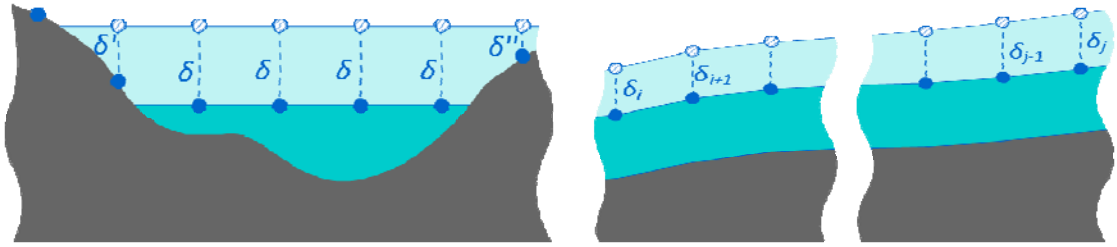


Рис. 2. *а* и *б* – линейное поднятие уровня воды (слева) и учитывающее уклон (справа)

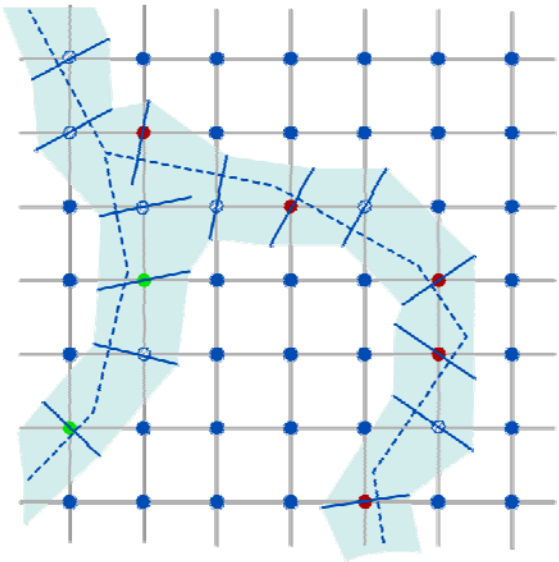


Рис. 3. Построение зоны затопления с учетом уклона реки

Рассчитанная зона затопления может быть отображена в виде площадного слоя. Для оценки последствий ЧС предусмотрена возможность построения списка объектов картографических слоев, оказавшихся внутри зоны затопления.

Выводы

Картографическое представление данных мониторинга гидрологической обстановки увеличивает эффективность использования оперативной информации в органах управления МЧС. Применение систем автоматизированного мониторинга повышает на более качественный уровень эффективность управления мероприятиями по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Сайт Федерального государственного бюджетного учреждения «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». [Электронный ресурс]. <http://meteo.krasnoyarsk.ru/ > (01.06.2015)

2. Сайт Территориального центра мониторинга и прогнозирования ЧС Главного управления МЧС России по Красноярскому краю. [Электронный ресурс]. <http://tcmp.krasn.ru// > (01.06.2015)

3. Евсюков А.А. Оперативное географическое моделирование в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь. 2013. № 5. Москва. С. 53–57.

4. Описание и получение данных SRTM. [Электронный ресурс]. <http://gis-lab.info/qa/srtm.html> (01.06.2015)

УДК 528.8.04, 528.88

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ NDVI В АГРОЛАНДШАФТАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Ю. Зверева[(1)], Г. В. Лобанов[(1)], Б. В. Тришкин[(2)], А. П. Ужакина[(1)]
[(1)]ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет
им. ак. И. Г. Петровского»
[(2)]Филиал НОУ ВПО «Московский психолого-социальный университет» в г. Брянске
e-mail: Zverek1206@mail.ru
e-mail: lobanov_grigorii@mail.ru
e-mail: pyramyd@mail.ru
e-mail: a.uzhakina2012@yandex.ru

Выявлено влияние погодных условий на распределение значений NDVI в агроландшафтах Брянской области. Для каждого типа ландшафта был проанализирован ряд данных, влияющих на их результат: природные особенности территории, фенологическая фаза, метеоусловия весенних месяцев и характер предшествующей зимы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, агроландшафты, вегетационный индекс.

Агроландшафты – территории длительного сельскохозяйственного землепользования в Брянской области, которые сформировались на основе разных типов природных ландшафтов – моренных, опольских, предопольских, полесских, предполесских, эрозионно-денудационных. В структуре агроландшафтов доминируют пахотные угодья, расположенные преимущественно на возвышенных, хорошо дренируемых местностях. Почвенный покров пахотных угодий отличается большой контрастностью. Почвенные выделы рассматриваются как элементы морфологической структуры агроландшафтов, отличающихся особенностями функционирования, сезонной и многолетней ритмики. Динамика морфологических элементов определяется специфическим сочетанием свойств ландшафтов-предшественников (рельеф, почвообразующие породы, микроклимат), изменённых компонентов геосистем (водный и термический режим) и особенностей хозяйственной деятельности (структуры севооборотов, состава культур). Чередование состояний агроландшафта характеризуется интегральным показателем – продуктивностью. Закономерности динамики продуктивности агроландшафтов составляют информационную основу прогнозирования урожаев, оценки рисков их потерь, связанных с неблагоприятными погодными условиями [1]. Основным источником сведений о продуктивности агроландшафтов являются материалы дистанционного зондирования, содержащие данные о распределении вегетационных индексов. Вегетационные индексы – семейство показателей, выражающих соотношение коэффициентов спектральной яркости в ближней инфракрасной и красной зоне спектра. Наиболее распространённый вариант показателя NDVI (normalized difference vegetation index) рассчитывается как

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED},$$

где NIR – спектральная яркость поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне спектра; RED – в красном диапазоне. Общие закономерности сезонной и многолетней динамики NDVI на уровне элементов морфологической структуры проявляются на снимках среднего разрешения. Длительный интервал наблюдений определяет преимущества как источника информации базы данных спутниковых снимков, полученные спектрорадиометром MODIS [2].

Влияние погодных условий на пространственное распределение значений NDVI рассматривается на уровне типов ландшафтов, в ареале которых расположены пахотные угодья. Устойчивые связи особенностей динамики NDVI с определённым ландшафтом характеризуют преимущественное влияние природных факторов, слабые связи – влияние хозяйственной деятельности. На уровне типов ландшафтов влияние погодных условий на распределение NDVI проявляется неоднозначно (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые особенности сезонной динамики NDVI в разных типах ландшафтов

Тип ландшафта	2010		2011		2012		2013	
	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май
Моренные	0	0	0	Н	Н	0	Н	Н
Ополья	Н	Н	Н	Н	Н	0	Н	Н
Полесья	В	В	0	В	В	0	0	В
Предополья	Н	В	Н	0	0	В	Н	0
Предполесья	0	В	В	В	В	0	В	0
Эрозионно-денудационные	0	0	В	В	В	Н	0	В
0 – значения NDVI в ландшафтах распределены равномерно относительно среднего значения; Н – значения NDVI преимущественно ниже среднего; В – преимущественно выше среднего								

Распределение показателей представлено для апреля и мая 2010–2013 гг. В этих интервалах времени сводится к минимуму влияние различий в агроценозах – видовом составе биологической продуктивности сортов. Наиболее устойчивые связи динамики NDVI и типом ландшафтов проявляются для ополий, полесий и предполесий. В пахотных угодьях опольских ландшафтов значения NDVI ниже средних. Угодья расположены на высоких, хорошо дренированных равнинах, почвообразующие породы представлены лессовидным или покровным суглинком. Относительно невысокие значения NDVI обусловлены более светлой окраской поверхности почв и большей долей отражённого от неё излучения, в том числе красной зоне спектра. Влажность пахотных почв ополий, от которой зависит окраска и отражательная способность поверхности после снеготаяния, снижается быстрее, чем в полесьях и предполесьях, что отражается в меньших значениях NDVI. Иные типы ландшафтов отличаются более сложной морфологической структурой, в них разница сочетаний факторов определяет сравнительно равномерное распределение NDVI.

Различия погодных условий апреля и мая проявляются в соотношении выделов пахотных угодий с высокими и низкими значениями индекса относительно среднемесячной величины (табл. 2). Количество выделов представляет соотношение площади пахотных угодий, расположенных в разных типах ландшафтов. Апрель 2010 г. относительно погоды в интервале наблюдений (2010–2013 гг.) был тёплым и сухим, май – прохладным и сухим. Весенние месяцы 2011 г. отличаются холодной погодой – апрель холодный и сухой, май – холодный и влажный. В 2012 г. погодные условия наиболее комфортны – и апрель и май были тёплыми и влажными; в 2013 г. апрель относительно холодный и влажный, май тёплый и влажный.

Соотношение участков с высокими и низкими значениями индекса изменяется от года к году, что подтверждает зависимость от погодных условий, но неоднозначную для всей выборки. Соотношение выделов с разным NDVI для каждого типа ландшафтов объясняется сочетанием фенологической фазы, природных особенностей территории, погодой весенних месяцев и характером предшествующей зимы. В апреле различия NDVI определяются преимущественно свойствами почв, которая в это время свободна от снега, а проективное покрытие не превышает первых процентов; в мае (начало вегетации) – физиологическим состоянием агроценозов.

Таблица 2

Соотношение выделов с высокими и низкими значениями NDVI в разных типах ландшафтов

Тип ландшафта	Количество выделов с высокими (числитель) и низкими (знаменатель) значениями NDVI							
	2010		2011		2012		2013	
	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май
Моренные	3	7	9	3	9	6	7	4
	9	5	3	9	3	6	5	8
Ополья	7	19	12	22	22	22	12	16
	36	24	31	21	21	21	31	27
Полесья	8	7	6	9	7	6	5	8
	2	3	4	1	3	4	5	2
Предополья	22	34	23	28	28	32	21	28
	32	20	31	26	26	22	33	26
Предполесья	45	62	68	56	56	50	58	50
	51	34	28	40	40	46	38	46
Эрозионно-денудационные	6	5	9	8	9	3	6	8
	5	6	2	3	2	8	5	3

Сравнительно низкие показатели NDVI пахотных угодий моренных ландшафтов в апреле (2010) при раннем снеготаянии связаны с механическим составом почвообразующих пород. Почвы, подстилаемые моренными суглинками, отличаются низкой водопроницаемостью и медленно прогреваются. При позднем снеготаянии относительно высокие значения NDVI обусловлены невысоким содержанием гумуса и светлым тоном поверхности почв. В опольских ландшафтах соотношение участков с высоким и низким значением NDVI становится почти равным в месяцы с тёплой и влажной погодой. В полесских ландшафтах характер распределения NDVI обусловлен тёмным тоном поверхности почв, обусловленных дерновым процессом, низкой отражательной способностью и соответственно высокими значениями индекса. Распределение NDVI в пахотных угодьях предополий и предполесий в основных чертах следует закономерностям, установленным для ополий и полесий, но отличается меньшими контрастами распределения по месяцам и годам. Сглаживание различий связано с морфологической структурой ландшафтов – чередованием участков с особенностями, свойственными опольям и полесьям. Для эрозионно-денудационных ландшафтов – возвышенных равнин на лёссовидных суглинках динамика показателей во многом аналогична моренным ландшафтам с учётом различий в сроках наступления фенологических сезонов – почти на 2 недели. Моренные ландшафты распространены в северо-западной части области с более прохладными и влажными мезоклиматическими условиями, эрозионно-денудационные – в юго-восточной, относительно тёплой и сухой лесостепной части.

Описанные закономерности для большей части пахотных выделов сглаживаются влиянием антропогенных факторов. Интервалы значений NDVI разных типов ландшафтов перекрываются, так что произвольно выбранная величина индекса имеет низкую вероятность принадлежности почвенного выдела к ареалу определённого типа ландшафтов (табл. 3).

Поиск и апробация практически ценных закономерностей – зависимостей продуктивности ландшафтов от погодных условий, рисков потери урожая в перспективе должны опираться на сведения о распределении значений NDVI по морфологическим элементам антропогенных ландшафтов – аналогам местностей и урочищ.

Таблица 3

Интервалы значений NDVI в разных типах ландшафтов

Тип ландшафта	Интервалы значений NDVI в разных типах ландшафтов (в числителе максимальное значение, в знаменателе – минимальное)							
	2010		2011		2012		2013	
	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май	Апрель	Май
Моренные	0,3055	0,6025	0,6381	0,7751	0,3897	0,8170	0,5390	0,7451
	0,3515	0,7333	0,2269	0,4430	0,2759	0,5500	0,0731	0,5641
Ополья	0,3674	0,7611	0,5578	0,8052	0,5134	0,8880	0,4686	0,4977
	0,2969	0,3967	0,0419	0,4567	0,2858	0,4929	0,0086	0,3341
Полесья	0,3231	0,7566	0,6321	0,8413	0,5178	0,7645	0,4781	0,8273
	0,4824	0,3506	0,0327	0,4791	0,3371	0,4233	0,0529	0,5058
Предополья	0,4192	0,7055	0,7080	0,8026	0,4274	0,8708	0,6263	0,8374
	0,2661	0,4016	0,0445	0,3922	0,2471	0,5298	0,0086	0,4438
Предполесья	0,2788	0,7710	0,6992	0,7636	0,4497	0,8308	0,6634	0,8609
	0,3988	0,3124	0,0684	0,4148	0,2471	0,4882	-0,0096	0,4476
Эрозионно-денудационные	0,3129	0,7052	0,4916	0,8045	0,3005	0,7845	0,2068	0,7944
	0,3710	0,3634	0,2661	0,5482	0,4035	0,5245	0,3967	0,5875

Границы морфологических элементов соответствуют фрагментам спутниковых снимков с одинаковой текстурой. Площадь элементов изменяется от нескольких десятков до первых сотен квадратных километров, их количество для территории Брянской области с площадью пахотных земель около 1718 тыс. га ориентировочно оценивается в несколько сотен. Распределение NDVI в перспективе образует основу планирования мелиоративных мероприятий, прогнозирования урожая и рисков, связанных с неблагоприятными погодными условиями.

Список литературы

1. Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный федеральный округ. Брянская область / Администрация Брянской обл.; под ред. Н.Г. Рыбальского, Е.Д. Самотесова, А.Г. Митюкова. М.: НИИ-Природа, 2007.

2. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility. Version 1.3 http://modis-sr.ltdri.org

УДК 528.8.04, 528.88

ВОДНЫЙ БАЛАНС БАССЕЙНА р. ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ GRACE

С. Т. Им, Е. В. Федотова, В. И. Харук
ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН»,
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

WATER BALANCE WITHIN THE PODKAMENNAYA TUNGUSKA RIVER'S WATERSHED BASED ON GRACE REMOTE SENSING DATA

S. T. Im, E. V. Fedotova, V. I. Kharuk
V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS,
Siberian Federal University
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

В работе рассмотрены возможности анализа водного баланса на основе гравиметрической съемки из космоса GRACE на примере бассейна реки Подкаменная Тунгуска. Помимо гравиметрических данных использованы материалы о количестве осадков, потенциальной эвапотранспирации и стоке рек. Проведенный анализ позволил оценить сезонную динамику массы подземных вод в пределах анализируемого бассейна реки.

Ключевые слова: гравиметрическая съемка GRACE, водный баланс, Подкаменная Тунгуска.

Введение

Зона многолетнемерзлых грунтов, в которой расположено более 60 % территории России, особенно чувствительна к изменениям температуры [Callaghan and Jonasson, 1995]. Прогнозируемый к концу XXI столетия рост температуры воздуха в Арктике на +7…+11°С приведет к возрастанию глубины сезонного оттаивания и деятельного слоя, изменениям водного баланса и уменьшению площади криолитозоны [IPCC, 2013; Sillmann et al., 2013].

С появлением на орбите в 2002 г. спутниковой системы GRACE появилась новые возможности оценки динамики водной массы на суше. Измерения GRACE позволили выявить значительное сокращение ледников в арктической и антарктической зонах [Chen et al., 2006; Gardner et al., 2011; Barletta et al., 2013]. По данным GRACE в криолитозоне Сибири выявлены зоны с положительными трендами водной массы в начале XXI века [Steffen et al., 2012]. Установлено нарастание массы подземных вод в бассейне р. Лена [Velicogna et al., 2012] и на арктическом побережье Аляски, в то время как в бассейне р. Юкон (Аляска) отмечено сокращение водной массы [Muskett and Romanovskii, 2011b]. Таким образом, оценка водного баланса с применением спутниковой гравиметрии является актуальной задачей.

Материалы и методы

Водный баланс оценивался для бассейна реки Подкаменная Тунгуска, впадающей в реку Енисей и расположенной в криолитозоне Центральной Сибири. Общая площадь бассейна составляет 232,3 тыс. км^2. Участок расположен в пределах 91°–106° в. д., 57,6°–63° с. ш. Годовое количество осадков 473 мм. Средний годовой сток 54,7 км3 (225 мм). На территории доминирует лиственница (*Larix sibirica*, *L. dahurica*). Перепад высот составляет …51–1029 м над у. м. (средняя высота 411 м).

Для анализа водного баланса использованы материалы РосГидроМета о стоке реки с гидропоста п. Кузьмовка за период 2002–2012 гг. Данные представляют собой помесячный сток реки (*RUNOFF*) в $м^3$/сек. Для сопоставления с остальными данными значения стока реки переведены в мм в месяц.

В работе использованы климатические данные CRU TS 3.22 [Harris et al., 2013], представляющие собой гриды с размером ячейки 0,5×0,5 градуса. Данные получены с сайта http://badc.nerc.ac.uk. Суммарное количество осадков (*PRE*) представлено в мм в месяц; потенциальная эвапотранспирация (*PET*) – в мм в день. Последние переведены в мм в месяц.

Гравиметрические данные со спутников GRACE позволяют оценить аномалии водной массы, сосредоточенной в пределах бассейна реки за период с 2002 по 2014 гг., с пространственным разрешением один градус (~113×53 $км^2$ на широте 61°). Данные получены с сайта http://grace.jpl.nasa.gov. Материалы съемки представляют собой месячные аномалии водного эквивалента массы (АВЭМ) относительно базового периода с января 2004 по декабрь 2009 гг.; единицы измерения – сантиметры, далее переведены в мм. Использованы коэффициенты масштабирования для восстановления сигнала, ослабленного в результате фильтрации [Landerer and Swenson, 2012].

Обработка климатических данных и материалов GRACE велась в программных пакетах Erdas Imagine (http://geospatial.intergraph.com) и ESRI ArcGIS (http://www.esri.com). Графический и статистический анализ проводился в программе Microsoft Excel.

В совокупности, указанные данные применены для оценки водного баланса, который выражался формулой:

$$W = PRE - k * PET - RUNOFF + GW + E \ , \qquad (1)$$

где W – оставшаяся водная масса, равная показаниям АВЭМ текущего месяца минус АВЭМ предыдущего месяца; *PRE* – количество суммарных осадков; *PET* – потенциальная эвапотранспирация; k – коэффициент для пересчета из *PET* в реальную эвапотранспирацию, $0 < k < 1$; *RUNOFF* – сток реки; *GW* – масса подземных вод; E – смещение и ошибки, связанные с неучтенными факторами. Указанные величины представлялись в мм в месяц.

Результаты и обсуждение

Из анализа сезонной динамики АВЭМ и стока реки за май и июнь следует, что данные о стоке реки опережают на один месяц (рис.). Это объясняется большим размером бассейна реки, т. е. сток в мае увеличился, однако масса воды в целом по бассейну еще незначительно изменилась (рис.). Поэтому для учета этой задержки в расчетах водного баланса для текущего месяца применялись данные о стоке за предыдущий месяц. Также, k принимался постоянным и равным 0,5. Ошибка смещения E предполагалась равной 0. Таким образом, из выражения (1) можно оценить динамику подземных водных масс *GW* (рисунок).

Динамика АВЭМ хорошо показывает периоды снегонакопления (апрель-май), интенсивного (май–июль) и минимум водных масс (август–сентябрь) (рис.). Максимальное количество осадков приходится на июль–август, однако в этот же период наблюдаются высокие уровни испаряемости, стока подземных и наземных водных масс, что в общем приводит к низким значения АЭВЭМ. Похожая динамика наблюдается в соседних регионах [Им и Харук, 2015].

Масса подземных вод уменьшается в летне-осенний период (до –21 мм), что связанно со стоком реки, который происходит с мая по октябрь и далее замедляется. Отмечается аномальное количество подземных вод в январе (–28 мм), что, вероятно, связано с ошибками измерения осадков, так как вклад остальных переменных в этот

месяц незначителен (рисунок). В основном накопление подземных вод отмечается в холодные месяцы и доходит до +20 мм. Годовая суммарная масса подземных вод равна –40 мм, что, в общем, указывает на тенденцию сокращения подземных вод на исследуемой территории за период 2002–2014 гг. Это связано с таянием вечной мерзлоты и стоком стаявшей водной массы. Однако юго-восточнее от исследуемой территории, в бассейне реки Лена наблюдается нарастание массы подземных вод [Velicogna et a., 2012].

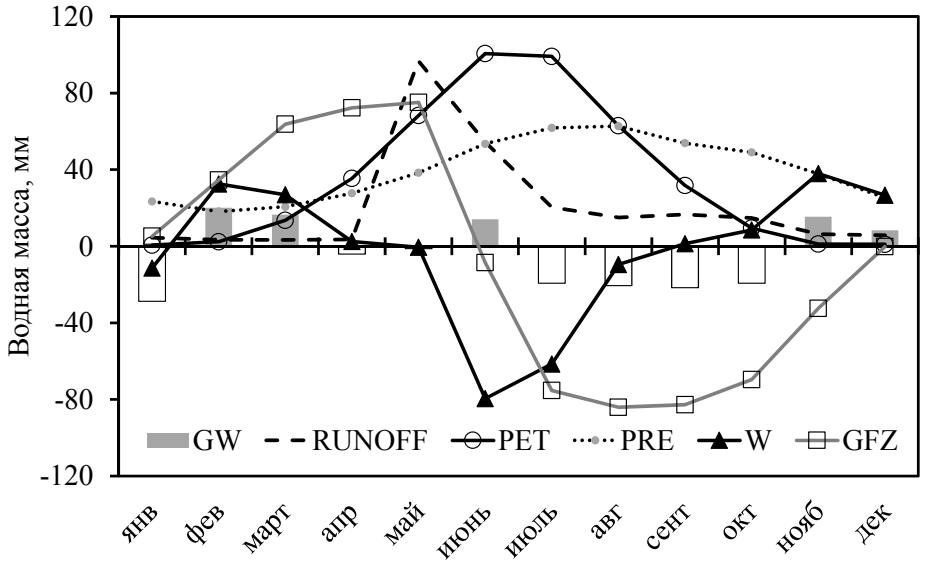


Рис. Сезонная динамика водной массы в пределах бассейна реки Подкаменная Тунгуска. W – оставшаяся водная масса, равная показаниям АВЭМ текущего месяца минус АВЭМ предыдущего месяца; PRE – количество суммарных осадков; PET – потенциальная эвапотранспирация; RUNOFF – сток реки; GW – масса подземных вод; GFZ – АВЭМ текущего месяца

Минимум остаточной водной массы *W* приходится на июнь-июльский период, что соответствует периоду интенсивного стока реки с задержкой на месяц. Годовая сумма остаточной массы воды равна –26 мм, что указывает на общее сокращение водных масс в бассейне реки Подкаменная Тунгуска. Это является подтверждающим косвенным признаком таяния вечной мерзлоты в данном регионе.

Заключение

По данным гравиметрии со спутников GRACE, климатическим материалам и данным о стоке рек сделана оценка сезонного водного баланса бассейна реки Подкаменная Тунгуска. Оценена сезонная динамика подземных вод, которые в течение года варьируются от –28 до +20 мм/месяц. В дальнейшем представленная формула расчета массы подземных вод будет использована для анализа динамики водного баланса за период наблюдений.

Годовая суммарная масса подземных вод равна минус 40 мм, и годовая сумма остаточной массы воды составила минус 26 мм, что указывает на тенденцию сокращения подземных вод в бассейне реки Подкаменная Тунгуска за период 2002–2014 гг., что связано с таянием вечной мерзлоты и стоком оттаявшей водной массы.

Работа поддержана грантом Правительства РФ №14.B.25.31.0031.

Список литературы

1. Callaghan T.V., Jonasson S. Arctic ecosystems and environmental change // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1995. V. 352. P. 259–276.

2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. USA, Cambridge, United Kingdom and New York. NY: Cambridge University Press. 1535 p.

3. Sillmann J., Kharin V.V., Zwiers F.W., Zhang X., Bronaugh D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118(6). P. 2473–2493. doi: 10.1002/jgrd.50188.

4. Chen J.L., Wilson C.R., Tapley B.D. Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet // Science. 2006. V. 313(5795). P. 1958–1960. doi: 10.1126/science.1129007.

5. Gardner A.S., Moholdt G., Wouters B., Wolken G.J., Burgess D.O., Sharp M.J., Cogley J.G., Braun C., Labine C. Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago // Nature. 2011. V. 473. P. 357–360. doi: 10.1038/nature10089.

6. Barletta V.R., Sørensen L.S., Forsberg R. Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica // The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 1411–1432.

7. Steffen H., Muller J., Peterseim N. Mass Variations in the Siberian Permafrost Region from GRACE // Geodesy for Planet Earth, International Association of Geodesy Symposia. 2012. V. 136. P. 597–603.

8. Velicogna I., Tong J., Zhang T., Kimball J.S. Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39(9), L09403. doi: 10.1029/2012GL051623.

9. Muskett R.R., Romanovsky V.E. Alaskan permafrost groundwater storage changes derived from GRACE and ground measurements // Remote Sens. 2011b. V. 3(2). P. 378–397. doi: 10.3390/rs3020378.

10.Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatol. 2013. V. 34(3). P. 623–642. doi: 10.1002/joc.3711.

11.Landerer F.W., Swenson S.C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. V. 48(4). doi: 10.1029/2011WR011453.

12.Им С.Т., Харук В.И. Динамика водной массы мерзлотной зоны Средней Сибири по данным гравиметрической съемки спутниками GRACE // Геофизические процессы и биосфера. [Б. г.]. Т. 15, № 1. С. 53–69.

УДК 528.8.04, 528.88, 551.46

ГРАДИЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

А. В. Картушинский
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
Институт биофизики СО РАН
e-mail: kartushka@mail.ru

GRADIENT INDICATORS OF EARTH SURFACE TO SATELLITE MONITORING OF ENVIRONMENTAL

A. V. Kartushinsky
Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies
Institute of Biophysics SB RAS
e-mail: kartalvas@rambler.ru

Рассматривается градиентный метод обработки спутниковых данных для интерпретации космических изображений с целью определения закономерностей формирования горизонтальных неоднородностей физических и биологических компонент природной среды. Реализуется методология изучения изменчивости поверхностных градиентных полей водных систем как динамических объектов и рельефа земной поверхности как статического объекта на основе расчета пространственных градиентов.

Ключевые слова: спутниковые данные, градиентные характеристики, поверхностные неоднородности, пространственно-временная изменчивость.

Спутниковый мониторинг является эффективным методом выявления, оценки и прогноза развития природных процессов и явлений различных пространственных масштабов. Оценка и прогнозирование скорости изменения характеристик природных систем является важной научной задачей в фундаментальном и прикладном значении.

Интенсивное развитие дистанционных методов зондирования Земли из космоса в совокупности с применением 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.

При оценке состояния природных объектов важной задачей является получение качественных данных для изучения динамики процессов физической и биологической природы экосистем. В особенности это касается динамики водных экосистем и изменчивости процессов в поверхностном слое, где взаимосвязь биологических и физических компонент достаточно высока [1]. В экосистемах суши процессы менее динамичны, что приводит к необходимости получения более длительных временных рядов наблюдений. Однако и для водных систем, и для экосистем суши общим является ориентировка на конкретные измеряемые параметры, тогда как градиентные значения характеристик могут создавать несколько другую картину пространственно-временной изменчивости процессов в экосистемах.

Градиентные показатели и характеристики объектов в алгоритмах обработки изображений используются в основном для выделения контуров элементов и зависят от качества исходных изображений [2]. Градиентные характеристики, которые представляют собой дифференцированные показатели скорости изменения параметров исследуемого объекта (поля), применяются зачастую не в полной мере, особенно для

квазистатичных объектов. При этом расчеты динамики исследуемых полей основываются на совмещении или композиции исходных изображений (снимков), сравниваемых в абсолютных количественных показателях и усредненных, и интерполированных значениях [3; 4].

Пространственно-временные градиенты параметров состояния поверхности Земли могут показать несколько другую картину динамического проявления процессов как в водных системах, так и на твердой земной поверхности. Таким образом, основной целью данной работы является реализация метода расчета градиентных характеристик земной поверхности по спутниковым данным с использованием разработанных информационно-программных средств и соответствующего программного обеспечения.

Материалы и метод расчета градиентных показателей по спутниковым данным

Расчеты градиентных характеристик природных объектов необходимы для выявления зон с различной динамической активностью. Спутниковые измерения в видимом и инфракрасном диапазонах представляют собой изображения с пространственными полями различных характеристик природных объектов поверхности Земли. Основными характеристиками в нашем случае являются отражательная способность поверхности и температура поверхности. Методологическая концепция, которая определена необходимостью расчета пространственных градиентов измеренных характеристик поверхности Земли, обоснована возможностью выявления зон с различной динамической активностью физических и биологических полей, а также геологических показателей, таких как рельеф или почвенный покров. В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные аппаратными средствами с высоким и низким разрешением AVHRR MCSST, CZCS, SeaWIFS, MIRAS AQUARIUS, MODIS, MSS за различные периоды времени со спутников NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT.

Для расчетов градиентных показателей по спутниковым данным водных систем и проведения статистического анализа используются разработанные программные средства. В качестве исходных данных применяются спутниковые данные по температуре поверхности и концентрации хлорофилла, которые сформированы в соответствующую базу данных. Для исследования изменчивости градиентного поля солености океана использовались данные климатического спутника Aquarius/SAC-D.

Для обработки спутниковых данных по территории суши и получения значений градиентных характеристик по данным дистанционного зондирования использовался прикладной пакет ENVI 4.7 с разработанными макросами в среде IDL. В качестве опорной исходной информации в работе использована карта высотной зональности.

Разработанные информационно-программные средства, предназначенные для обработки спутниковых данных по поверхности океана, применяются с целью выявления зон с высокими значениями пространственных и временных градиентов в горизонтальной плоскости, а также для оценки статистической связи между ними.

Под градиентом понимается характеристика, показывающая направление наискорейшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой. Для случая двумерного пространства под градиентом понимается векторная функция с компонентами $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$, $\frac{\partial \varphi}{\partial y}$, где φ – некоторая скалярная функция соответствующих координат x и y. Исходная расчетная область $F(i = 1, \ldots, N; j = 1, \ldots, M)$ для вычисления градиента H параметра T соответствующим образом масштабируется в соответствии с пространственным пиксельным разрешением

спутникового снимка (исходных данных) и формируется в виде сетки с равными по величине пространственными шагами Δx и Δy (рисунок).

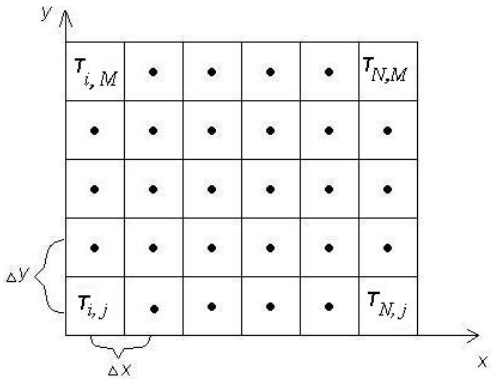


Рис. Расчетная сеточная область *F*

В программном обеспечении реализованы алгоритмы вычисления градиентов выбранного параметра T с аппроксимацией первой производной разностью вперед первого порядка для расчета градиентов по широте – уравнение 1, по меридиану – уравнение 2 и градиента по модулю – уравнение 3:

$$gradH_n = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta x}, \quad (1)$$

$$gradH_m = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{\Delta y}, \quad (2)$$

$$\nabla H_a = \sqrt{gradH_n^2 + gradH_m^2}. \quad (3)$$

Для определения изменчивости поверхностных градиентных полей водной поверхности осуществляется усреднение по времени и пространству. Усредняя пиксельные значения градиентов по времени, мы получаем среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые значения градиентов:

$$\nabla \overline{H} = \frac{1}{K} \sum_{n,m=1}^{K} \nabla \overline{H}_{n,m}, \quad (4)$$

где K – количество элементов выборки (космических снимков).

Усреднение по пространству дает возможность рассчитывать средние градиенты по площади. В этом случае изменяется масштаб расчетной сетки с соответствующим пиксельным увеличением (8, 16, 32, 64, 128), что позволяет оценивать как региональные особенности структуры градиентных полей, так и крупномасштабные и долговременные динамические процессы.

Обсуждение и выводы

Динамическое состояние водной среды оказывает значительное влияние на биологические процессы. Увеличение или уменьшение жизненной активности в водных экосистемах нередко связано с различными гидрофизическими явлениями, происходящими на поверхности и в толще вод. Изучение зависимости между гидрофизическими и биологическими процессами позволяет раскрывать важные закономерности в распределении, поведении и воспроизводстве живых организмов.

Формирующиеся на поверхности температурные поля и поля концентрации хлорофилла являются показателями поверхностной структуры водных систем. Для

определения изменчивости структурной организации поверхностного слоя океана необходима количественная оценка изменений параметров в пространстве. В качестве объекта для таких оценок можно использовать фронтальные зоны, то есть зоны, в которых градиенты основных гидрофизических полей значительно отличаются от средних значений градиентов вне пределов данной зоны.

В настоящее время накоплен достаточно большой объем изображений земной поверхности, полученных методами дистанционного зондирования Земли, что позволяет решать задачи по анализу изменения пространственно-временных характеристик земных объектов при помощи градиентного метода. В отличие от поверхности водных систем, которые имеют значительную пространственно-временную изменчивость, поверхность земли и системы суши характеризуются определенной статичностью и имеют низкую динамическую активность границ между экосистемами.

При расчетах градиентных показателей поверхности суши определяются склоновые зоны, где наблюдаются места наибольших перепадов высот рельефа земной поверхности. Местоположение и величину перепадов высот по спутниковым изображениям визуально определить затруднительно, однако градиентный расчет позволяет выявлять такие районы местности. Зоны со значительными градиентами высоты поверхности могут быть использованы для оценки накопления снегового покрова (на склонах горных хребтов), интенсивности эрозии почвы (ветровой или антропогенной), а также для анализа типов растительностей, почвы и других параметров с различной степенью изменчивости земной поверхности.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– градиентный метод обработки спутниковых данных может применяться как интегральный подход для оценки пространственно-временной изменчивости процессов в экосистемах;

– горизонтальные градиенты пространственного распределения данных дают широтную и меридиональную составляющие с возможностью получения вектора развития (затухания) процесса;

– градиентный метод обработки спутниковых данных или непосредственное измерение градиентных показателей из космоса может показывать скрытое информационное содержание спутниковых изображений поверхности Земли, которое может трактоваться по-новому и использоваться для решения исследовательских задач.

В перспективе, возможно, необходима разработка спутниковой аппаратуры для регистрации градиентов спектральных характеристик на соответствующих каналах измерения.

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. Стругайло В.В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений // Наука и образование. 2012. № 5. [Электронный ресурс]. – URL: http://technomag.edu.ru/doc/411847.html (дата обращения: 15.04.2015).

3. 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.

4. PlanetaMonitoring Программный комплекс обработки спутниковых данных / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.А. Кровотынцев и др. // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ КАЗАХСТАНСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАСУХ

А. М. Кауазов, М. Ж. Батырбаева, И. С. Витковская, Н. Р. Муратова, Л. Ф. Спивак
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,
Национальное космическое агентство Республики Казахстан (Алматы, Казахстан)
e-mail: a_kauazov@mail.ru

Известно, что данные ДЗЗ востребованы сегодня в самых разнообразных сферах и способствуют решению серьезных задач в области геологии, сельского хозяйства, охраны окружающей среды, обороны и безопасности. Территория Казахстана огромна – 2,7 млн. км^2 – 9 место в мире и сопоставима с территорией Западной Европы. При этом население Казахстана относительно не велико – 17 млн. человек. Огромная территория, низкая плотность населения, богатые природные ресурсы, большое количество труднодоступных мест не оставляют Казахстану альтернативы кроме развития космических технологий, так как обеспечить потребность в таком объеме информации только наземными данными практически невозможно.

Исторически так сложилось, что Казахстан, обладая крупнейшим в мире космодромом, не обладает научно-технической базой для создания ракетно-космической техники и не имеет развитого космического сегмента. Между тем. Глава государства Нурсултан Абишевич Назарбаев всегда уделял большое внимание развитию инновационных технологий. Поэтому была избрана линия развития космической отрасли в Казахстане совместно с ведущими космическими державами. Фактически была поставлена задача наладить международные контакты в космической сфере, создать ракету-носитель, запустить собственные спутники, построить наземную инфраструктуру и подготовить собственные кадры.

Деятельность в области ДЗЗ берет начало с истоков независимости Казахстана с 1991 г. До 2004 г. проводились лишь научные работы по исследованию космического пространства в области астрофизики, ионосферы Земли, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках программ фундаментальных научных исследований.

В 2005 г. была принята и осуществлялась первая государственная программа «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005–2007 гг.». Указом Президента Республики Казахстан от 27 марта 2007 г. образовано Национальное космическое агентство – Казкосмос – как самостоятельный государственный орган управления в области космической деятельности и началось интенсивное развитие космической отрасли.

Национальным космическим агенством РК организована космическая инфраструктура, созданы предприятия по всем стратегическим направлениям космической деятельности, разработана стратегия развития космической деятельности в Республике Казахстан, сформировано высококвалифицированное кадровое ядро научного и инженерного состава, подготовлены специалисты по космической технике в вузах ближнего и дальнего зарубежья, в ведущих вузах Казахстана организована подготовка специалистов по космической технике и технологиям.

В 2011 г. успешно запущен и введен в эксплуатацию спутник связи «Казсат-2», в 2014 г. запущен спутник связи «Казсат-3». В 2004 г. организован и успешно функционирует Национальный центр космических исследований и технологий (НЦКИТ), объединяющий четыре научных института, в которых работают известные в мире ученые, профессора, академики. Наряду с дальнейшим развитием традиционных направлений научных исследований в области астрофизики, ионосферы Земли, ДЗЗ

институты ведут успешные прикладные научные исследования по новым направлениям – создание национальной системы космического мониторинга и системы космического геодинамического мониторинга, разработка отечественных образцов космической техники и технологий. В г. Акколь построен и функционирует центр управления полетами. В 2012 г. принят Закон Республики Казахстан «О космической деятельности».

Кульминацией стало создание собственной системы дистанционного зондирования Земли. Космическая система дистанционного зондирования Земли Республики Казахстан (КС ДЗЗ РК) состоит из космической и наземной части. Космическая часть системы состоит из двух космических аппаратов, относящихся по высоте рабочей орбиты к низкоорбитальным космическим аппаратам.

КС ДЗЗ включает в себя два оптико-электронных космических аппарата, один – высокого пространственного разрешения (1 м) «KazEOSat-1» и другой – среднего пространственного разрешения (6,5 м) «KazEOSat-2». Наземный сегмент представлен наземным комплексом управления спутниками и наземным целевой комплексом для приема и обработки данных.

Целевые группы потребителей данных дистанционного зондирования Земли – это прежде всего государственные структуры, научные учреждения и коммерческие организации.

KazEOSat 1 был запущен 30 апреля 2014 г. с космодрома «Куру» во французской Гвиане. Первый казахстанский спутник ДЗЗ KazEOSat 1 (Kazakhstan Earth Observation Satellite – казахстанский спутник наблюдения Земли) создавался по заказу по заказу подведомственной Национальному космическому агентству Республики Казахстан АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары» французской компанией Airbus Defense and Space (бывшая EADS Astrium) в течение четырех лет. Космический аппарат KazEOSat-1 имеет высокое пространственное разрешение в 1 метр, полоса захвата – 20 км, производительность спутника ДЗЗ – 220 тыс. квадратных километров в течение суток. Масса казахстанского КА ДЗЗ составляет около 900 кг, срок службы на орбите – более 7 лет – рис. 1.

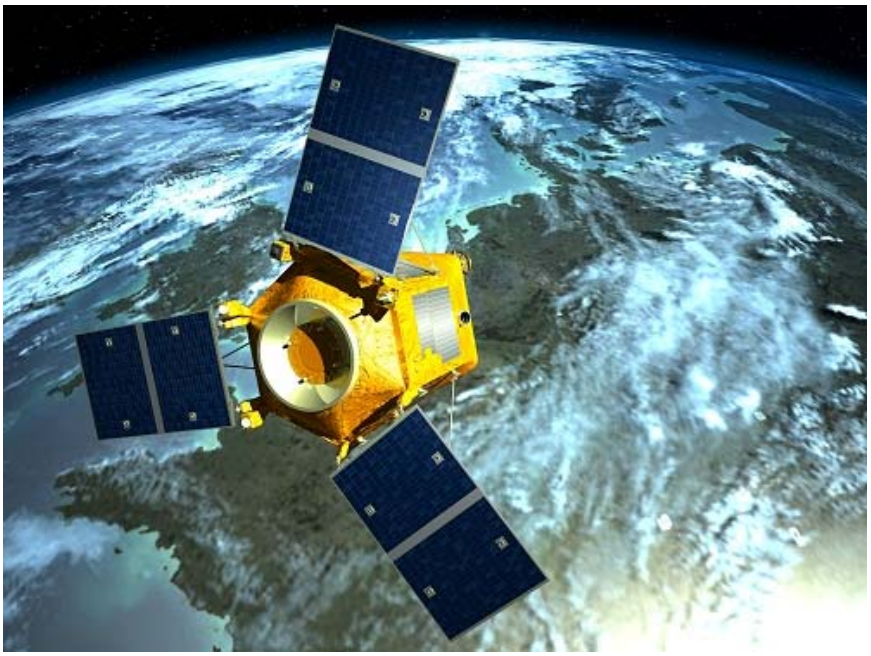


Рис. 1. Внешний вид KazEOSat-1 (пространственное разрешение 1 м)

KazEOSat-1 предназначен для предоставления полного спектра услуг ДЗЗ, получения снимков территории Республики Казахстан, а также других участков Земли в целях мониторинга, предотвращения стихийных бедствий, проведения земельного кадастра, картографирования для обеспечения обороны и безопасности страны.

20 июня 2014 г. со стартовой площадки Ясный под Оренбургом /Россия/ ракетой-носителем «Днепр» на солнечно-синхронную орбиту высотой 630 км выведен второй казахстанский спутник дистанционного зондирования Земли KazEOSat-2 – рис. 2.

KazEOSat-2 (Kazakhstan Earth Observation Satellite) – второй казахстанский спутник дистанционного зондирования Земли, создан на базе спутниковой платформы «SSTL-150+» британской компанией «SSTL». «SSTL» является дочерним предприятием «Airbus Defence and Space» (ранее EADS Astrium). По своей архитектуре космический аппарат «KazEOSat-2» (DZZ-MRES) похож на спутник ДЗЗ «RapidEye». Различие между ними состоит в том, что в казахстанском спутнике используются более современные технологии, которые придают большую маневренность сканирующей аппаратуре и разрешают делать стереосъемку.

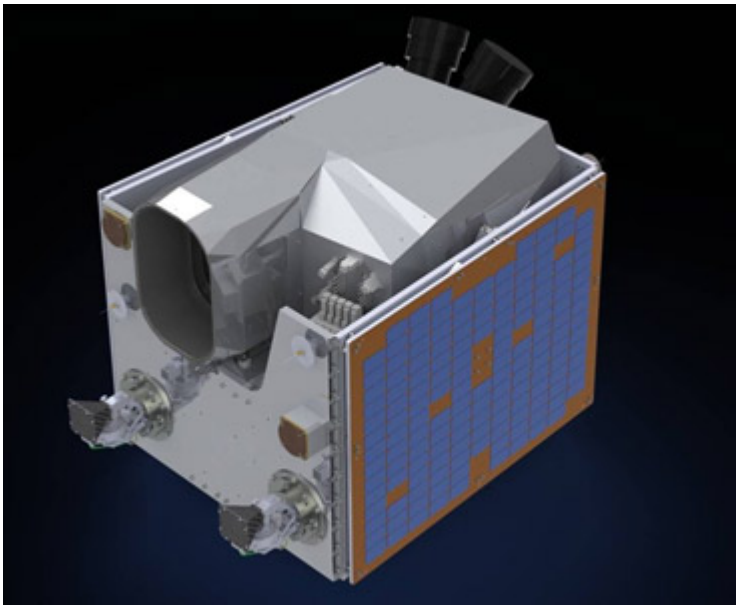


Рис. 2. Внешний вид «KazEOSat-2» (пространственное разрешение 6,5 м)

На борту спутника «KazEOSat-2» (DZZ-MRES) в качестве полезной нагрузки установлено сканирующее устройство KEIS (Kazakh Earth Imaging System), которое также известно как «JSS-56» (Jena-Optronik Spaceborne Scanner-56) или «MSI» (Multispectral Imager). За сутки космический аппарат «KazEOSat-2» (DZZ-MRES) способен отснять около 1000 000 кв. км. Характеристики «KazEOSat-2» приведены в табл.

«KazEOSat-2» (DZZ-MRES) позволяет выполнять следующие режимы съемки:

- полосный режим (Image strip) – создается изображение шириной 77 км и максимальной длиной до 4000 км. Режим действует в пределах отклонение сканера +/- 35 градусов от надира;
- режим стерео (Stereo mode) – за один проход выполняет сьемка одной и той же области дважды. Сьемка выполняется с шагом 30 градусов;
- режим мозаики (Mosaic mode) – выполняется съемка территории в ширину. Изображение состоит с двух смежных сцен. Работает очень похожим образом до режима стерео. Разница лишь в том, что сцены не полностью перекрываются.

Таблица

Характеристики «KazEOSat-2» (DZZ-MRES)

Диаметр аппертуры	145 мм
Фокусное расстояние	633 мм
Спектральные каналы	Синий – 0,45–0,52 μm Зеленый – 0,53–060 μm Красный – 0,62–0,69 μm Крайний красный – 0,69–0,73 μm ИК – 0,76–0,89 μm
Пространственное разрешение	6,5 м (в надире) 5 м (при создании ортофото)
Радиометрическое разрешение	12 бит
Полоса захвата	77 км
Отклонение от надира	+/- 35 градусов
Масса инструмента	150 кг
Орбита	Солнечно-синхронная, H=630 км, склонение 98 градусов
Размеры	700 мм x 800 мм x 900 мм
Скорость передачи данных	160 Мбит/с в X-диапазоне
Масса	185 кг
Срок жизни	7 лет

В целом Казахстанская космическая система дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ РК) создавалась для обеспечения независимости Казахстана в получении оперативной спутниковой информации и данных для решения задач в различных отраслях экономики, в том числе для мониторинга сельского хозяйства, зерновых культур и засух в частности.

Производство пшеницы имеет важное значение для Казахстана, который по производству пшеницы занимает лидирующую позицию в мире, и роль Казахстана в производстве зерна в мире для обеспечения продовольственной безопасности довольно большая [1]. Казахстан является крупнейшим экспортером пшеницы в регионе Центральной Азии. Потенциал экспорта Казахстанского сектора производства пшеницы достигает около 6–7 миллионов тонн, а в некоторые годы до 10 миллионов тонн [2].

При этом территория Казахстана огромна (9 место в мире) и относится к зоне рискованного земледелия. Поэтому особые требования в аграрном секторе Казахстана предъявляются к получению оперативной информации о состоянии сельхозкультур, и особенно зерновых. Они занимают около 15 миллионов гектаров и данные наблюдений в период вегетации необходимы госорганам для оперативного реагирования, чтобы принимать наиболее оптимальные решения.

Учитывая тот факт, что сельскохозяйственные культуры хорошо проявляются на космических снимках, ничем не скрыты, одноярусны, хорошо дешифрируются как по текстуре, так и по спектральным характеристикам, применению данных ДЗЗ изначально уделялось большое снимание.

В Казахстане практическое использование спутниковых данных для определения размеров посевных площадей яровых зерновых культур было инициировано заказом Правительства РК в 1997 г. Первоначально использовалась спутниковая информация NOAA низкого пространственного разрешения (1 км). При выполнении заказа МСХ РК в 1998 г. к анализу привлекались многозональные снимки среднего разрешения (160 м) российского спутника РЕСУРС/МСУ-СК. Начиная с 2002 г. мониторинг землепользования основывается на данных TERRA/MODIS (250 м), IRS/LISS (23 м), IRS/Awifs (56 м) и RADARSAT-1 (100 м).

Следует отметить, что в большинстве случаев размер поля в Северном Казахстане достаточно большой 2*2 км, т. е. 400 га. Поля площадью менее 100 га встречаются достаточно редко. Поэтому для комплекса задач сельскохозяйственного мониторинга вполне подходят данные, полученные спектрорадиометром MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), который установлен на спутниках Terra и Aqua с пространственным разрешением 250, 500 м и 1 км. Период обращения спутников и ширина полосы съемки (до 2300 км) обеспечивают глобальное покрытие Земли данными наблюдений два раза в сутки. А 16 пикселей на поле предоставляют достаточно детализированную информацию. При этом территория мониторинга занимает около 15 млн га и простирается на 900 км с запада на восток и на 600 км с юга на север, охватывая три области Северного Казахстана – Акмолинскую, Северо-Казахстанскую и Костанайскую.

Фактически на территорию Северного Казахстана требуется покрытие снимками около 150 000 км^2 территории. При этом для полноценного мониторинга нужно, как минимум, трехкратное покрытие – в начале, в середине и в конце лета – практически необходимо покрытие 150 000 км^2 не в течение месяца, а за короткий период, для того чтобы данные были сопоставимы. Учитывая наличие облачности, не высокую частоту съемки, очевидно, что с помощью двух спутников КС ДЗЗ РК при полосе захвата 20 км и 77 км целиком решить задачу мониторинга посевов, раскинутых на сотни километров, невозможно – объективно это прерогатива снимков среднего разрешения с широкой полосой охвата. Однако говорить о полной непригодности снимков КС ДЗЗ РК не приходится. Высокое пространственное разрешение предоставляет прекрасную возможность для множества других задач. Например, уточнить границы полей, контроль состояния посевов, определение очагов и площадей распространения болезней и вредителей, контроль сроков и качества проведения основных агротехнических на отдельных полях. Единственным недостатком является отсутствие всеохватного мониторинга (всего в Северном Казахстане расположено около 100 000 полей под зерновые) и невысокая периодичность съемки.

Другой аспект возможного применения данных КС ДЗЗ РК – это такой аспект как «точное земледелие». Суть «точного земледелия» состоит в том, что для получения максимального урожая для всех растений этого сельхозугодья создаются одинаковые условия роста и развития на основе учета внутренней неоднородностей поля.

Первостепенное значение для «точного земледелия» имеет постоянный контроль за состоянием растительности. Важной составляющей технологии «точного земледелия» являются своевременное обнаружение и локализация участков угнетенного состояния растительности в пределах поля, что может быть вызвано разными факторами: поражением растений вредителями, засильем сорняков и т. д. Данные ДЗЗ для оперативного реагирования на ситуацию являются незаменимыми, но для этого они должны удовлетворять следующим условиям:

- возможности оперативного получения и обработки;
- высокому и сверхвысокому разрешению для повышения точности определения биофизических параметров растительного покрова;
- наличию мультиспектрального режима для использования при дешифрировании различий в спектральной яркости;
- достаточно частой периодичности получения.

Фактически точное земледелие основано на картах поля высокого разрешения. В этом отношении метровое разрешение КС ДЗЗ РК предоставляет хорошую основу. При этом следует учитывать, что аналогичные по разрешению снимки зарубежных спутников имеют достаточно высокую цену, что сильно влияет на экономическую обоснованность применения «точного земледелия».

Таким образом, казахстанские спутники ДЗЗ, хотя и не позволяют проводить полноценный мониторинг посевов и производить оценку засухи, тем не менее нашли свою нишу в области мониторинга зерновых культур в области растущего рынка высокого разрешения. Поэтому можно с уверенностью утверждать, что запуск двух казахстанских спутников ДЗЗ послужит хорошей основой для обеспечения мониторинга потенциально важной отрасли обеспечения продовольственной безопасности не только Казахстана, но и Центральной Азии.

Список литературы

1. Состояние и вызовы продовольственной безопасности в Центральной Азии. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. Региональный офис для Европы и Центральной Азии. Будапешт, апрель 2011 г.

2. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. – База данных FAOSTAT, на http://en.wikipedia.org/wiki/International_wheat_production_statistics

УДК 551.511. 4, 551.513.2

ОЗОННАЯ АНОМАЛИЯ 2011 г. В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА AURA

В. Б. Кашкин, Т. В. Рублева
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
e-mail: tvrubleva@ksc.krasn.ru

THE NORTH HEMISPHERE OBSERVED AND MODELLED OZONE ANOMALY IN 2011 BASED ON AURA SATELLITE DATA

V. B. Kashkin, T. V. Rubleva
Siberian State University
Institute of Engineering Physics and Radio electronics
e-mail: tvrubleva@ksc.krasn.ru

Для анализа весенней озонной аномалии 2011 г. северного полушария использована модель антициклона. Вычислены параметры циркумполярного вихря, для проверки использованы озонные данные со спутника AURA. Показано, что происходит перенос озона из центра аномалии в средние широты. Естественные физические факторы сыграли существенную роль при образовании весенней озонной аномалии 2011 г. в северном полушарии.

Ключевые слова: физическая модель, озонная дыра, зональная скорость.

Антарктическая озонная аномалия (АОА), известная также как Антарктическая озонная дыра, наблюдается уже в течение 30 лет. Она возникает в стратосфере в сентябре и исчезает к декабрю. АОА является центральной частью циркумполярного вихря (ЦВ), состоящего из кольца с повышенным содержанием озона, достигающим 400 единиц Добсона (е.Д.). Диаметр кольца около 9000 км, кольцо вращается со скоростью 10–20 м/с. Общее содержание озона (ОСО) в АОА иногда уменьшается до 80–90 е.Д. Глобальные спутниковые данные об озоновом слое с сайта NASA [1] дают возможность детально исследовать АОА и другие аналогичные атмосферные явления. На этой основе развита физическая модель образования АОА в южном полушарии [2].

В северном полушарии атмосферные образования, подобные АОА, практически не наблюдаются. Здесь другие условия – площадь суши значительно больше, чем в южном полушарии, больше общее количество озона, а зональная скорость масс озона значительно меньше. Вблизи Северного полюса, как правило, отсутствует область с аномально низкими температурами, такими как на Южном полюсе; нередко наиболее низкие температуры наблюдаются над материками (Северная Америка, Азия).

Единственный раз за 35 лет спутниковых наблюдений с 9 по 14 марта 2011 г. в Арктике появилось атмосферное образование, подобное циркумполярному вихрю в южном полушарии (рис. 1). Здесь возникло кольцо вихря, а его внутренняя часть с пониженным содержанием ОСО простиралась от Канады до полуострова Таймыр.

Причиной возникновения аномального явления, по-видимому, послужило резкое, до 19 град/сут возрастание зональной угловой скорости в приполярной области (60°–65° с. ш.) и вынос масс озона из внутренней части ЦВ в кольцо, как это обычно происходит в южном полушарии. «Провал» в центре ЦВ на рис. 1 – это не классическая озоновая дыра, так как ОСО внутри кольца превышает условный порог в 220 е.Д.

График угловых скоростей зонального переноса масс озона $\overline{W}$ в северном полушарии в приполярной области 60°–65° с. ш. приведен на рис. 2 для периода с 4 марта по 11 апреля 2011 г. При построении графика использовалась методика, описанная нами в [3]. В этот период севернее Канады в течение 27 дней наблюдались

минимальные значения ОСО (менее 250 е.Д.) [4]. В конце марта в течение недели значения ОСО падали даже до 220–230 е.Д., уменьшение озонового слоя в Арктике значительно превзошло все наблюдавшиеся здесь ранее озонные аномалии.

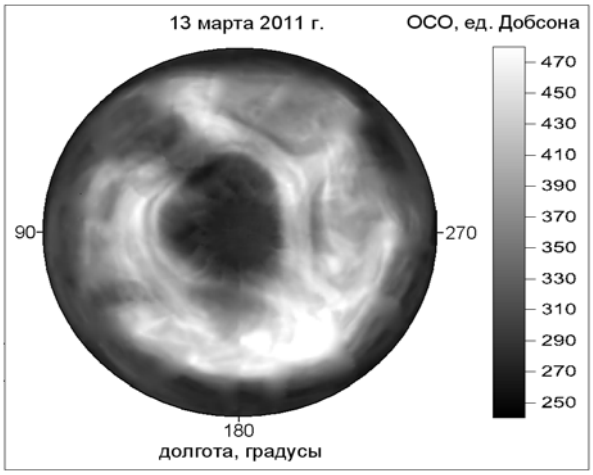


Рис. 1. Циркумполярный вихрь северного полушария в марте 2011 г.

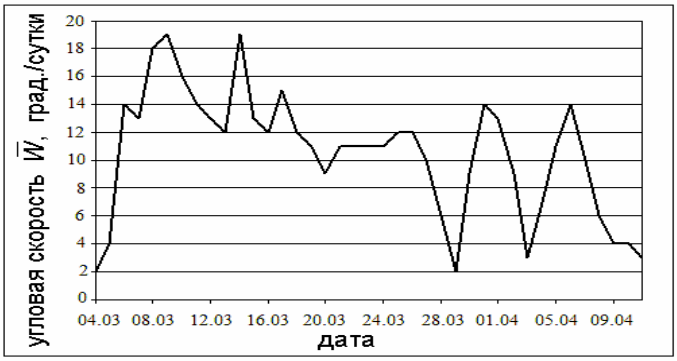


Рис. 2. Изменение угловой скорости в области 60°–65° с. ш. в весенний период 2011 г.

В марте 2011 г. средняя зональная угловая скорость масс озона $\bar{W}$ в приполярной области составила 11° в сутки. Это значение почти в 2 раза больше величины $\bar{W} = 5{,}6°$ в сутки, типичной для марта 1997–2004 гг. [5].

Весной 2011 г. в полярных областях северного полушария и прилегающих к ним территориях образовался обширный антициклон, в стратосфере вблизи полюса атмосферное давление существенно увеличилось. Воздушные потоки стали двигаться во все стороны от полюса к средним широтам. Отклоняющая сила вращения Земли (сила Кориолиса) тормозит эти потоки и разворачивает их к востоку, потоки выходят на круговые траектории. В установившемся режиме справедливо [2]:

$$m\frac{V^2}{R_\varphi} + \frac{\Delta p}{\Delta r} = 2\Omega V m \sin\varphi\,. \qquad (1)$$

В левой части (1) стоит центробежная сила, зависящая от линейной скорости V движения объема воздуха массой m (вместе с озоном) и от $R_\varphi = R_З \cdot \cos\varphi$ – радиуса окружности, по которой движется объем воздуха, здесь $R_З = 6371$ км – средний радиус Земли, φ – широта. В левой части приведен также градиент давления $\frac{\Delta p}{\Delta r}$ в

направлении r от полюса. В правой части (1) записана сила Кориолиса, здесь $\Omega = 7{,}2921 \cdot 10^{-5}$ радиан/с – угловая скорость вращения Земли.

Сила Кориолиса и центробежная сила зависят от широты φ, на некоторой широте φ_0 тормозящий эффект силы Кориолиса максимален. Следует ожидать, что вблизи этой широты сконцентрируются массы воздуха (вместе с озоном), перенесенные из приполярной зоны, здесь возникнет кольцо ЦВ. Для нахождения широты φ_0 вычислим производную по φ от (1) и приравняем её к нулю:

$$m\frac{V^2 \sin\varphi}{R_3 \cos^2\varphi} - 2\Omega V m \cos\varphi = 0\,. \qquad (2)$$

Выражение (2) преобразуется к виду

$$x^3 + 3px + 2q = 0,\ x = \cos^2\varphi,\ p = \frac{V^2}{12\Omega^2 R_3^2},\ \ q = -\frac{V^2}{8\Omega^2 R_3^2}.$$

Учитывая, что дискриминант $D = p^3 + q^2 > 0$ и $p^3 << q^2$, получаем:

$$\varphi_0 = \arccos\left[2\sqrt[3]{\frac{V}{2\Omega R_3}}\right]. \qquad (3)$$

13 марта угловая скорость $\bar{W}$=12° в сутки, что соответствует V = 15,4 м/с. Расчет по формуле (3) показывает, что максимум ОСО приходится на широту φ_0 = 59°. Радиус кольца на рис. 1 по срединной линии при этом составляет 3280 км. С другой стороны, широту максимума ОСО можно найти по спутниковым данным, используя зональные средние значения ОСО (zonal means) из [1].

Zonal means – ежедневные значения ОСО, усредненные по долготе от –179,5° до 179,5° в 5-градусном интервале широт, например от 52,5° до 57,5°. Графики зональных средних за три дня весны 2011 г. приведены на рис. 3. На графике за 13 марта видно, что максимум ОСО приходится на широту 60°, близкую к найденной выше широте φ_0. Участок графика на уровне выше 300 е.Д. описывает профиль кольца, усредненный по долготе. Анализ графика за 13 марта показывает, что произошло перераспределение озона между внутренней частью ЦВ и кольцом – во внутренней части ОСО уменьшилось, а в кольце увеличилось аналогично тому, как это происходит весной в южном полушарии [2].

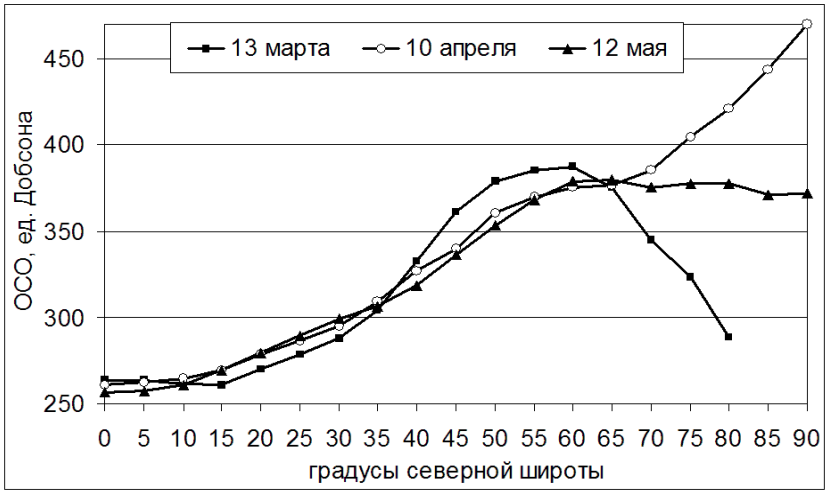


Рис. 3. Зависимость зональных средних от широты

Если бы в дальнейшем события развивались по сценарию для южного полушария, то постепенно скорость вращения кольца V стала бы уменьшаться, начался бы отток озона из кольца в приполярную область. Однако в апреле произошло смещение озонной аномалии на континент Евразии (рис. 4). Возможной причиной явилось потепление, которое, по данным [6], произошло в конце марта. Область с относительно низким ОСО охватила территорию от Архангельска до Якутска и от Екатеринбурга до Диксона, здесь общее содержание озона уменьшилось на 25–30 %. В начале апреля произошло второе потепление. Как видно на рис. 3, 10 апреля около полюса возник максимум ОСО в 470 е.Д., при этом минимум сместился к югу. К этому времени озонная аномалия значительно сократилась в размерах и частично охватила север Западной Сибири и Красноярского края. В последующие месяцы 2011 г. на большой части России и Западной Европы ОСО оказались ниже многолетних средних.

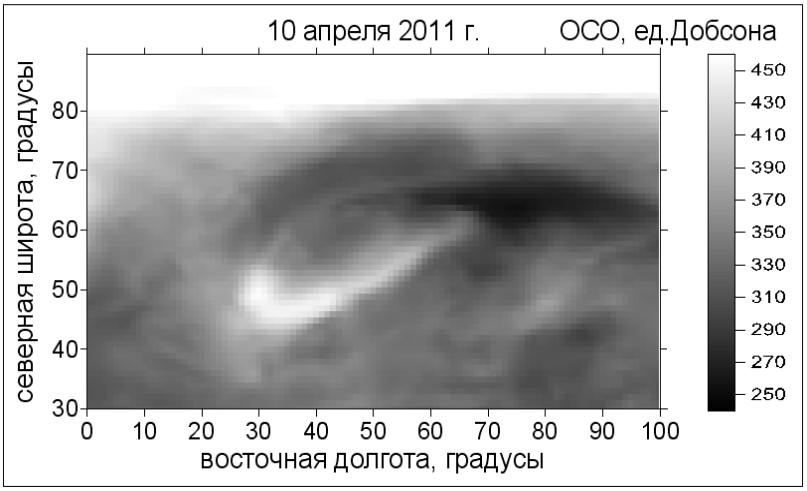


Рис. 4. Смещение озонной аномалии в Сибирь

Существует мнение, что весенняя озонная аномалия 2011 г. связана с химическими потерями озона в стратосфере [6]. Наши исследования показали, что в образование аномалии существенный вклад внесли естественные физические факторы.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data

2. Кашкин В.Б. Исследование антарктического озонового циркумполярного вихря с использованием данных спутникового дистанционного зондирования // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2015. № 2. С. 238–246.

3. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Зональное движение масс озона в нижней стратосфере по спутниковым данным // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 826–832.

4. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Изучение зональной циркуляции озона в нижней стратосфере средних широт на основе спутниковых данных / Материалы XX Междунар. симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» 23 июня – 27 июня 2014 г., Новосибирск. Конференция D: «Физика атмосферы». Новосибирск, 2014. С. 143–147.

5. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Арктическая озонная аномалия 2011 года // Тезисы докл. XVII Всерос. симпозиума «Сложные системы в экстремальных условиях», 27 июля – 2 августа 2014 г. Красноярск, 2014. С. 22.

6. Ананьев Л.Б., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности общего содержания озона и циркуляции в нижней стратосфере в зимне-весенний период 2011 года // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 44–60.

УДК 528.88, 551.324.22.

МОНИТОРИНГ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ПРИМЕРЕ КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ ДЖУНГАРСКОГО АЛАТАУ

А. Л. Кокарев[(1)], Л. В. Когутенко[(1,2)], З. С. Усманова[(1,3)], И. Н. Шестерова[(1)]
[(1)]Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан, Алматы, Казахстан
[(2)]Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China
[(3)]Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан
e-mail: kokarev60@mail.ru

В работе рассмотрены возможности мониторинга ледниковых систем обширных горных территорий на основе данных дистанционного зондирования Земли. Современное состояние оледенения оценено на основе снимков Landsat и цифровой модели рельефа. Динамика оледенения определялась посредством сравнения полученных данных с данными предыдущих каталогизаций.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, ледники, ледниковые системы, Джунгарский Алатау, деградация оледенения.

Введение

На юге и юго-востоке Казахстана горы выступают прежде всего как области интенсивного формирования водных и гидроэнергетических ресурсов, которые являются основой орошаемого земледелия и всей экономики в целом на обширных прилегающих территориях. В решении задач, стоящих перед горной гидрологией, большое место занимают ледники как один из важнейших источников питания рек в летнее время года. Ледники не только аккумулируют пресную воду, но и перераспределяют ее по суткам, сезонам и годам таким образом, что максимум стока приходится на самые засушливые периоды. По данным [1] доля ледникового стока в общем стоке ряда рек на выходе из гор Джунгарского Алатау в среднем за годовой период достигает 16 %, а за абляционный период – 31 %.

Наблюдаемое в настоящее время изменение климата, называемое как «глобальное потепление», уже привело к значительному сокращению площади оледенения и, как следствие, к уменьшению ледникового стока [2]. Для устойчивого развития региона возникла необходимость в современной оценке ледниковых ресурсов и прогнозе их изменений. Использование данных ДЗЗ позволило оценить состояние и выявить изменение не только отдельных ледников и оледенения бассейнов, но и всей ледниковой системы в целом.

Материалы и методика исследования

Джунгарская ледниковая система расположена на юго-востоке Казахстана. Территориально вся система делится на четыре части (рис. 1): северо-восточная Джунгария – бассейны рек Тентек и Ргайты (бассейн озера Алаколь), северная Джунгария – бассейны рек Биен, Аксу, Лепсы (бассейн озера Балхаш), западная Джунгария – бассейн реки Каратал (бассейн озера Балхаш), южная – бассейны рек Хоргос, Усек (бассейн реки Или, озера Балхаш).

Для территории Джунгарского Алатау ранее составлены 4 унифицированных каталога ледников на основе данных аэрофотосъемок на 1956 г. [3–6], 1972 г. [7], 1990 г. [8; 9] и по результатам обработки космических снимков Landsat 7 ETM+ на 2000 год [8; 10]. Данные каталогов, составленных за разные годы разными авторами, различаются

по способам и методам обработки исходных материалов, что может повлиять на конечные величины сравнения морфометрических характеристик оледенения.

Рис. 1. Район исследований – Джунгарский Алатау и схема деления частей Каталога

Новый Каталог ледников Джунгарского Алатау (в пределах Республики Казахстан) по состоянию на 2011 – 2012 гг. составлен на основе обработки космических снимков LandsatETM+ на следующие даты: 19.08.2011; 03.09.2011; 20.08.2012. Наземное разрешение снимков Landsat составляет 30 м, разрешение с использованием панхроматического изображения – 15 м. Для вычисления статистических характеристик рельефа, нижних и верхних границ ледников, расчета фирновой линии и в некоторых случаях определения морфологических типов ледников использованы топографические карты и цифровая модель рельефа ASTER GDEM2 (Global Digital Elevation Model). Применена система координат UTM WGS84.

Обработка снимков и их дешифрирование проведены по методикам, подробно изложенным в работах [9–11] с применением программ ENVI, ERDAS Imagine, ArcGIS, MapInfo. Для уменьшения ошибки дешифрирования использовались панхроматические изображения, выбирались также мультиспектральные изображения, максимально удовлетворяющие задачам проекта, выполнялись различные виды коррекций. Построение контуров ледников велось вручную по растровой подложке. Сопоставление контуров ледников на разных по времени снимках позволило установить наиболее точные границы ледников на момент съёмки. Кроме картографирования границ ледников проведено дешифрирование приледниковых озер и моренных комплексов (современных и стадии фернау), имеющих отчётливые дешифровочные признаки (светлый тон окраски, хорошую выраженность в рельефе). Для разных объектов применялись разные мультиспектральные псевдоцветные синтетические изображения, полученные с различным сочетанием каналов. Фрагмент карты оледенения Южной Джунгарии показан на рис. 2.

Важные параметры в оценке оледенения – объем горных ледников и объем погребенных льдов. В результате сравнения и анализа существующих методик расчета были выбраны формулы, приведенные в работах [1; 12], полученные при исследовании оледенения Джунгарского Алатау. Большинство оценок объемов льда в ледниковых системах предыдущих Каталогов (по состоянию на 1972, 1990 и 2000 гг.) дается по этим формулам, которые учитывают морфологические типы горных ледников. Для расчета объемов погребенных льдов горных ледников использованы формулы, рекомендованные П.А. Черкасовым, погребенные льды понимаются как суммарное количество погребенных ядер льда ледникового генезиса фронтальных и боковых морен. Расчеты объемов погребенного льда следует считать ориентировочными, поскольку точно определить площади погребенного льда пока невозможно [1; 7].

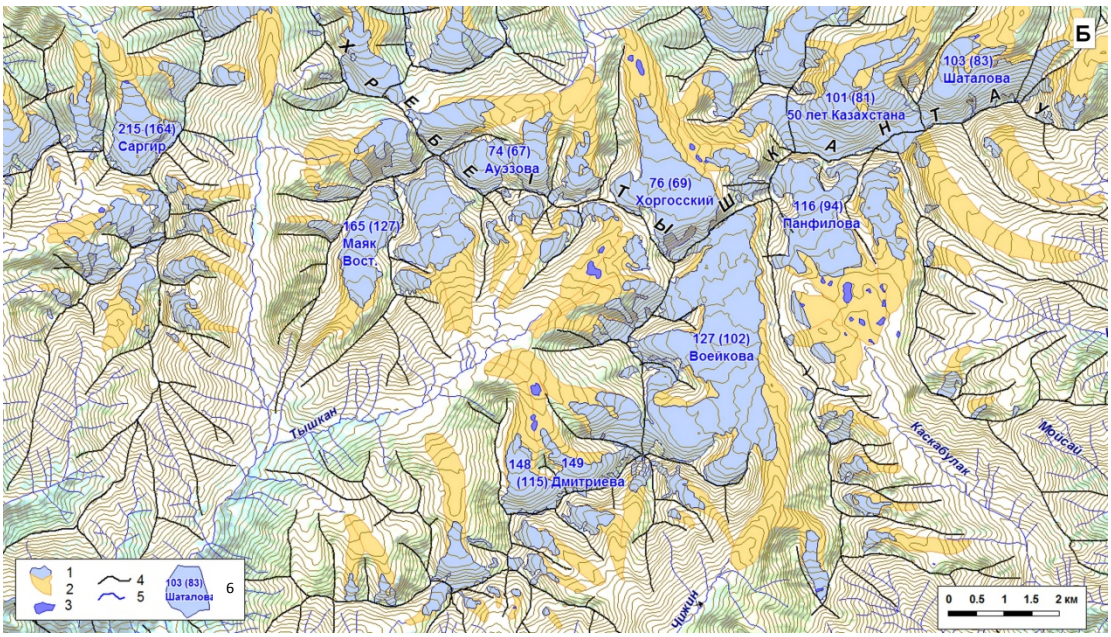


Рис. 2. Фрагмент карты оледенения по состоянию на 2011 г.
***1* – ледники; *2* – современные морены; *3* – озёра; *4* – хребты; *5* – реки;**
***6* – номера ледников и их названия, в скобках – номера ледников в 1956 г.**

Результаты исследования

По состоянию на 2011 г. в Джунгарском Алатау на территории Казахстана зарегистрировано 1288 ледников общей площадью открытой части 463,9 км^2 и объемом содержащегося в них льда 19,6 км^3. Площадь морен (стадии фернау и современных) составляет 380,7 км^2, объем погребенного льда под моренами – 7,4 км^3 (таблица).

Таблица

Изменение оледенения Джунгарского Алатау за период 1956–2011 гг.

Годы	Количество	Площадь, км^2	Объем, км^3	Площадь морен, км^2	Объем погребенного льда, км^3
1956	1369	813,9	37,4	186,1	4
2011	1288	463,9	19,6	380,7	7,4
Разница	-81	-350	-17,8	+194,6	+3,4
Разница, %	-6	-43	-48	+105	+85

Предварительный анализ полученных данных позволил выявить изменение оледенения за 55 лет (1956–2011 гг.).

В результате мониторинга и повторных каталогизаций оледенения Джунгарского Алатау подтверждены выводы о продолжающейся дегляциации региона. За 55 лет (1956–2011 гг.) полностью исчезли 360 ледников (их общая площадь в 1956 г. – 32 км^2). Незначительное уменьшение количества ледников связано с тем, что многие ледники в результате интенсивного сокращения распадаются на несколько частей, образуя новые ледники. Площадь оледенения Джунгарского Алатау уменьшилась на 43 %, теряя в среднем по 0,79 % в год.

Скорость деградации оледенения Джунгарского Алатау с 1956 по 2011 г. колеблется в пределах от 0,7 % в год (север Джунгарии) до 0,9 % в год (южная часть).

Темп деградации неравномерен и по периодам: например, в Южной Джунгарии за период с 2000 по 2011 гг. темп деградации уменьшился по отношению к предыдущему

(1990–2000) в два раза, а в северной части, наоборот, увеличился. В целом по Джунгарскому Алатау за последнее десятилетие выявлена тенденция к снижению скорости деградации оледенения, что хорошо согласуется с последними данными казахстанских климатологов, выявившим снижение температуры в этом регионе с начала 2000-х годов [13]. Согласно прогнозу ледники Джунгарии при сохранении современных условий к концу текущего столетия еще сохранятся, хотя их площадь будет составлять не более 25 % от площади оледенения в 1956 г.

Продолжающаяся деградация оледенения способствует появлению новых и увеличению размеров существующих гляциальных озер, прорывы которых представляют угрозу для населения и народного хозяйства. На территории Джунгарского Алатау отмечено 506 приледниковых озер общей площадью 13,7 км^2, из них 39 озер – особо прорывоопасных (общая их площадь – 5,5 км^2).

Список литературы

1. Черкасов П.А. Расчёт составляющих водно-ледового баланса внутриконтинентальной ледниковой системы. Алматы: Каганат, 2004. 334 с.

2. Северский И.В. Современные и прогнозные изменения снежности и оледенения зоны формирования стока и их возможное воздействие на водные ресурсы Центральной Азии / Снежно-ледовые и водные ресурсы высоких гор Азии. Алматы: Комплекс. 2007. С. 180–205.

3. Черкасов П.А. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13: Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2: Бассейн оз. Балхаш. Ч. 4: Бассейны рек Хоргоса, Усека. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 77 с.

4. Черкасов П.А. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13: Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2: Бассейн оз. Балхаш. Ч. 5. Бассейн р. Каратал. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 100 с.

5. Черкасов П.А. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13. Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2. Бассейн оз. Балхаш. Ч. 6. Бассейны рек Биен, Аксу, Лепсы. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 84 с.

6. Черкасов П.А. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13. Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2. Бассейн оз. Балхаш. Ч. 7. Бассейны рек Тентек, Ргайты. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

7. Современное экологическое состояние бассейна озера Балкаш / ред. Т.Д. Кудеков. Алматы: Каганат, 2002. 388 с.

8. Вилесов Е.Н., Морозова В.И., Северский И.В. Оледенение Джунгарского (Жетысу) Алатау: прошлое, настоящее, будущее. Алматы: Изд. КазНУ, 2013. 244 с.

9. Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Деградация оледенения Жетысу (Джунгарского) Алатау (Бассейны рек Коргаса, Осека) в период с 1956 по 1990 год // География в современном мире: теория и практика: материалы междунар. науч.-практ. конф.). Ташкент: Изд. Нац. ун-та Узбекистана, 2006. С. 308–310.

10.Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Современное состояние оледенения и погребённых льдов Южного Жетысуского (Джунгарского) Алатау // Вопросы географии Сибири. 2009. Вып. 27. С. 62-67.

11.Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Изменение ледниковых систем северного склона Заилийского Алатау во второй половине XX и начале XXI вв. // Лёд и Снег. 2011. № 4 (116). С. 39–46.

12.Мачерет Ю.Я., Черкасов П.А., Боброва Л.И. Толщина и объём ледников Джунгарского Алатау по данным аэрорадиозондирования // МГИ. 1988. Вып. 62. С. 59–71.

13.Чередниченко А.В., Чередниченко А.В., Чередниченко В.С. Временные ряды температуры и осадков. Алматы: Мега Принт, 2013. 365 с.

УДК 550.384.3

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

В. А. Кочнев
Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения Российской академии наук
e-mail: r kochnev@icm.krasn.ru

CHANGES IN THE MAGNETIC FIELD OF THE EARTH AND POSSIBLE CAUSES OF THIS PHENOMENON

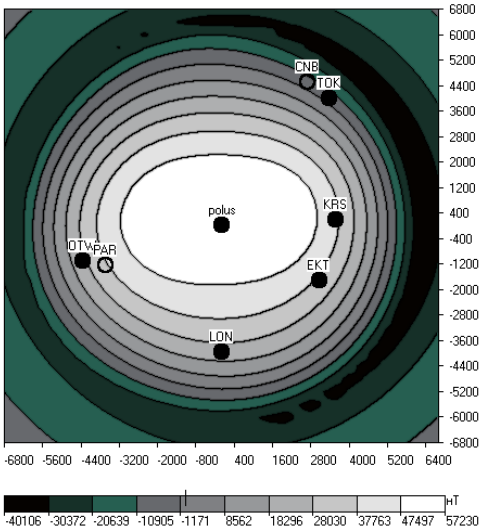
V. A. Kochnev
Institute of Computational Modeling SB RAS
e-mail: r kochnev@icm.krasn.ru

По разработанной методике проведен анализ изменения Z-компоненты магнитного поля Земли IGRF в геоцентрической системе координат за период 1980-2015. Делается вывод о квазилинейности изменения поля наповерзности. На этой основе сделан прогноз Z-компоненты на 2500 г. По прогнозу магнитное поле в восточной части увеличивается, а в западной уменьшается. На месте положительной аномалии получено отрицательное поле. Предполагается, что причиной изменения является изменение скорости направления потоков жидкой субстанции ядра и ее температуры, а также западный дрейф этой субстанции.

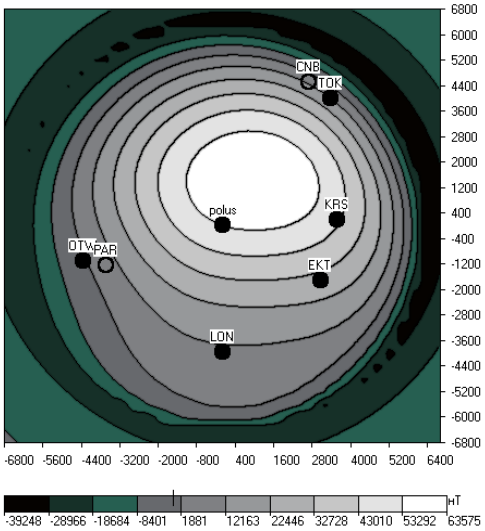
Ключевые слова: вековые движения, геодинамо.

В работах [1–4] были обозначены подходы и проблемы изучения изменения магнитного поля Земли (МПЗ) и был предложен новый подход к изучению этого явления. В основе подхода – кинематико-гравитационная модель формирования МП в ядре Земли, Z-компонента МПЗ в геоцентрической системе координат. Указанная модель и ее элементы физически адекватны существующему МПЗ, и это позволило сформировать методику изучения изменения МП. Важным элементом методики является возможность оценки изменения интенсивности прежних и вновь появившихся источников. В результате исследований было показано, что в восточной части северного полушария (рисунок, *d*) МПЗ постепенно растет со скоростью около 60 нТл/год (в том числе в области Сибирско-Азиатской глобальной аномалии) и около 120 нТл/год в западной и восточной части южного полушария. В западном полушарии планеты идет интенсивные уменьшение МПЗ от –100–120 нТл/год (рисунок, *c*, *d*). Наиболее интенсивно МП убывает в области Канадской и Южно-Атлантической аномалии. В работах было сделано предположение: если темп убывания в областях этих аномалий будет продолжаться с той же скоростью, то через 500 лет на их месте появятся отрицательные аномалии. Учитывая квазилинейность изменения поля в период 1980–2015 гг., в данной работе сделан прогноз поля на эпоху 2500 г. На рисунке приведены для сравнения Z-компонента МП в северном и южном полушарии (вид со стороны северного полюса). Для ориентации на рисунке приведены проекции полюса (POL) и городов с символами TOK – Токио, KRS – Красноярск, EKT – Екатеринбург, LON – Лондон, OTV – Оттава. Светлыми кружками отмечены два пункта в южном полушарии: CNB – Канберра (Австралия), PAR – Пунта-Аренас (южная оконечность Южной Америки).

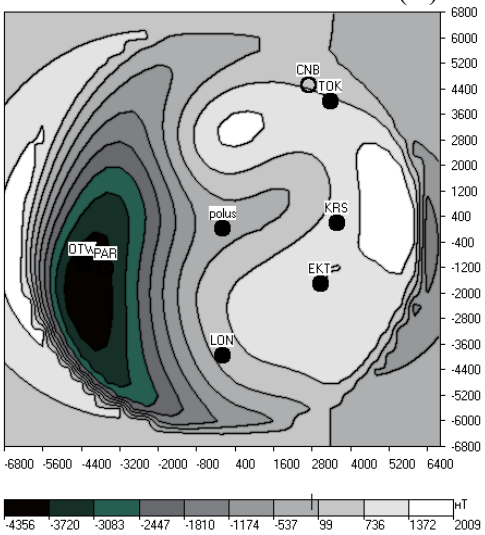
В среднем ряду рисунка приведено изменение Z-компоненты в северном и южном полушарии за период 1980–2015 гг. Зная скорость изменения поля ΔZ в каждой точке, можем рассчитать ΔZ на заданный временной период вперед или назад и, прибавив его к известному полю, получим картину в будущем или прошлом. Конечно, оценка будет приближенной, так как она не учитывает возможные вариации скорости.



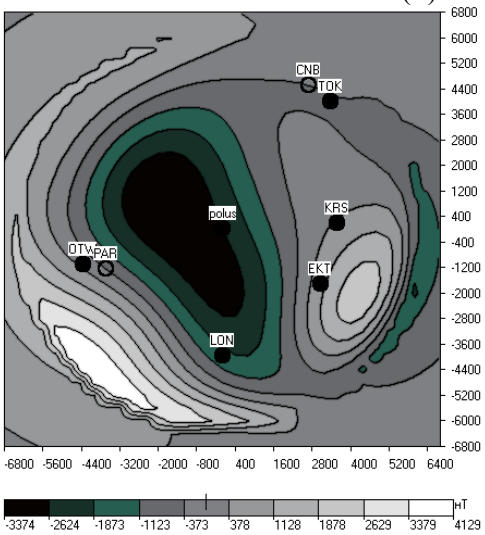
a. Z-компонента МП 2005 г. (N)



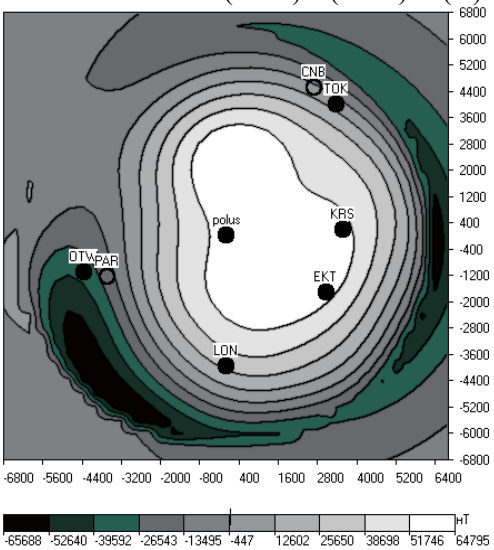
b. Z-компонента МП 2005 г. (S)



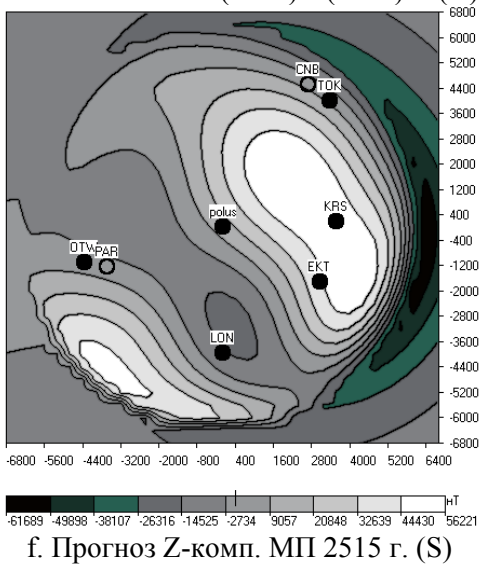
c. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)



d. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)



e. Прогноз Z-комп. МП Z 2515 г. (N)



f. Прогноз Z-комп. МП 2515 г. (S)

Рис. Компонента магнитного поля в геоцентрической системе.
Вид со стороны северного полюса

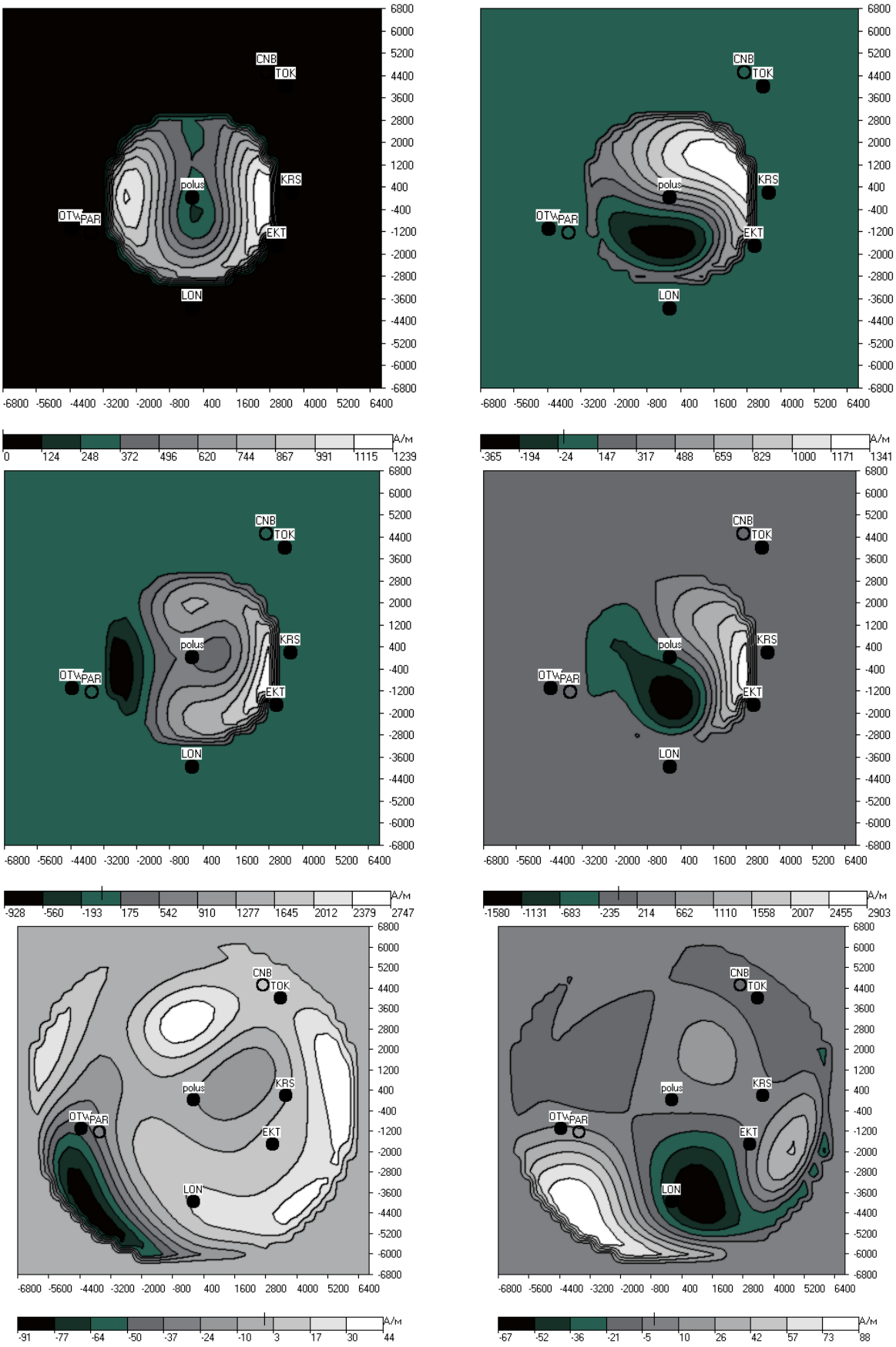


Рис. (окончание)

В нижнем ряду рисунка приведен прогноз Z-компоненты для эпохи 2515 г. Сравнивая картинки верхнего и нижнего ряда, видим существенное отличие конфигураций. В эпоху 2000 г. оси эллипсов, создаваемых максимальными изолиниями, направлены примерно по долготам –270º 90º, а квазиэллипсы эпохи 2515 г. повернуты примерно на 80º по часовой стрелке. То есть годичная скорость составляет примерно 0,14º и направленность изменения аномалий МП примерно соответствует западному дрейфу. Диапазон амплитуд Z-компоненты прогнозного поля расширился. Если в эпоху 2000 г. он был в пределах от –40000 до +63600 нТл, то в прогнозном поле пределы стали –65700 и +64800 нТл. Диапазоны расширились за счет уменьшения минимума на –25000 нТл (64,2 %).

Усиление магнитного поля в восточном полушарии может быть объяснено появлением нового источника в ядре южного полушария и увеличением температуры внутри этой части ядра, и кроме того уменьшением влияния Канадской аномалии, силовые линии которой идут в восточной части в обратном направлении, то есть с юга на север. Уменьшение магнитного поля канадской аномалии можно интерпретировать как уменьшение температуры и скорости движения в западной части северного полушария. В южном полушарии западные источники ядра являются пассивными, что создает пониженное поле в Южно-Атлантической аномалии.

Наиболее важным следствием приведенных моделей является то, что за короткий срок (в геологическом масштабе) МПЗ изменяется быстро и на месте крупных положительных аномалий возникают отрицательные. Но отсюда не следует, что произойдет полная инверсия магнитного поля, о которой говорится в большом количестве работ. В работе [5] выделены три периода (суперхрона), в течение которых ориентация МП оставалась стабильной. Эти интервалы занимают около 20 % рассматриваемого в работе периода в 542 млн лет. В течение остального времени ориентация МП менялась с близким к случайным или периодическим интервалами. Вопросы правильной интерпретации магнитных и палеомагнитных данных имеют важное значение для изучения процессов, происходящих в ядре Земли. Они поднимаются и другими учеными, в частности [6].

Список литературы

1. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980-2005 гг. // Междунар. конф. MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». М., 2014.

2. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980-2005 г. // 41-я сессия Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург, 2014. С. 121–124.

3. Кочнев В.А. Анализ устойчивости решения обратной задачи по z-компоненте глобального магнитного поля над поверхностью Земли в геоцентрической системе координат // Материалы 42-й сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологиче-ской интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург, 2015. С. 110–114.

4. Кочнев В.А. Метод анализа изменений геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат // 3-я школа-конференция «Гординские чтения». М., 2015.

5. Olson P., Hinnov L.A., Driscoll P.E. Nonrandom geomagnetic reversal times and geodynamo evolution // Earth and Planetary Science Letters. 2014. Т. 388. С. 9–17.

6. Rouse I.E. PALEOMAGNETISM // Origins. 1983. Т. 10, № 1. С. 18–36.

УДК 502/504 + 517

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА НА СОСТОЯНИЕ ПРИГОРОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (г. КРАСНОЯРСК)

Н. А. Кукоба[(1)], И. Ю. Ботвич[(2)], Ю. Д. Иванова[(2)]
[(1)]ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
[(2)]Институт биофизики СО РАН
e-mail: ku-ru07@inbox.ru
e-mail: irina.pugacheva@mail.ru
e-mail: lulichkja@rambler.ru

В настоящей работе рассмотрены возможности использования вегетационных индексов, полученных на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса (MODIS), для мониторинга техногенного влияния промышленного центра на состояние пригородной растительности на примере г. Красноярска.

Ключевые слова: атмосферные загрязнения, вегетационный индекс, спутниковые данные.

Неблагоприятная экологическая ситуация в крупных промышленных центрах Сибири, сложившаяся под воздействием техногенных нагрузок, определяет состояние окружающей среды, специфическое для каждого промышленного центра. Постоянно присутствующий набор поллютантов приводит к изменениям свойств отдельных биотических компонентов, поэтому возможно проводить оценку качества среды по реакциям растительных организмов на условия произрастания. Необходимо разрабатывать определенные методики по учету и анализу состоянию древесных растений, например таких как: устойчивость (способность к саморегуляции), стабильность, способствующая сопротивляемости растительной экосистемы к различным видам воздействия, динамичность, функциональность и индикаторная способность. Взамен существующей глазомерной оценки зеленых насаждений необходима разработка точных критериев и аналитических методов. Требуется обоснование показателей, позволяющих установить закономерности формирования зеленых насаждений и выполнения ими экологических функций в процессе их жизнедеятельности, а также разграничить повреждения и норму в условиях техногенного загрязнения [1].

Для оценки пагубных изменений на пригородные древостои в условиях техногенного воздействия промышленных центров предлагается использование вегетационных индексов для мониторинга состояния растительного покрова и определения качества окружающей среды. Для анализа в работе использовались данные, полученные со спутника MODIS/Terra. Архив данных MODIS насчитывает более 14 лет. Его цель состоит в сборе данных для калиброванных глобальных интерактивных моделей Земли как единой системы. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника Terra каждые 2 дня в 36 спектральных зонах (в диапазоне 0,405–14,385 мкм) с разрешением 250–1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе. Данные MODIS-NPP находятся в свободном доступе и имеют широкий спектр применения для исследования атмосферы, океана и суши [2]. Целью работы является проверка замены трудоемких, дорогостоящих и долговременных наземных исследований техногенных воздействий на растительность более доступными дистанционными данными, что крайне важно в условиях труднодоступности таежных лесов и отсутствия финансирования таких исследований.

Вегетационный индекс – это показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) ДДЗ (данные дистанционного зондирования) и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе

снимка. Эффективность ВИ (вегетационные индексы) определяется особенностями отражения; эти индексы выведены, главным образом, эмпирически.

Самый известный и широко используемый вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation *Index*). Он прост для вычисления, имеет самый широкий динамический диапазон из распространённых ВИ и лучшую чувствительность к изменениям растительного покрова [3; 4]. Показывает плотность растительности в определенной точке изображения и равен разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7–1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа [2].

Объектами исследования являются участки с относительно однородной древесной растительностью (смешанные леса) в пригороде Красноярска (рис. 1), подверженные техногенному воздействию.

Рис. 1. Расположение участков рассмотренных древостоев на пригородной территории вокруг г. Красноярска (1 – Октябрьский и 2 – Свердловский – территории с меньшим техногенным воздействиям; 3 – Березовский и 4 – Ермолаевский – территории в зоне сильного воздействия)

Для того чтобы проверить возможность мониторинга на основе спутниковых данных пригородных лесов вокруг г. Красноярска, в различной степени подверженных техногенному воздействию, было выбрано четыре участка со смешанными древостоями. Как известно, основным техногенным воздействием на растительность как в самом г. Красноярске, так и на пригородной территории является загрязнение атмосферного воздуха, вызванное выбросами в атмосферу Красноярского алюминиевого завода (основной загрязнитель), рядом ТЭЦ и других более мелких загрязнителей воздушного бассейна города [5]. Следующим техногенным воздействием являются осадки, содержащие различные химические агрессивные вещества. Оба техногенных воздействия негативно влияют в первую очередь на фотосинтезирующий аппарат растений (листья, хвоя). Таким образом, степень негативного влияния техногенных воздействий пропорциональна повреждениям листьев или хвои, которые и отражаются на значениях вегетационных индексов [6]. Особенно это проявляется к концу вегетационного периода, когда повреждения фотосинтезирующего аппарата растений накапливаются, и состояние растений усугубляется, начиная уже с августа.

Два рассмотренных участка (Октябрьский, Свердловский) были выбраны на различных берегах р. Енисей на значительном удалении от алюминиевого завода. Два других участка находятся рядом с основным загрязнителем воздушного бассейна города, в подфакельной зоне алюминиевого завода, согласно розе ветров для

г. Красноярска. Данные средних значений NDVI по каждому участку в течение вегетационного периода 2001 г. показаны на рис. 2. Обращает на себя внимание тот факт, что динамика значений NDVI различна для этих пар участков. Если в начале вегетационного периода индексы NDVI больше для более чистых участков, то к завершению вегетационного периода индексы на этих участках снижаются и разница в состоянии растений уже не заметна. Завышенные данные NDVI в начале и конце вегетационного периода для загрязненных участков также являются результатом техногенного воздействия городской среды. Поскольку данные участки находятся на территории городского острова тепла, это приводит к повышению среднесуточных температур и более раннему старту вегетации весной, а также продлению вегетации осенью по сравнению с более отдаленными от техногенного воздействия участками.

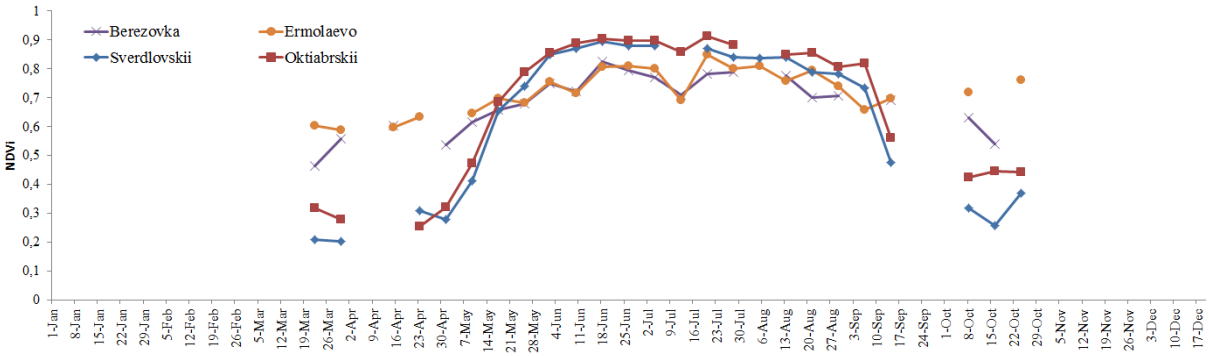


Рис. 2. Данные средних значений NDVI на выбранных участках в пригородной зоне г. Красноярска

Наряду с NDVI рассматривались и другие вегетационные индексы (ENVI и LAI), что позволило конкретизировать и дифференцировать наблюдаемые сезонные изменения на рассмотренных участках. Данное исследование показало, что для мониторинга техногенного влияния крупного промышленного центра на пригородные леса на основе использования вегетационных индексов можно выделить территории; наиболее подверженные техногенному воздействию по смещению сроков вегетации и снижению значений вегетационных индексов.

Работа поддержана грантом ККФН № 15-45-04034.

Список литературы

1. Авдеева Е.В. Автореферат на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города (на примере г. Красноярска), 2008.

2. Nikolay Kukoba, Yulia Ivanova and Irina Botvich, The Influence of Altitudinal Zonality on Spectral Characteristics (MODIS/Terra) Mountain Forests of Western Sayan / M. Ozturk et al. (eds.), Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems, Springer International Publishing Switzerland 2015, pp 637-643. DOI 10.1007/978-3-319-12859-7_26

3. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [www.gis-lab.info]. URL: http://gis-lab.info/qa/vi.html (дата обращения: 07.06.2015)

4. Ivanova Yu., Bartsev S., Pochekutov A., Kartushinsky A. (2007). The analysis of seasonal activity of photosynthesis and efficiency of various vegetative communities on a basis NDVI for modeling of biosphere processes // Advances in space research. 39 (1), 95–99.

5. Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В. Красноярск. Экологические очерки: монография. Красноярск: СФУ, 2012. 136 с.

6. Тасейко О.В., Михайлюта С.В., Иванова Ю.Д. и др. Изменение подстилающей поверхности в районе Юрубченского месторождения в результате антропогенной деятельности // Инженерная экология. М. РФ. 2011. № 6. С. 16–24.

УДК 630.43

ОСОБЕННОСТИ ХРЕБТА УЮКСКИЙ ПО СНИМКАМ LANDSAT

Х. Б. Куулар
Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, г. Кызыл,
e-mail: kuular_kb@mail.ru

FEATURE OF THE MASSIF UJUKSKIJ BY LANDSAT IMAGE

Khulermaa B. Kuular
FSBIS Tuvinian Institute for Exploration Natural Resources SB RAS, Kyzyl
e-mail: kuular_kb@mail.ru

Рассмотрены вопросы картографирования горных лесов Республики Тыва. Приводятся результаты исследований, проводимых на ключевом участке хр. Уюкский. Полученные идентификации на основе данных спутника Landsat-8 воспроизводят четкую пространственную структуру горных лесов.

Ключевые слова: космические снимки, горные бореальные леса, ключевые участки, картографирование.

Введение

Уюкский хребет является южным отрогом Западного Саяна. Представляет собой сильно расчленённое низкогорье, слабо расчленённое среднегорье на северных пологих склонах и резко расчленённое среднегорье на южных склонах в пределах высот 950–2300 м н. у. м. Координаты Уюкского хребта 51°41’57’’ с. ш., 93°10’05” в. д.

Леса формируются в биоклиматических условиях со среднегодовой температурой от –2,72 °С (1984–20014 гг.), суммой активных температур (Т > 10 °С) 1936 °С (2011–2013 гг.), годовой суммой осадков 340 мм. Средняя температура января –28,3 °С, июля – 17,8 °С, апреля – 2,4 °С. Распределение осадков в течение года крайне неравномерно: 70 % осадков выпадают с мая по сентябрь. Продолжительность зимы составляет 150–170 дней с мощностью снежного покрова от 7 до 30 см.

Ведущая роль в установлении конкретного климатического режима в регионе принадлежит рельефу. Абсолютная высота местности, амплитуда относительных повышений и понижений, положение горного хребта создают многообразие и контрастность локальных климатических режимов. По литературным данным соотношение тепла и влаги является решающим фактором для произрастания леса. Наиболее благоприятные климатические условия для лесов существуют на северном макросклоне на высоте 900 м н. у. м., а на южном макрослоне – на 1200 м н. у. м. Основными лесообразующими породами выступают лиственница сибирская (*Larix sibirica Ledeb.),* кедр сибирский *(Pinus sibirica Du Tour).* Суровые природно-климатические условия и бедность почв обусловливают низкую производительность горных лесов. Средний класс бонитета лесов IV, средний возраст 100 лет.

Современные средства дистанционного зондирования Земли в совокупности с мощными инструментами их обработки предоставляют исследователям уникальные возможности для изучения состояния и картографирования лесов. С начала 2000-х гг. активно разрабатываются методы спутникового картографирования лесов, отображающие состояние и распространение лесов России. Последняя созданная карта растительного покрова России TerraNorte RLC на основе данных MODIS 2010 г. с пространственным разрешением 250 м [1].

Наиболее подробная карта растительности Тувы была создана А.И. Шретером (1957), а карта-схема лесов Республики Тыва – в 1992 г. Поэтому уточнение и обновление данных на базе дешифрирования космических снимков высокого

разрешения отвечает возросшей потребности в информации о состоянии лесов региона. В связи с этим актуальной является получение достоверной информации о бореальных лесах хребта Уюкский на основе современных методов дистанционного зондирования.

Материалы и методы

Наиболее перспективным является уточнение структуры лесов на основе дешифрирования космических снимков Landsat с разрешением 30 м и пространственным охватом 185 м, отвечающее возросшей потребности в информации о состоянии лесов для локального уровня. В работе в качестве основного материала использованы мультиспектральные спутниковые снимки Landsat-8 без облаков за 02.11.2013 и 18.09.2014. Для исследования профильного участка использованы следующие этапы: подготовительный этап, маскирование снимков, автоматическая классификация. Обработка спутниковых изображений проведена в программном пакете ERDAS IMIGINE 9.2. Для разработки алгоритма сопряженного анализа спутниковых данных и наземных данных были заложены тестовые площадки на профильный участок.

Процедура построения карты лесов проведена в виде последовательности следующих этапов:

1) пространственная привязка растрового файла по опорным точкам ключевого участка;

2) автоматическая классификация снимков с последующим визуальным анализом и распределением классов, соответствующим основным породам;

3) векторизация объектов и создание полигонального слоя цифровой карты;

4) создание и редактирование атрибутивных таблиц векторных слоев;

5) формирование цифровой карты породного состава.

Ключевым этапом процедуры построения карты лесов является классификация космоснимков. Основой классификации по породам леса является известная зависимость отражательной способности деревьев разных пород от длины волны в спектре солнечного излучения. При дешифрировании космоснимков используются различия в указанной зависимости отражательной способности деревьев разных пород, проявляющиеся в различиях яркости пикселов изображения и позволяющие определять на космоснимке по цвету (или оттенкам цвета) разные породы.

Результаты и обсуждения

Представлены результаты классификации в масштабе 1:5 000 000, а дешифрирование древесно-кустарниковой растительности потребовало работы со снимками в масштабе 1:200 000. Полученное изображение показывает, что по лесному покрову хребта заметны высотно-зональные черты. Составленная по результатам дешифрирования снимка за 02.11.2013 идентификация представлена на рис. 1. Легенда характеризует хвойный породный состав горных лесов. На высокогорно-таежном ВПК преобладают кедровые леса (1400–1900 м н.у.м.), реже ельники; на среднегорном и низкогорном ВПК – лиственничные леса (1000–1400 м н.у.м.) (рис. 1). Данное изображение позволило идентифицировать контурное дешифрирование темно- и светлохвойных пород. Также особенность снимка за 02.11.2013 заключается в том, что он способствует выявлению темнохвойного подроста, который был незаметным под пологом других пород в период вегетации.

В результате классификации снимка за 18.09.2014 выявлены следующие дешифровочные классы: 1 – ельники *(Picea obovata)*, 2 – лиственничники *(Larix sibirica)*, 3 – кедровники *(Pinus sibirica)*, 4 – кустарники, 5 – березняки *(Betula pendula, Betula microphylla, Betula rotundifolia)*, 6 – зарастание гарей и вырубок, 7 – ивняки. Выявлены все древесные породы, которые произрастают на хребте. Определение породного

состава проведено с учётом материалов лесоустройства лесного хозяйства Республики Тыва.

На изображениях видны разнородность структуры горных бореальных лесов. Такая дифференциация растительного покрова обусловлена биоклиматическими условиями, определяющими высотно-поясными комплексами и эдафическими условиями, воздействующими на закономерности внутрипоясного распределения растительного покрова в соответствии с экологическими условиями пологих и крутых световых и теневых, подветренных и наветренных склонов [2; 3], также влиянием мезорельефа (экспозицией склонов), почвенными условиями (механическим составом почв, их карбонатностью, засоленностью) и гидрологическим режимом местообитаний.

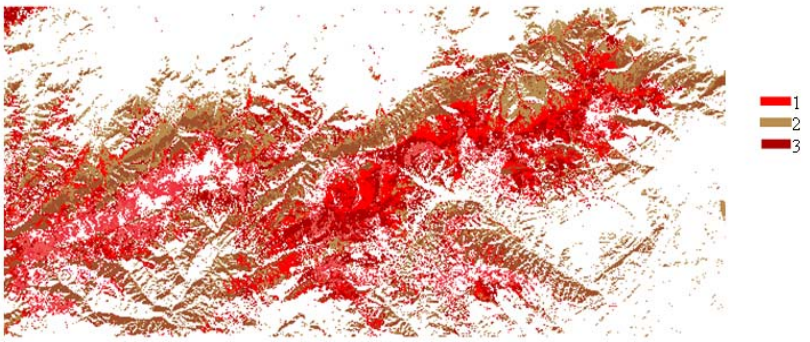


Рис. 1. Идентификация хвойных пород хр. Уюкский на основе данных Landsat (02.11.2013)
1 – кедровники; 2 – лиственничники; 3 – ельники

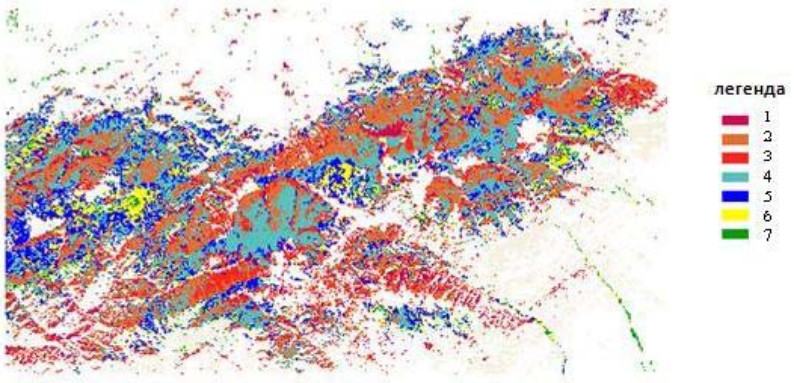


Рис. 2. Идентификация пород хр. Уюкский на основе данных Landsat (18.09.2014)
1 – ельники; 2 – лиственничники; 3 – кедровники; 4 – кустарники; 5 – березняки; 6 – зарастание гарей и вырубок; 7 – ивняки

Для Уюкского хребта выявить структуру и закартографировать эти структурные элементы оказалось возможным только благодаря использованию космоснимков разрешения 30 м. На хребте Уюкский представлено разнообразие лесообразователей и три высотно-поясных комплекса – высокогорно-таежный (кедровый), среднегорный и низкогорный подтаежный (кедрово-лиственничный) и подтаежный (кедрово-лиственничный), типичные среднегорные ландшафты с семигумидным климатом. На основе полевых работ за период 2005–2015 гг. была сформирована база данных по структуре и динамике растительного покрова, что позволяет выявить локализацию горных лесных экосистем. ГИС-проект профильного участка имеет ЦМР, таксационные описания, план лесонасаждений.

Список литературы

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

2. Бочарников М.В, Огуреева Г.И. Бореальные леса Сибири и Монголии на южной границе распространения и проблемы их картографирования // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. Доклады V Всерос. конф., посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013 г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 255–258.

3. Куулар Х.Б., Чупикова С.А. Экологические особенности бореальных лесов хребта Западный Танну-Ола и геоинформационный анализ // Геоинформатика. 2010. № 1. С. 68–72.

УДК 528.8:622

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВЫПАДЕНИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

А. А. Леженин[(1)], В. Ф. Рапута[(1)], Т. В. Ярославцева[(2)]
[(1)]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
[(2)]ФБУН Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора, Новосибирск
e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru
e-mail: raputa@sscc.ru
e-mail: tani-ta@list.ru

STUDY OF POLLUTION AEROSOL FALLOUT BASED ON SATELLITE OBSERVATIONS

A. Lezhenin[(1)], V. Raputa[(1)], T. Yaroslavtseva[(2)]
[(1)]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
[(2)]FGUN «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» Rospotrebnadzora
e-mail lezhenin@ommfao.sscc.ru
e-mail: raputa@sscc.ru
e-mail: tani-ta@list.ru

На данных спутниковых наблюдений загрязнения снежного покрова с использованием текущих метеорологических наблюдений изучены поля выпадения пыли от высотных труб Искитимского цементного завода. Проведена численная реконструкция пылевого загрязнения окрестностей предприятия. Для периодов отсутствия снегопадов показана возможность оценки ореолов загрязнений, формирующихся в интервалы времени от нескольких дней до нескольких недель.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, загрязнение снежного покрова, атмосфера, численное моделирование, реконструкция.

Введение. Для описания процессов переноса атмосферных загрязнителей широко используются методы математического моделирования [1; 2]. При наличии необходимой входной информации применение этих методов значительных затруднений не представляет. В реальных условиях существует проблема неполноты данных. В этом случае моделирование процессов распространения примесей существенно усложняется и требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Информация, получаемая с искусственных спутников Земли, позволяет визуализировать загрязнения снежного покрова вокруг городов и крупных промышленных предприятий. Снежный покров на спутниковых снимках служит фоном, на котором наблюдается постепенное развитие загрязнения территорий. Это эффект наглядно проявляется в периоды времени, когда отсутствуют выпадение снега, а также во время снеготаяния [3]. Инструментальные исследования загрязнения атмосферного воздуха требуют значительных материальных затрат и их проведение, как правило, носит эпизодический характер. Более экономичными методами является использование природных планшетов: почвенный, растительный и снежный покровы, а также данных дистанционного зондирования Земли.

Экспериментальные исследования. В зимние сезоны 2012/13 г. и 2013/14 г. проводились исследования пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода, расположенного в г. Искитим [4]. Город находится в юго-восточной части Новосибирской области в 55 км от областного центра – г. Новосибирска. С севера

и востока к промплощадке предприятия примыкает р. Бердь. Основными источниками выброса неорганической пыли в атмосферу являются две близко расположенные 80-метровые трубы с диаметрами 6 метров.

Объектами исследования служили выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников ОАО «Искитимцемент», снежный покров на территории г. Искитим и его пределами. Материалами исследований являлись отчёты ОАО «Искитимцемент» о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ стационарными источниками в период 2012, 2013 гг., результаты визуального обследования и физико-химического анализа состава проб снеговой воды. Маршруты отбора проб располагались по восьми румбам относительно основных источников выброса неорганической пыли. Точки наблюдений находились на расстояниях от 0,4 до 3 км. Было отобрано более 40 проб снега. Это позволило провести детальный численный анализ процессов выпадений пыли от основных источников предприятия, установить количественные закономерности содержания осадка в снеге на различных направлениях выноса.

Модель реконструкции. Анализ данных измерений показал, что в пределах 1,5 км от основных источников выбросов величина pH варьировалась от 9 до 12. Преобладающие выпадения пыли произошли в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях от цементного завода.

Использование асимптотик полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и статистических свойств распределения скорости ветра и вертикального турбулентного обмена в приземном слое атмосферы позволяет выразить плотность выпадений полидисперсной примеси за длительный промежуток времени в виде следующей регрессионной зависимости [4]:

$$\bar{q}(r,\varphi) = \frac{\theta_1}{r^{1.5}} P(\varphi + 180^\circ) \exp(-\frac{c}{r}) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{r}\right)^\omega d\omega \ , \qquad (1)$$

где r, φ – полярные координаты; $P(\varphi)$ – приземная роза ветров; $\Gamma(m)$ – гамма-функция Эйлера; θ_1, θ_2, θ_3 – параметры, определяемые по данным наблюдений.

Результаты и обсуждения. На основе модели (1) проведена численная реконструкция поля выпадений. Показано существование устойчивых количественных закономерностей содержания пыли в снежном покрове по радиальным относительно основного источника направлениям. Восстановлено суммарное поле выпадений пыли и проведена оценка выбросов в атмосферу в рассматриваемом зимнем сезоне. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.

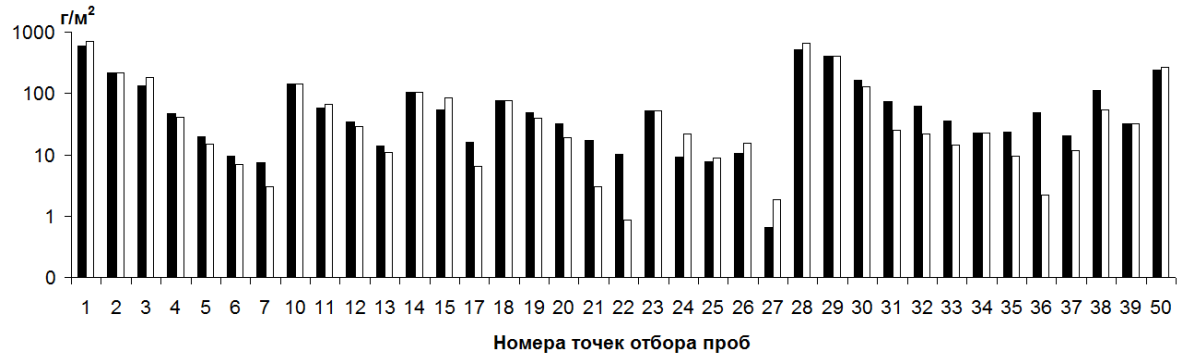


Рис. 1. Измеренные (■) и восстановленные (□) на основе зависимости (1) выпадения неорганической пыли (г/м^2) в точках отбора проб снега

Из анализа результатов моделирования вытекает, что основные выпадения пыли произошли в направлении на северо-запад, вдоль долины р. Бердь. Исходя же из розы ветров, основные выносы пыли следовало бы ожидать в северо-восточном направлении. На наш взгляд, это явление объясняется особенностями рельефа местности.

Конфигурация рельефа в данном случае оказывает заметное влияние на процессы распространения газовых и аэрозольных примесей в нижних слоях атмосферы. Привлечение спутниковых наблюдений позволяет визуализировать пространственную картину поля выпадения пыли на снежный покров. На рис. 2 представлен снимок окрестностей Искитимского цементного завода с ИСЗ «Landsat-8» за 7 февраля 2014 г., взятый с сайта Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (http://www.rcpod.ru).

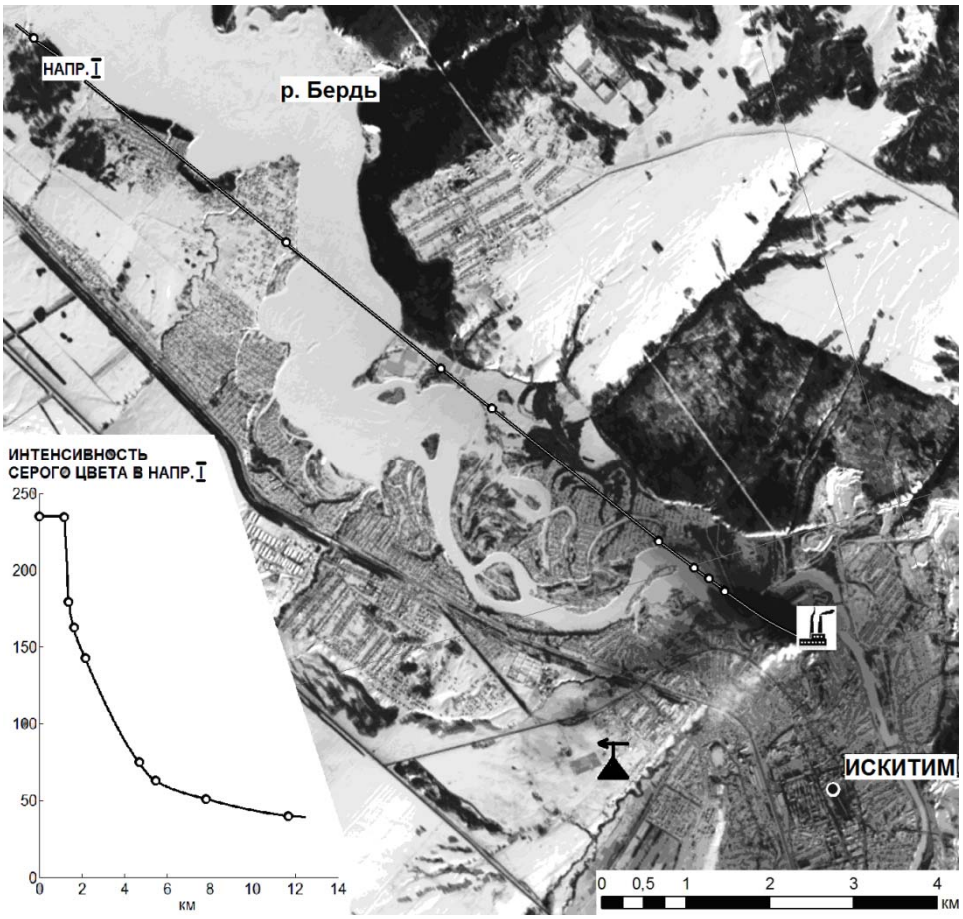


Рис. 2. Спутниковый снимок окрестностей Искитимского цементного завода от 7 февраля 2014 г. В левом нижнем углу – интенсивность изменения оттенков серого цвета в северо-западном направлении от завода, – положение метеостанции г. Искитима

На снимке отчетливо видна область интенсивного загрязнения снежного покрова. Метеорологическая станция, расположенная на расстоянии около 3 км от промышленной площадки предприятия, не фиксировала выпадение осадков в предшествующие 8 дней. Следовательно, шлейф загрязнения, видимый на космическом снимке, сформировался за интервал времени с 30 января по 7 февраля. На рис. 2 явно прослеживается северо-западная ориентация пылевого выноса.

В таблице приведены данные метеостанции о повторяемости направлений ветра.

Таблица

Повторяемость направлений ветра на метеорологической станции Искитим в период 30 января – 7 февраля 2014 г.

Направление ветра	СВ	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ШТИЛЬ
Повторяемость, %	2	3	14	62	10	10

Этот период времени характеризуется слабыми ветрами (1–2 м/с), доминирующими в более 80 % случаев и штилевыми условиями (10 % случаев).

Заключение. С использованием данных метеорологических наблюдений и спутниковых снимков загрязнения снежного покрова установлено существенное влияние рельефа местности на формирование полей выпадения пыли от высотных труб Искитимского цементного завода. В зимний период основной вынос загрязняющей примеси происходит в направлении на северо-запад, вдоль долины р. Бердь. Измерения на метеостанции г. Искитим фиксирует преобладание юго-западных и южных ветров. Это противоречие объясняется орографическими особенностями местности, наличием возвышенных форм рельефа в правобережье р. Бердь и часто наблюдаемой устойчивой температурной стратификацией в нижней атмосфере. Анализ данных мониторинга загрязнения снежного покрова за зимние периоды 2012–2014 гг. [4], также подтверждает вышесказанное.

Отметим, что в условиях сложного рельефа данные с близлежащих метеостанций могут не отражать реальное поле ветра. Поэтому весьма проблематично применение общепринятых методик для расчета полей концентраций примесей. В связи с этим вытекает необходимость проведения также и мониторинговых исследований процессов техногенного загрязнения территорий.

При традиционном подходе последовательные спутниковые снимки в период снеготаяния позволяют выявить зоны загрязнений от промышленных предприятий за зимний сезон [3, 4]. Такой подход существенно ограничивает возможности использования космической информации, получаемой в течение всего зимнего периода. На наш взгляд, для максимального применения этой информации целесообразно привлекать данные о текущих метеорологических условиях. Тогда в периоды отсутствия снегопадов можно оценивать зоны промежуточного техногенного загрязнения. В частности, на территориях, находящихся под влиянием Сибирского антициклона, в зимнее время при отсутствии облачности с помощью спутниковых снимков можно отслеживать ореолы загрязнений, формирующиеся в периоды времени от нескольких дней до нескольких недель в окрестностях промышленных предприятий.

Список литературы

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 351 с.

2. Алоян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: Наука, 2008. 415 с.

3. 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.

4. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъёмки на основе реконструкции полей выпадений / А.Ф. Щербатов, В.Ф. Рапута, В.В. Турбинский, Т.В. Ярославцева // Анализ риска здоровью. 2014. № 2. С. 42–47.

УДК 528.88; 504.064; 551.59

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАДОБИТИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

В. Г. Маргарян[(1)], Л. М. Симонян[(2)]
[(1)]Ереванский государственный университет,
[(2)]Армгосгидромет
e-mail: vmargaryan@ysu.am, larisa_simonyan@mail.ru

FEATURES OF SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF HAIL AND MAIN TASKS OF EFFECTIVE MANAGEMENT ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ARMENIA

V. G. Margaryan, L. M. Simonyan

В работе выявлены и проанализированы закономерности пространственно-временного распределения градобития на территории республики, обсуждены основные задачи эффективного управления градобитием.

Град – гидрометеорологическое природное бедствие, наблюдаемое на территории Республики Армения, одно из явлений, причиняемых самый большой ущерб сельскому хозяйству, из-за чего каждый год экономика и сельское население несут большой ущерб.

Ключевые слова: гидрометеорологическое опасное явление, число дней с градом, пространственно-временное распределение, материальный ущерб, эффективное управление, противоградовые станции, градозащитные сетки.

Введение

Территория Республики Армении периодически подвергается воздействию различных стихийных бедствий. Из них особенно характерны землетрясения, оползни, сели, наводнения, засухи, град, заморозки и др. Град является одним из основных наблюдающихся гидрометеорологических природных бедствий в республике. 17 % территории подвержено градобитию.

Град – природная опасность для сельского хозяйства, встречающаяся чаще всего, и является по сути одним из явлений, которое причиняет самый большой ущерб в этой сфере, из-за чего сельское население каждый год имеет большие убытки. За последние десятилетия значительно возросла интенсивность и частота стихийных бедствий, а также размер человеческих и материальных потерь. И поэтому выявление закономерностей пространственно-временного распределения стихийных бедствий, оценка риска и рациональное управление ими, надежное прогнозирование, своевременное предупреждение, предотвращение и нейтрализация, развитие системы быстрого отклика, а также повышение уровня образованности и оповещения населения являются главными условиями безопасности людей и стабильного развития республики.

Учитывая сказанное, целью работы явилось выявить и проанализировать закономерности пространственно-временного распределения градобития на территории республики, обсудить некоторые вопросы управления сферы, оценить риск и уязвимость.

Материал и методика исследования

Для решения поставленных задач теоретической основой послужили соответствующие исследования, решения правительства Республики Армения, отчеты

соответствующих служб. Для работы основой стали результаты фактических наблюдений Армгосгидромета Министерства территориального управления и чрезвычайных ситуаций Республики Армения, а также данные Национальной статистической службы Армении.

Изучению града на территории республики посвящен ряд работ. В этих работах выявляются особенности орографии, способствующие возникновению грозовых и градовых процессов [1], аэросиноптические условия возникновения градовых явлений [2; 9; 10], особенности пространственно-временного распределения града [3–5; 7; 10], некоторые аэросиноптические условия развития грозовых и градовых процессов [10; 11], методы и результаты воздействия на градовые процессы.

В процессе исследования использованы общие научные, статистические, математические, аналитические, корреляционные и другие методы.

Ежегодно стихийные бедствия населению республики и социально-экономической системе причиняют в среднем материальный ущерб, достигающий более чем 20 млн долларов, а также бывают и человеческие жертвы. Поэтому прогнозирование и формирование системы предотвращения стихийных бедствий является одним из основных положений стратегии национальной безопасности Республики Армении. Однако стихийные бедствия трудно прогнозируемы. И, несмотря на предпринимаемые меры и выполняемые работы, на территории республики продолжают сохраняться различные очаги стихийных бедствий, которые представляют собой потенциальную опасность для населения, для объектов социально-экономической системы и создают необходимость осуществления первоочередных мероприятий [8].

Град – это льдинка радиусом 1–25 мм (в отдельных случаях даже более 15 см) со слоеной структурой. Он состоит из молочно-белого стержня и поочередных прозрачных и непрозрачных слоев льда. Масса града в отдельных случаях может превысить 300 гр. Как правило, возникновение и развитие града обусловлено сильными восходящими потоками воздуха, которые доходят до 30 м/с. Для образования града необходима большая водность облаков, по этой причине обычно град выпадает в теплое время года из кучево-дождевых облаков. Обычно град почти всегда сопровождается ливневым дождем, грозой, сильным ветром (15 м/с и более), а также бурей.

Результаты и обсуждение

В результате исследований выяснилось, что в республике явление градобития наблюдается с апреля по октябрь, а иногда и в остальные месяцы. Большое число дней с градом наблюдается в мае (районы с сухим континентальным климатом) и в июне (районы со сравнительно влажным климатом). В эти месяцы на территории почти всей республики каждый год преобладает град, в остальные месяцы – на высотах более 2000 м. Градовые явления в высокогорных районах наблюдаются более чаще, но с небольшой интенсивностью.

На территории республики град наблюдается во время фронтальных и внутримассовых градовых процессов. Внутримассовые градовые процессы происходят весной и в первой половине лета, когда развиты конвективные потоки и влажность высокая.

На рис. 1 даны неблагоприятные и опасные метеорологические явления, которые наблюдались на территории Республики Армения в 2014 г. по данным Армгосгидромета Министерства территориального управления и чрезвычайных ситуаций.

Диаметр выпавшего в Армении града колеблется в пределах 0,5–6,0 см [10]. Размер градинки имеет функциональную зависимость от скорости конвективных потоков: чем больше скорость конвективных потоков, тем больше диаметр градинки.

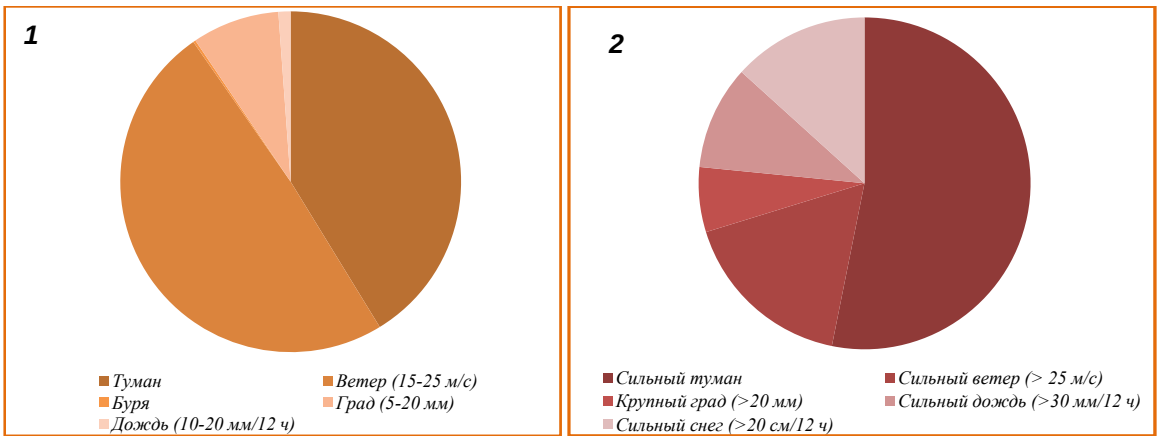


Рис. 1. Наблюдаемые в 2014 г. неблагоприятные (1) и опасные (2) метеорологические явления на территории Армении

Продолжительность выпадения града колеблется в пределах от нескольких секунд до 1 часа. На территории Армении град преимущественно выпадает от 3 до 30 мин. Как правило, град выпадает прослойкой с разной площадью. Часто прослойка имеет ширину 1–2 км (в некоторых случаях – до 10 км) и длину 10–20 км (в отдельных случаях – до 400 км).

Повторяемость града продолжительностью от нескольких минут до 15 минут на большинстве метеорологических станций Кавказа составляет 70–90 %. Обычно повторяемость града продолжительностью от 45 минут до часа и более не превышает 10 %, а в Армении – 5 % [7].

В республике число дней с градом распределено крайне неравномерно (табл. 1). Число дней с градом подчиняется законам вертикальной поясности (табл. 2). Параллельно с высотой местности возрастает также и число дней с градом. Однако в связи с орографическими особенностями места иногда наблюдается нарушение этой закономерности. Так, среднее годовое наибольшее значение числа дней с градом наблюдается на метеорологической станции Арагац высокогорный, 7,5 дней (максимальное значение было зарегистрировано в 1938 г. и составило 40 дней).

Таблица 1

Среднее годовое и максимальное число дней с градом (дни) за период 1935–2014 гг. на метеорологических станциях Армении

Наименование мет. станции	Высота, м	Число дней с градом (дни)		Наименование мет. станции	Высота, м	Число дней с градом (дни)	
		среднее	максимальное			среднее	максимальное
Ташир	1507	6,5	19	Шоржа	1914	2,0	6
Одзун	1123	2,4	11	Арагац в/г	3229	7,5	40
Степанаван	1397	3,1	12	Фонтан	1800	2,6	11
Амасия	1900	4,5	18	Талин	1582	2,4	13
Иджеван	732	2,6	10	Ереван	910	1,8	6
Ванадзор	1350	2,9	13	Армавир	860	1,4	7
Гюмри	1556	4,1	9	Мартуни	1945	2,6	9
Дилижан	1256	4,2	17	Арташат	829	1,4	5
Апаран	1891	3,3	13	Сисиан	1580	2,2	7
Севан ГМО	1917	4,0	13	Горис	1398	2,0	7
Раздан	1765	3,0	12	Мегри	627	0,8	3

Таблица 2

Число дней с градом (дни) по вертикальным поясам

Высота над уровнем моря, м	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Число дней в году с градом, дни	Бассейн Кура													
	1,8	*2,2*	*2,6*	*3,0*	*3,4*	*3,8*	*4,2*	*4,6*	*5,0*	*5,4*	*5,8*	*6,2*	–	–
	Бассейн Аракса													
	0,4	*0,8*	*1,2*	*1,6*	*2,0*	*2,4*	*2,8*	*3,2*	*3,6*	*4,0*	*4,4*	*4,8*	*5,2*	*5,6*

Небольшое значение среднего годового числа дней с градом наблюдается в низменных районах республики и на водной поверхности. В Араратской долине оно колеблется в пределах от 1–3 дней, на прибрежной терррритории озера Севан – 2–3 дня (отходя от озера, оно возрастает), в Мегри – 1–2 дня.

Выяснилось, что на территории республики в основном наблюдается тенденция уменьшения годового числа дней с градом (рис. 2). Аналогичная закономерность обнаружена также и в других исследованиях [5–6; 10].

Исследования показывают, что повторяемость градобития в одном и том же месте колеблется довольно-таки в больших пределах. Причем градобитие возрастает с ростом высоты местности и с ростом континентальности климата. Так, например, в низменной зоне республики в отдельные годы может наблюдаться 3–5, в средней зоне – 10–12, в верхней зоне – 20–25 дней и более с градом. С другой стороны, возможны и такие годы, когда град вообще не наблюдается. Это обстоятельство, несомненно, обусловлено характером общей циркуляции атмосферы в отдельные годы.

Как было отмечено, град причиняет огромный ущерб экономике. Однако, тенденция уменьшения годового числа дней с градом не означит сокращение причиненного ущерба. Размеры ущерба, причиненного градом, зависят от величины выпавших градинок, интенсивности, продолжительности, а также от фазы развития растений, и, конечно, от поверхности, подверженной градобитию. Часто даже один случай градобития за год может уничтожить почти весь урожай сельскохозяйственных культур. Но бывает и так, что два и более случая града причиняют незначительный ущерб. Хотя и высокогорные районы республики более градоопасны, в этих местах причиненный градом ущерб или вовсе отсутствует, или незначителен. Дело в том, что там почти не выращивают сельскохозяйственные культуры. В Армении населенные пункты в основном находятся до высоты 2000 м. В республике от градобития особенно сильно страдают плодовые сады и виноградники в период цветения, посевы зерновых и овоще-бахчевых культур. По этой причине противоградовые станции в первую очередь устанавливают в тех местах, где осуществляется интенсивное возделывание сельскохозяйственных культур.

В республике проводятся мероприятия по борьбе с градом и его предотвращению, а также прогнозированию. Однако эта задача пока окончательно не решена. Так, из-за отсутствия сети радиолокаторов качество прогнозирования града находится на низком уровне. С другой стороны, эффективность применяемых в республике противоградовых станций составляет 60–70 %. Следовательно, необходимо применять новые методы и технологии борьбы.

Отметим, что несмотря на то, что эффективность противоградовых станций не велика, они сравнительно доступны и целесообразны для наших природно-

климатических условий, для этого житель села не делает финансовых затрат. Просто единственной проблемой является нехватка противоградовых станций. На сегодняшний день в республике установлено столько станций, что защищено всего лишь 8 % сельхозугодий.

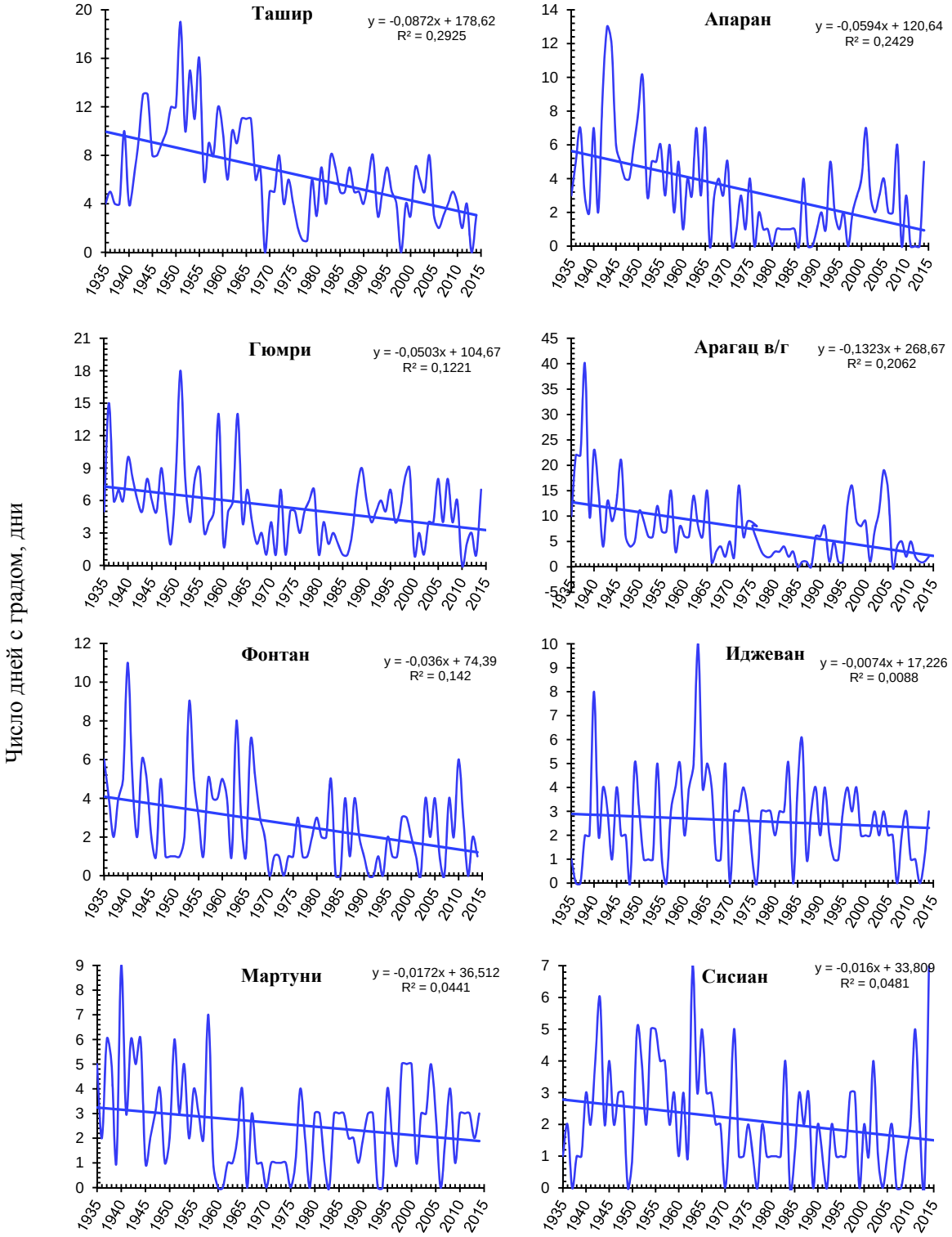


Рис. 2. Динамика изменения годового числа дней с градом за период 1935–2014 гг. по результатам наблюдений на нескольких метеорологических станциях Республики Армении

По расчетам Министерства территориального управления и чрезвычайных ситуаций для защиты сельскохозяйственных земель республики необходимо около 5165 противоградовых станций. Что касается использования противоградовых сетей с большей эффективностью, то надо сказать, что они требуют больших расходов, и наши природно-климатические условия не соответствуют им (сети очень быстро выйдут из строя). С другой стороны, сети предназначены для садов с низкими деревьями, а деревья наших садов в основном высокие и их невозможно защитить сетями.

Заключения и предложения

Таким образом, почти вся территория республики находится под опасностью градобития, но в высокогорных местностях причиненный градом ущерб или вовсе отсутствует, или незначителен.

Число дней с градом как в одной и той же, так и в близлежащих местностях колеблется довольно-таки в больших пределах. С высотой местности наблюдается рост числа дней с градом. На терррритории республики наблюдается в основном тенденция уменьшения числа дней с градом, что вовсе не означает уменьшение причиненного градом ущерба. Поэтому необходимо особое внимание обратить на интенсивность выпадения града и его продолжительность, а также на величину градинки.

Необходимо:

– создание и развитие системы прогнозирования и мониторинга града и других природных бедствий;

– формирование базы статистических данных об опасностях, угрожающих конкретному муниципалитету;

– подробное и систематизированное изучение и оценка частоты выпадения града разной интенсивности и величины, динамики изменения, а также причиненного ущерба;

– обработка кратковременных надежных методик прогнозирования града по возможности для небольших местностей;

– обработка и применение более эффективных способов и методов борьбы с градом;

– повышение эффективности борьбы с градом, еще большее фининсовое вложение;

– организация деятельности по предотвращению града и ликвидации его последствий;

– обработка новых методов по предупреждению об ожидаемом граде;

– повышение уровня знаний людей по вопросам эффективной деятельности системы управления рисков и защиты населения от природных бедствий;

– обработка и внедрение механизмов сельскохозяйственного страхования.

Список литературы

1. Гигинейшвили В.М. Градобития в Армении: Тр. ЗакНИГМИ. Ереван, 1963. Вып. 11.

2. Гигинейшвили В.М., Айвазян В.Е. Аэросиноптические условия возникновения градовых явлений в Армении: Тр. ЗакНИГМИ. Ереван, 1963. Вып. 12.

3. Кирищян Г.О. Град в Армянской ССР: сб. работ Ереванской гидрометеорологической обсерватории. Вып. 3. Ереван, 1971. С. 103–112.

4. Маргарян В.Г., Симонян Л.М. Особенности опасных гидрометеорологических явлений (как природных чрезвычайных ситуаций) в республике Армения и проблемы осуществления мероприятий по борьбе с ними // КАЗАНТИП-ЭКО-2014. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: сб. тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф. Харьков, июнь 2014 г.: в 2 т. Т. 1. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». Харьков: НТМТ, 2014. С. 210–218.

5. Маргарян В.Г., Симонян Л.М. Град: закономерности пространственно-временных изменений в Республике Армения: Ученые записки. № 1. Вып. А. Математические,

естественные, технические науки, экономика и география. ГГПИ-80. Гюмри: Изд-во Гюмрийский гос. пед. ин-т им. М. Налбандяна, 2014. С. 215–225. ISSN 1829-3808.

6. Нынешнее состояние климатической службы и перспективы развития в Армении. Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Армения. Государственная служба по гидрометеорологии и мониторингу. Ереван, 2013. 62 с.

7. Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе / под ред. Г.Г. Сванидзе, Я.А. Цуцкиридзе. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 264 с.

8. «О формировании системы прогнбедозирования и предотвращения стихийных бедствий в Республике Армения»: Проект решения правительства Республики Армения. Ереван, 2010. 20 с.

9. Суренян Г.Г. Аэросиноптические условия возникновения града в Араратской долине // Основные проблемы географии Южного Кавказа и прилегающих регионов: материалы конф., посвященной 70-летию географического факультета (ЕГУ). Ереван, 18–19 марта 2005 года. Ереван: Изд-во ЕГУ, 2005. С. 102–104. ISBN 5-8084-0624-2.

10.Суренян Г.Г. Синоптический анализ барических полей, формирующих погодно-климатические условия: дис. … канд. геогр. наук. Ереван, 2010. 145 с.

11.Чуваев А.П., Шварц В.Т. К характеристике развития градовых явлений над Арм. ССР // Тр. ГГО. 1964. Вып. 156.

УДК 528.952, 504

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В АРМЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. С. Мурадян, Ш. Г. Асмарян, А. К. Сагателян
Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА (ЦЭНИ)
e-mail: ecocentr@sci.am

Следующее исследование было направлено на изучение растительного покрова и биомассы в различных областях горных экосистем Армении в 2010, 2013 гг. вегетационного периода. Для комплексной оценки и изучения биомассы были использованы временные ряды индекса NDVI.

Ключевые слова: растительний покров, биомасс, период вегетации, морфологические элементы рельефа, NDVI, космические снимки.

Введение

Республика Армения – типично горная страна с крайне разнообразными экосистемами, формирование которых обусловлено разнообразием рельефа и составляющих его элементов. Сложному процессу исследования этих экосистем способствуют новейшие технологии и, в частности, данные дистанционного зондирования (ДДЗ). Как известно, все природные объекты по-разному излучают, поглощают и отражают электромагнитные волны с определенным спектральным составом и интенсивностью, и задачей дистанционного зондирования является прием и регистрация электромагнитных волн из космоса при помощи приемных устройств [2].

Среди ДДЗ важное место занимают так называемые многоспектральные космические изображения, которые активно применяются научными командами и учреждениями разных стран при проведении мониторинга окружающей среды и управлении ею [2–4; 6]. Многоспектральные космические изображения позволяют также оценить растительный покров горных ландшафтов и выполнить мониторинг в соответствии с полученными значениями нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что существует прямая связь между биомассой местности, высотой растительности, ее долей и значениями NDVI [1; 7; 9; 11].

Целью данного исследования было изучение пространственно-временных изменений растительного покрова различных районов Республики Армения, а объектом исследования стали горные экосистемы всей территории страны. Отдельно были исследованы также изменения растительного покрова экосистем горных склонов Арагацотнского, Гегаркуникского, Сюникского марзов (провинций), находящихся на разной высоте от 1850 до 3100 м и имеющих разные углы наклона и экспозицию. Выбор исследованных районов не случаен и обоснован тем, что в вышеуказанных марзах большую площадь занимают сельскохозяйственные земли и, в частности, природные кормовые угодья.

Материалы и методы

Для расчета значений NDVI был выбран ряд многоспектральных космических снимков US Landsat 28.5m/pixel (Landsat, TM, OLI) [14]. Исследованы космические снимки, полученные в начале августа, поскольку в этот период наблюдаются самые высокие содержания хлорофилла в растениях и наименьшие площади, занятые снежным покровом и покрытые облаками. Для получения морфологических элементов рельефа (абсолютная высота, уклон и микроэкспозиция склонов) мы использовали

трехмерную цифровую модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 30 м, полученную в результате обработки космических стереоскопических снимков.

До получения NDVI была выполнена предварительная обработка, т. е. ректификация, геометрическая, топографическая и атмосферная коррекция космических снимков [5]. Как уже было отмечено ранее, из многочисленных вегетационных индексов для данного исследования нами был выбран и использован NDVI [1; 4; 10; 13].

NDVI рассчитывается с помощью следующей формулы [12]:

$$NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED),$$

где NIR – это величина яркости, зарегистрированная в ближней инфракрасной, а RED – величина, зарегистрированная в красной области спектра.

Значения NDVI находятся в интервале –1…1, т. е. они >–1 и <1. Чем ближе значение к 1, тем богаче растительный покров местности и больше биомасса; чем ближе к–1, тем меньше доля растительности и биомасса и преобладают лишенные растительности территории.

Анализ ЦМР территории Республики Армения был выполнен в программной среде ArcGIS, в автоматном режиме, применяя программные приложения 3D Analyst и Spatial Analyst. В результате были получены тематические слои, характеризующие морфологические элементы рельефа гипсометрических поясов территории страны, а при цифровом дешифровании космических снимков был использован программный пакет ENVI.

Результаты исследования

Карта NDVI (август 2010 г.), составленная для всей территории Армении (рис. 1), была сопоставлена с ЦМР. В итоге было рассчитано распределение усредненных значений NDVI территории Армении по соответствующей экспозиции и наклону.

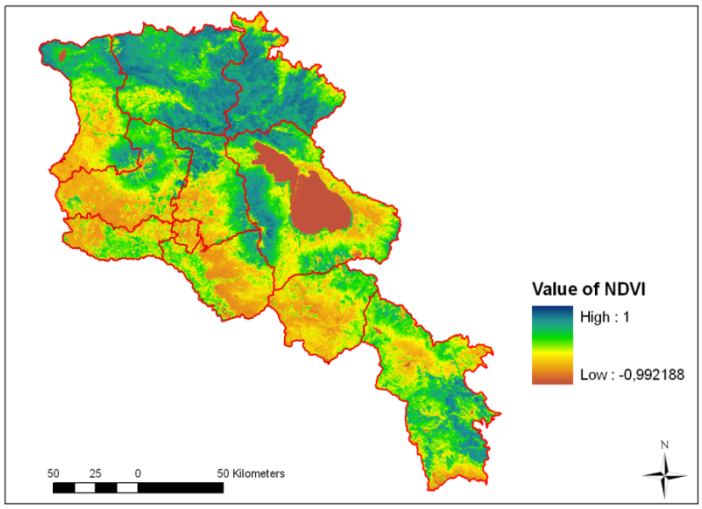


Рис. 1. Карта NDVI территории Армении

Как показали результаты, на территориях с наклоном в $0–4^0$ каждое значение NDVI в интервале 0,2–1, 0,25–0,32 характеризует площадь, равную соответственно 3,0–9,0, 87–92 тыс. га, а высоких значений – от 0,7 до 1 – сравнительно меньше. Примечательна площадь территорий, имеющих отрицательное и очень низкое значение (–0,3–0,002), – от 4,5 до14,5 тыс. га, что указывает на наличие антропогенных и водных объектов на территориях с наклоном $0–4^0$. Территории с наклоном 10–17, 17–25 и 25–

67^0 со значением NDVI, равным 0,2–1, в среднем занимают соответственно 1,7–4,4, 1,0–3,3, и 0,7–2,1 тыс. га. Последние свидетельствуют о том, что с увеличением угла наклона уменьшается площадь территорий с высокой и средней биомассой, однако наибольшую площадь занимают территории с очень высокой биомассой 0,7–1 NDVI.

Распределение значений NDVI по экспозициям рельефа позволяет выделить две основные группы склонов: 1) северные, северо-восточные, северо-западные и восточные и 2) южные, юго-западные, юго-восточные и западные. Для каждой группы характерно своеобразное распределение растительного покрова.

Таким образом, своеобразие распределения биомассы горных склонов первой группы заключается в том, что территории с высокой биомассой – значение NDVI 0,6–1 – занимают наибольшую площадь, равную 1,7–2,5 тыс. га, тогда как наибольшая площадь горных склонов второй группы (1,6–17 тыс. га) приходится на территории с низкой биомассой со значением 0,23–0,33 (около 2,0–3,5 тыс. га).

В 2013 г. с помощью многоспектрального космического снимка Landsat OLI были получены также карты NDVI Гегаркуникского и Сюникского марзов. На основе этих карт было изучено изменение NDVI, рассчитанных для разных экспозиций горных склонов в период вегетации (с апреля по ноябрь). Космические снимки за все месяцы были предварительно введены в программную среду ENVI, затем, используя цифровую карту экспозиции склонов, для дальнейших исследований были выбраны соответствующие территории и определены значения NDVI для распространенных на этих территориях экосистем (рис. 2).

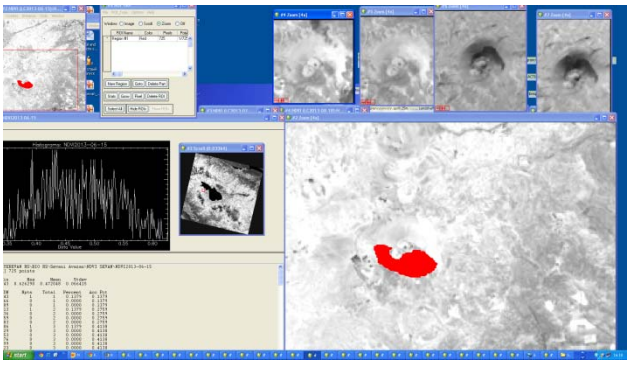


Рис. 2. Определение значений NDVI в программной среде ENVI с помощью сделанных в разные месяцы космических снимков

Для получения картины временных изменений значений NDVI был проведен статистический анализ полученных данных. Сначала рассмотрим изменения NDVI горных склонов Гегамского хребта с северной и южной экспозицией, расположенных на высоте 2300–2400 м (рис. 3, 4).

Таким образом, как показывают результаты анализа, с апреля по май значения NDVI, расположенных на высоте 2300–2400 м склонов Гегамского хребта с северной экпозицией, колеблются в пределах 0–0,2, а в июне и июле резко повышаются, достигая 0,5–0,67. Затем в августе начинается снижение значений NDVI, обусловленное повышением температуры и уменьшением атмосферных осадков; снижение вплоть до 0,005–1,5 продолжается также и в октябре–ноябре. Это говорит о том, что наименьшая биомасса на расположенных на высоте 2300–2400 м склонах с северной экспозицией наблюдается в последние месяцы периода вегетации.

В отличие от вышеуказанных северных склонов наименьшее значение NDVI на южных склонах того же района в апреле приблизительно равно 0,1, а наибольшее достигает 0,27, затем вновь повышается, достигая 0,67 в июле. Однако наименьшие

значения 0,3 на южных склонах в апреле ниже, чем наименьшие значения 0,47 на северных в тот же месяц. Это обусловлено условиями относительно сухого климата южного склона. С июля значения NDVI начинают снижаться, а в октябре–ноябре достигают 0,06–0,08. Если провести сравнение с северными склонами того же района, то можно увидеть, что там – в отличие от южных склонов – нет отрицательных значений NDVI. Это означает, что зарегистрированные значения для южного склона и в апреле, и в ноябре выше, и следовательно, биомасса относительно больше. Для сравнения были проведены наблюдения северных и южных горных склонов Гегамского хребта на высоте 2750–2800 м (рис. 5).

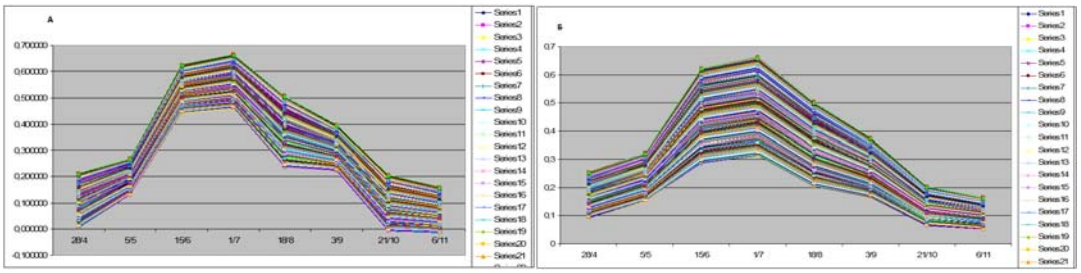


Рис. 3. Изменение значений NDVI горных склонов с северной(А) и южной(Б) экспозицией на высоте 2300–2400 м в период вегетации.

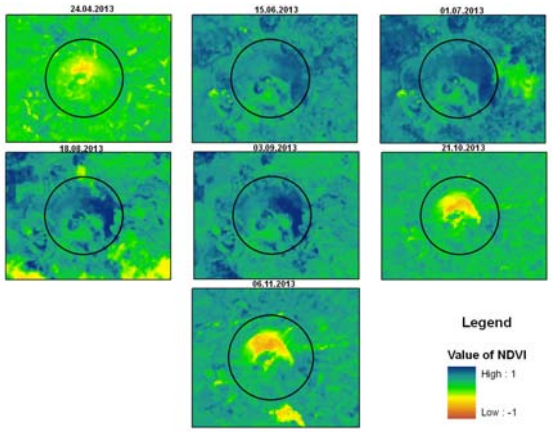


Рис. 4. Карты NDVI горных склонов с северной и южной экспозицией на высоте 2300–2400 м в период вегетации

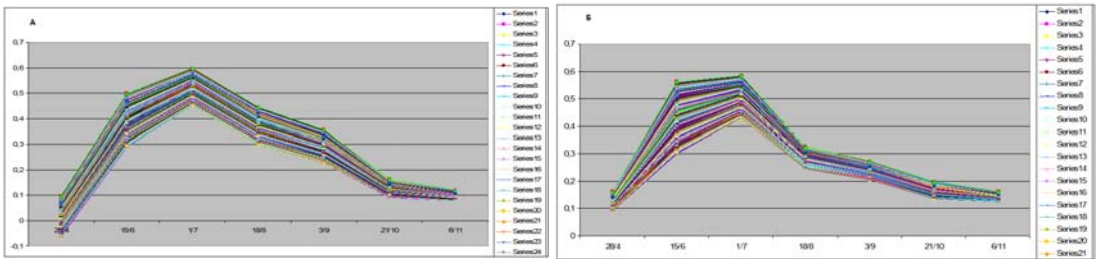


Рис. 5. Изменение значений NDVI для горных склонов с северной (А) и южной (Б) экспозицией на высоте 2750–2800 м в период вегетации

Как показывают графики, наименьшие значения NDVI для северных склонов на высоте 2750–2800 м в отличие от подобных склонов на высоте 2300–2400 м, равные – 0,5–0,1, наблюдаются в апреле. Наибольшие значения, как и для предыдущего пояса, наблюдаются в июле, – до 0,6, но, как видно из графика, наибольшее значение на

высоте 2750–2800 м меньше, чем на высоте 2300–2400 м. В августе значения также начинают снижаться от 0,3–4,3 до 0,19–0,16 (в октябре–ноябре).

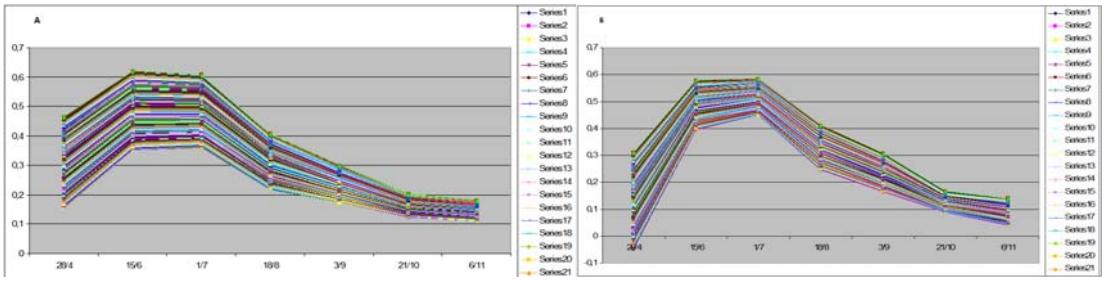


Рис. 6. Изменение значений NDVI горных склонов с юго-западной (А) и северо-западной (Б) ориентацией на высоте 2100–2150 м в период вегетации

Превышения значений NDVI южных склонов того же района по сравнению с северными наблюдаются только в октябре-ноябре, оставаясь низкими в остальные месяцы. Сравнение с южными склонами на высоте 2300–2400 м показывает, что значения NDVI для них сравнительно высоки во все месяцы, исключая октябрь и ноябрь. Анализ значений NDVI для юго-западных и северо-западных склонов по разным месяцам был выполнен также для местности Акнадашта на высоте 2100–2150 м (рис. 6). Значения NDVI за август, сентябрь и октябрь почти идентичны, разница наблюдается только в апреле, июне и июле. Наибольшие значения для двух склонов наблюдаются в июне-июле, однако в отличие от юго-западного склона они ниже для северо-западного, составляя 0,57–0,58. Тем не менее в годовом разрезе биомасса северо-западного склона превышает таковую юго-западного. И наконец, обобщая анализ усредненных значений NDVI для представленных выше склонов с северной и южной экспозицией, находящихся на разных высотах, можно заключить, что в отличие от северных склонов значения для южных относительно высоки в апреле, октябре и ноябре, в остальные же месяцы наибольшие значения приходятся на северные склоны .

Заключение

На основе полученных результатов были сделаны следующие заключения.

1. Сопоставление карты NDVI для всей территории Республики Армения с цифровой моделью рельефа показывает, что с увеличением уклона поверхности уменьшается площадь со средним и густым растительным покровом.

2. В соответствии с распределением значений NDVI можно обособить две основные группы склонов: 1) северные, северо-восточные, северо-западные и восточные и 2) южные, юго-восточные, юго-западные и восточные. Каждой группе присуще своеобразное распределение растительности.

3. Зарегистрированные усредненные значения NDVI для южных в отличие от северных склонов сравнительно выше в апреле, октябре и ноябре.

4. Проведенные с применением NDVI исследования находящихся на высоте 1850–3150 м склонов с разной экспозицией показали, что в период вегетации наибольшая биомасса наблюдается на северных (2300–2400 м) и южных (2000–2100 м) склонах.

5. Все указанные выше результаты могут в дальнейшем стать основой для создания системы дистанционного мониторинга.

Завершая, необходимо отметить, что для повышения объективности основных результатов, их проверки и уточнения нами предусмотрено также выполнение полевых исследований и замеров биомассы.

Список литературы

1. Технология комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли / Н.А. Калинин, С.В. Пьянков, Е.М. Свиязов, А.А. Смирнова // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2010. Вып. 4. Ижевск. С. 3–10.

2. Кронберг П. Дистанционное изучение земли. М.: Мир, 1988. 352 с.

3. Мищенко Н.В., Трифонова Т.А., Карева М.М. Оценка состояния растительности и почв на основе данных дистанционного зондирования // Вестн. Москв. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2008. № 3. С. 14–19.

4. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В., Краснощеков А.Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: Академический Проект, 2005. 348 с.

5. Bernstein L.S., Adler-Golden S.M., Sundberg R.L., Levine R.Y., Perkins T.Y., Berk A., et al., Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) Algorithm for VNIR-SWIR Multi- and Hyperspectral Imagery Vol. 5806, in: Proceeding of SPIE (SPIE Digital Library), Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery XI, 2005.

6. Biard, F., D. Lepoutre: On Line Vegetation Condition Monitoring in Europe: Agri-Quest®. A Tool That Helps Users Build Information and Value from Remote Sensing. GEOSYS. S.A. Toulouse, France.

7. Foster A.J., Kakani V.G., Ge J., and Mosali J. 2012. Predicting biomass yield in bioenergy crop production system using canopy NDVI. 2012 National Conference, Science for BiomassFeedstock Production and Utilization, Proceedings of the 2012.

8. Sun Grant National Conference October 2-5, 2012, New Orleans, LA, USA. Vol. 2. Pp. 261–267.

9. Freeman K.W., K.L. Martin, R.K. Teal, W.R. Raun, K. Girma, D.B. Arnall, R.W. Mullen. 2007. By-Plant Prediction of Corn Forage Biomass and Nitrogen Uptake at Various Growth Stages Using Remote Sensing and Plant Height [Electronic Resource] // Agronomy Journal. 99:530-536. DOI: http://dx.doi.org/10.2134/agronj2006.0135.

10.Giannico C. Remote sensing of vegetation in the Calabrian region // Acta Astronautica. 2007. № 60. Pp.119–131. doi:10.1016/j.actaastro.2006.07.003.

11.Olson K.C., R.C. Cochran. 1998. Radiometry for Predicting Tallgrass Prairie Biomass Using Regression and Neural Models // Journal of Range Management 51:186-192.

12.Rause J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings 3rd. ERTS symposium. 1973. № 1. Pp. 48–62.

13.Restmanesh F., Moore F. Monitoring air pollution effect on the deterioration of vegetation cover, using statistical methods and TM and ETM+ Imageries, sarcheshmen copper complex, Central Iran // 6th European congress on regional geoscientific cartography and information systems. V. 1. 2008, Munich. Pp. 317–320.

14.http://eros.usgs.gov/

УДК 528.88

ВЫЯВЛЕНИЕ ЭРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ КАРСТОВЫХ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА

Е. В. Полякова[1,2], М. Ю. Гофаров[1,2]
[1]ФГБУН Институт экологических проблем Севера УрО РАН
[2]Центр космического мониторинга Арктики САФУ им. М. В. Ломоносова
e-mail: lenpo26@yandex.ru

Одним из важнейших факторов развития природных эрозионных процессов является рельеф территории. Геоморфометрические параметры рельефа определяют возникновение поверхностного стока. Развитие карстового процесса повышает степень расчлененности рельефа. Авторами предлагается методика определения территорий с различной вероятностью проявления эрозионных процессов на основе цифрового моделирования рельефа для Пинежского заповедника Архангельской области.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, эрозионные процессы.

Введение

Эрозионные процессы в естественных северотаежных ландшафтах Русской равнины протекают достаточно медленно и находят слабое отражение в формах рельефа. Наличие древесно-кустарниковой и травянистой растительности снижают темпы эрозии. Однако ситуация коренным образом изменяется при нарушении целостности растительного покрова, что неизбежно при современных методах хозяйственного освоения территорий. Одним из важнейших факторов развития природных эрозионных процессов является рельеф территории, который во многом определяет локальные особенности распределения воды и солнечной радиации. Геоморфометрические параметры рельефа, такие как крутизна и экспозиция склонов, определяют возникновение поверхностного стока. Развитие карстового процесса повышает степень расчлененности рельефа. Для изучения проявления эрозионных процессов в карстовых ландшафтах северной тайги был выбран тестовый участок с максимальным проявлением открытого карста – Пинежский заповедник (Архангельская область).

Цель исследований: оценить вероятность проявления эрозионных процессов в карстовых ландшафтах северной тайги (на примере территории Пинежского заповедника) на основе цифрового моделирования рельефа и производных геоморфометрических параметров.

Материалы и методика работ

Для оценки вероятности проявления эрозионных процессов в карстовых ландшафтах северной тайги была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) на территорию тестового участка (Пинежский заповедник). Для построения ЦМР использовались данные ASTER GDEM 2 (NASA, METI) и электронные топографические карты масштаба 1:50000 открытого доступа ГИС Панорама. Построение производилось в программной среде ESRI ArcGIS 10 с применением модуля Topo to Raster, который базируется на программе ANUDEM, разработанной в The Australian National University [1]. На основе полученной ЦМР рассчитывались 3 категории морфометрических параметров: геометрические, гидрологические и параметры вертикальной дифференциации природной среды. К геометрическим параметрам относятся уклон и экспозиция склонов (Slope and Aspect), плановая, профильная и общая кривизны поверхности (Planned, Profail and General Curvature). Среди гидрологических параметров рассчитывался индекс баланса геомасс (Mass

Balance Index). Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index) характеризует вертикальную дифференциацию среды. Геометрические параметры описывают морфологические особенности территории, определяют скорость и интенсивность потоков вещества и энергии, динамику склоновых процессов. Гидрологические параметры используются для оценки поверхностного стока и перемещения обломочного материала. Уклон, экспозиция склонов, виды кривизны поверхности построены в ESRI ArcGIS 10 с использованием пакетов инструментов Surface, индекс расчлененности рельефа и индекс баланса геомасс – в открытой SAGA GIS с использованием инструментов Terrain Analysis.

Результаты работ и обсуждения

Территория заповедника представляет собой платообразную многоярусную поверхность в виде расчлененных эрозией останцовых денудационных межводораздельных массивов. В центральной и юго-восточной части рельеф мелко- и средне холмистый, участками плоско-волнистый. На юго-западе территории рельеф плоско-волнистый, участками плоский и холмистый. В северо-восточной части – холмисто-увалистый [2]. Согласно ЦМР средние высоты на территории заповедника составляют 40–50 м. Максимальные высоты до 163 м отмечаются в северо-восточной части заповедника, на правобережье реки Сотка.

На основе ЦМР рассчитаны геоморфометрические параметры – уклон и экспозиция склонов, плановая, профильная и общая кривизны поверхности.

Уклон поверхности является фундаментальным геоморфометрическим показателем, который закономерно связан с проявлением эрозионных процессов. Интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. Согласно классификации Н.И. Николаева все склоны делят на: очень крутые (> 35°), крутые (15–35°), склоны средней крутизны (8–15°), пологие (4–8°), очень пологие (2–4°). При углах наклона менее 2° поверхности не относятся к склонам [3]. На таких участках процесс эрозии и сноса отсутствуют. Здесь происходит процесс аккумуляции, а местами даже заболачивание. Согласно табл. 1 практически вся территория Пинежского заповедника имеет выровненную поверхность, т. е. угол наклона менее 2°. Большинство склонов в пределах Пинежского заповедника характеризуются как очень пологие и пологие с уклоном от 2 до 8°. При таких уклонах начинает проявляться линейная эрозия в виде образования оврагов и борозд. На склонах средней крутизны (от 8 до 15°) в северной и южной частях заповедника интенсивность эрозии возрастает. Происходит плоскостной смыв почвенного покрова. На крутых склонах мелких рек и логов (от 15 до 35°) наблюдаются гравитационные процессы и выветривание. Это приводит к сплошному разрушению и сносу почвенного покрова. На склонах очень крутых (свыше 35°) сильно развиты гравитационные процессы (каменные потоки, оползни, обвалы), выветривание и денудация. Такой уклон имеют берега реки Сотка. Здесь широко распространены выходы коренных (гипсы и ангидриты) пород. Растительность отсутствует. Создаются благоприятные условия для сноса твердого обломочного материала.

Таблица 1

Проявление эрозионных процессов на склонах различного уклона

Уклон поверхности (Slope)	Количество, %	Эрозионные процессы
менее 2°	90,35	Отсутствуют
2-4°	7,51	Образование мелких оврагов и борозд
4-8°	0,9	Образование более крупных оврагов и борозд
8-15°	0,61	Плоскостной смыв почвенного покрова
15-35°	0,62	Гравитационные процессы и выветривание
35° и более	0,01	Гравитационные процессы, выветривание и денудация

Экспозиция склонов также влияет на вероятность проявления эрозионных процессов. Она характеризует основное направление линий тока и ориентацию участка по отношению к потоку солнечных лучей. Неравномерное распределение солнечной энергии на склонах различной экспозиции приводит к микроклиматическим различиям. В северном полушарии склоны южной экспозиции прогреваются лучше и являются суше, чем склоны северной экспозиции. Западные склоны несколько теплее и суше, чем восточные, поскольку освещаются во второй половине дня, когда поверхность уже прогрета. Согласно табл. 2 на территории Пинежского заповедника наиболее выражены склоны южной, юго-западной и западной экспозиции. Это связано с общим уклоном Беломорско-Кулойского плато на юго-юго-запад. Река Сотка пересекает заповедник с запада на восток. Правый берег реки обращен к северу, левый – к югу.

Таблица 2

Экспозиция склонов Пинежского заповедника

Экспозиция (румб, град.) (Aspect)	Количество, %
Плоские поверхности (уклон 0.1°)	0,10
Север (337.5-22.5°)	8,01
Северо-Восток (22.5-67.5°)	11,65
Восток (67.5-112.5°)	8,73
Юго-Восток (112.5-157.5°)	12,95
Юг (157.5-202.5°)	16,53
Юго-Запад (202.5-247.5°)	14,38
Запад (247.5-292.5°)	17,30
Северо-Запад (292.5-337.5°)	10,35

Система морфометрических кривизн описывает форму поверхности. Горизонтальная (плановая) кривизна показывает зоны конвергенции, где происходит накопление материала, и зоны дивергенции, где происходит снос материала. Зависит от экспозиции склонов. Вертикальная (профильная) кривизна характеризует скорости стока и процессов транспорта седиментов. Зависит от угла наклона поверхности. Для обобщения информации о кривизне поверхности в разных направлениях используется синтезирующий показатель – общая кривизна, помогает лучше понять закономерности перераспределения материала по поверхности.

Важным показателем для прогнозирования опасных склоновых процессов (оползни, обвалы, осыпи) является индекс баланса геомасс (Mass Balance Index). Он раскрывает топографические предпосылки к разрушению и отложению грунтов. Положительные значения показывают участки разрушения грунтов, отрицательные – отложения. Данный показатель позволяет выявить участки с высокой степенью вероятности развития осыпных склоновых процессов [4]. Для территории Пинежского заповедника максимальные значения данного показателя отмечаются по берегам р. Сотка.

Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index) служит для объективной количественной оценки разнородности рельефа. Применительно к цифровой модели рельефа индекс расчлененности равняется среднему значению перепада высот между конкретной ячейкой и ее ближайшими восемью соседними [5]. Он показывает относительную локальную вертикальную расчлененность рельефа в пределах Пинежского заповедника. Максимальная расчлененность рельефа соответствует берегам реки Сотка, карстовым логам и провалам.

На рисунке приведена карта вероятности проявления эрозионных процессов на территории тестового участка. Карта построена с учетом всех геоморфометрических

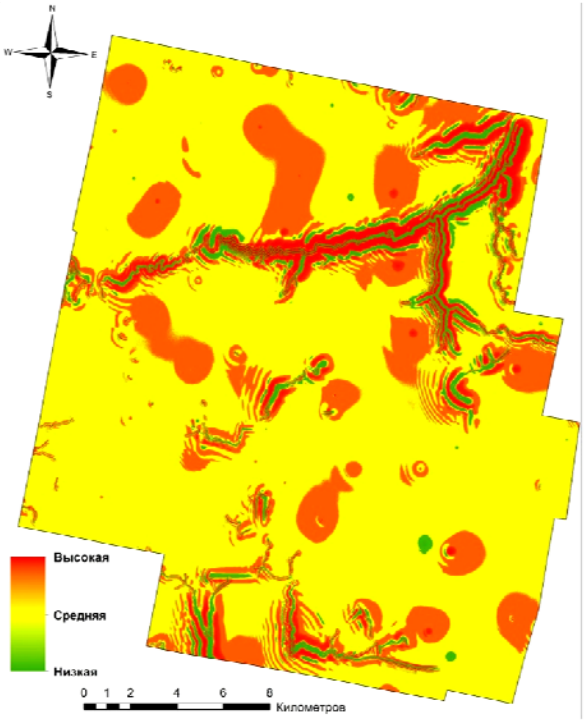


Рис. Различная вероятность проявлений эрозионных процессов на территории Пинежского заповедника

параметров, описанных выше. Из карты следует, что наибольшая вероятность проявления эрозионных процессов отмечается по берегам реки Сотка и ее притоков. Здесь наблюдается подмывание берегов и, как следствие, осыпи и обвалы гипсовых обнажений. Вероятность проявления эрозии существует по бортам карстовых логов и оврагов. Для них характерны процессы выветривания карстовых обнажений, оползни и снос почвенного материала. Эрозионные процессы возможны и на равнинных участках. Проявляются в виде понижений и карстовых воронок.

Выводы

Выявление, карто-графирование и изучение динамики развития эрозионных процессов в карстовых ландшафтах в настоящее время возможно не только традиционными карстологическими методами на основе натурных наблюдений, но и с использованием современных методик обработки космической информации.

Геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа является эффективным методом при оценке вклада рельефа в функционирование геосистем. Производные показатели ЦМР описывают градиент поверхности (его величину и направление) и фиксируют меру изменения этого градиента. Уклон поверхности характеризует относительную интенсивность сноса материала, а экспозиция – его направление. Вертикальная кривизна определяет закономерности эрозии и аккумуляции, горизонтальная – пространственную неоднородность стока. Одновременный учет обеих кривизн помогает лучше понять закономерности перераспределения материала по поверхности.

В карстовых северотаежных ландшафтах наиболее выраженным является линейный тип эрозии, представленный врезанными долинами рек, карстовыми логами, ветвящимися, относительно неглубокими оврагами, балками. На развитие плоскостной эрозии влияние оказывают крутизна и экспозиция склонов. Проявляется плоскостной тип эрозии в виде локальных понижений, просадок, карстовых воронок и провалов над долинами подземных рек.

Список литературы

1. ANU Fenner School of Environment and Society and Geoscience Australia, 2008. GEODATA 9 Second DEM and D8 Digital Elevation Model and Flow Direction Grid, User Guide. Geoscience Australia, 43 p. http://www.ga.gov.au/image_cache/GA11644.pdf

2. Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (северная тайга ЕТР, Архангельская область). Биоразнообразие и георазнообразие в карстовых областях / отв. ред. Пучнина Л.В. и др. Архангельск: СОЛТИ, 2000. 267 с.

3. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Наука, 2006. 416 с.

4. Глотов А.А. Использование методов геоинформационного моделирования ландшафта для задач муниципального управления // Геоматика. 2014. № 2. С. 38–41.

5. Riley, S.J., De Gloria, S.D., Elliot, R. (1999): A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity // Intermountain Journal of Science. Vol. 5, No. 1–4. Pp. 23–27.

УДК 528.87, 528.88

МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ТЕРРИТОРИИ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРА С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. А. Пуртов, Н. С. Ремень, Е. М. Гуземина
АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования
им. В. И. Шпильмана»
e-mail: ecolog@crru.ru
e-mail: geoportal@crru.ru
e-mail: ecolog@crru.ru

DISTURBED LANDS MONITORING USING EARTH REMOTE SENSING DATA ON THE TERRITORY OF THE KHANTY-MANSIYSK AUTONOMOUS OKRUG – YUGRA

V. A. Purtov, N. S. Remen, E. M. Guzemina
Autonomous Institution “V.I. Shpilman Research and Analytical Centre
for the Rational Use of the Subsoil”
e-mail: ecolog@crru.ru
e-mail: geoportal@crru.ru
e-mail: ecolog@crru.ru

В настоящее время в условиях колоссального техногенного воздействия на окружающую природную среду на территории Западной Сибири мониторинг с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) должен быть основой для предотвращения негативных последствий производственной и хозяйственной деятельности человека, так как система мониторинга (слежения) накапливает, систематизирует и анализирует информацию.

Ключевые слова: мониторинг, нарушенные земли, данные дистанционного зондирования земли, геопортал, векторизация, дешифрирование.

С 2007 г. сотрудники АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», используя накопленный практический опыт обработки космических снимков и многолетние результаты дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ведут мониторинг земель, нарушенных вследствие деятельности человека, с применением геоинформационных технологий.

Согласно утвержденному государственному заданию для мониторинговых работ выбраны следующие категории земель, утративших свою хозяйственную ценность или являющихся источником отрицательного воздействия на окружающую среду в связи с нарушением почвенного покрова, гидрологического режима и образования техногенного рельефа в результате производственной деятельности:

- ✓ нефтезагрязненные земли;
- ✓ нарушенные земли в местах добычи общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) и в местах сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ);
- ✓ участки лесовосстановления и рубки в границах территориальных лесничеств и за их пределами;
- ✓ территории непроизводственной и промышленной инфраструктуры.

Мониторинг осуществляется с использованием космических снимков различного пространственного разрешения на местности со спутников: LANDSAT-5,7,8 (15 м, 30 м), ALOS PRISM (2,5 м) и AVNIR-2 (10 м), ASTER (15 м), FORMOSAT (8 м), QUICKBIRD (0,6 м), GEOEYE-1 (1 м), IKONOS (0,9 м), RAPIDEYE (5 м).

Для обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования используются программные комплексы ENVI и ERDAS IMAGINE. Хранение, анализ и визуализация космической информации производятся в программном комплексе MapInfo Professional.

Результаты мониторинга

Космический мониторинг нефтезагрязненных земель

Общее количество нефтезагрязненных участков на территории округа, по результатам дешифрирования космических снимков, составляет 7475 полигонов с общей площадью 7915,8 га. Лидирующие позиции по площадным и количественным показателям из года в год занимают Нижневартовский, Нефтеюганский и Сургутский районы автономного округа. Соответственно их доли в общем объёме площади нарушенных земель составили – 44–46 %, 27–26 % и 22–20 %. Данные показатели обусловлены наличием на территории районов основных нефтедобывающих участков недр с тремя крупными зонами нефтяных загрязнений автономного округа. Центры зон расположены в пределах Самотлорско-Вахской (Нижневартовский район), Мамонтовско-Балыкско-Петелинской (Нефтеюганский район) и Лянторско-Фёдоровской групп участков, отображены на рис. 1.

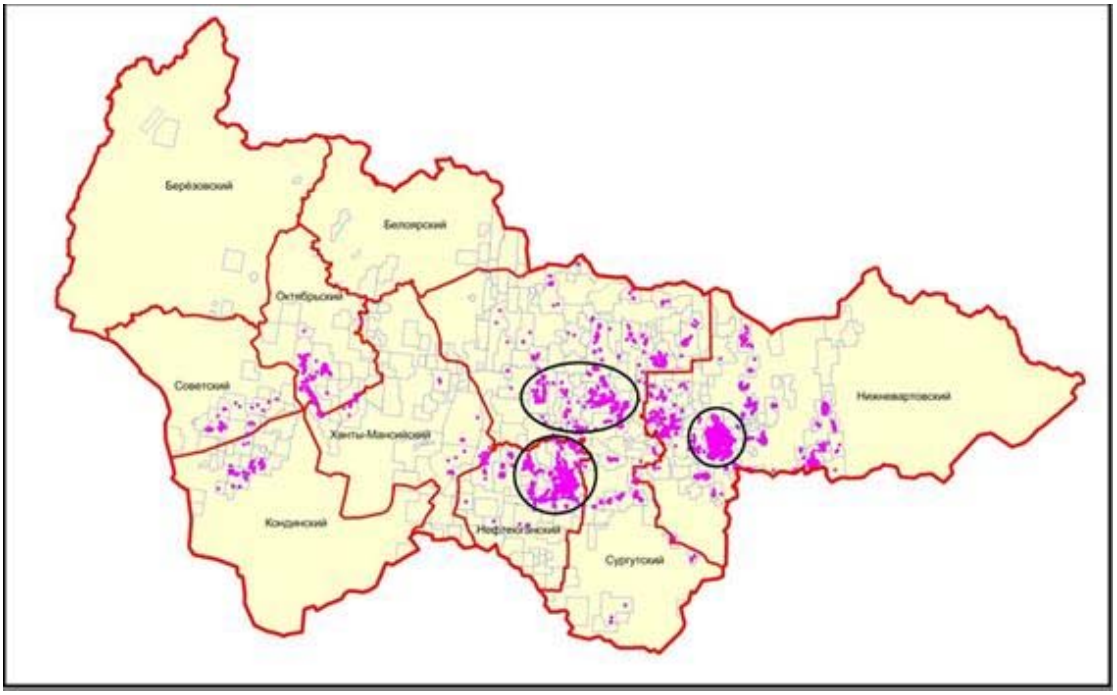


Рис. 1. Основные зоны нефтяных загрязнений на территории ХМАО-Югры

Новые космические снимки с высоким пространственным разрешением позволяют доработать, уточнить и детализировать уже имеющуюся информацию.

Проведенная работа с предприятиями-недропользователями по уточнению количества и площадей нефтезагрязненных земель показывает совпадения данных до 87 % и выявление ранее не учтённых участков.

Космический мониторинг нарушенных земель при добыче общераспространённых полезных ископаемых (ОПИ)

За 2014 г. с помощью космической съемки зафиксировано 95 мест нелицензированной добычи полезных ископаемых. На рис. 2 отображено место нелицензированной добычи.

По материалам дешифрирования выявлены объекты добычи ОПИ в количестве 12 полигонов с нарушениями условий лицензий (уведомлений), а именно, увеличены

площади сухоройных разработок грунта или акваторий для ведения гидромеханизированных работ, что и отображено на рис. 3.

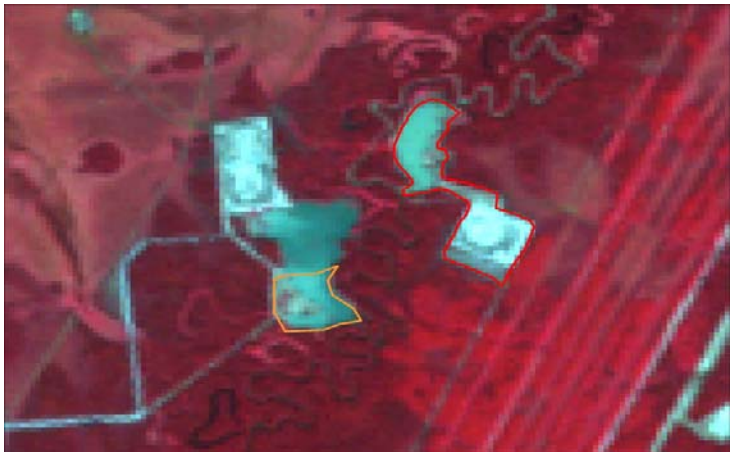


Рис. 2. Участок недр по добыче ОПИ (выделен оранжевым цветом) и нелицензированный участок разработок (выделен красным цветом)

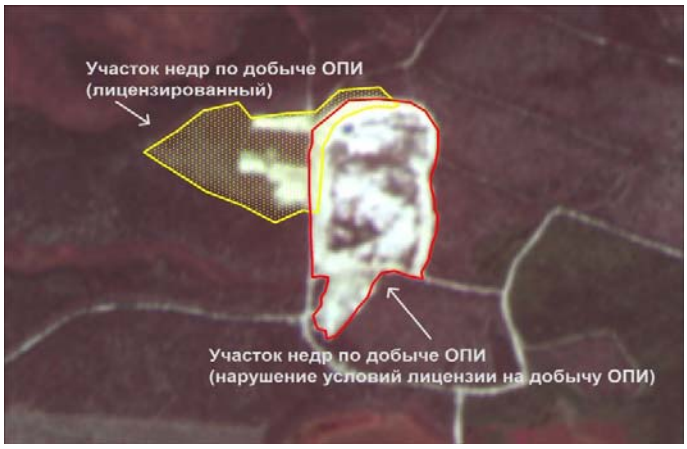


Рис. 3. Несоблюдение условий лицензии (увеличение площади разработки фиксировано красным цветом)

Объектами космического мониторинга в ходе разведки и добычи грунтов являются не только водоёмы с изменённым гидрологическим режимом, из которых происходит намыв песка, но и территории с нарушениями почвенно-растительного покрова, где грунт складируется, используемые под площадки для стоянки техники и механизмов, отстойники, подъездные дороги к карьеру и т. п.

Всего дешифрировано 825 полигонов нарушенных земель в местах добычи ОПИ общей площадью 10947,7 га, расположенных на лицензионных участках и вне их границ.

Космический мониторинг факельных установок

По данным ДЗЗ на 01.12.2014 г. на территории ХМАО – Югры дешифрированы 701 факельные установки с разной стадией функционирования:

– 256 ФУ с постоянным горением;

– 106 ФУ с периодическим горением;

– на 232 ФУ горение отсутствует;

– на 107 ФУ нет возможности определить состояние работы по метеоусловиям (высокий процент облачности космосъёмки).

В результате дешифрирования нарушенных земель в местах сжигания ПНГ на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры выделено 528 полигонов

общей площадью 665 гектаров. Наибольшее количество нарушенных участков выявлено в пределах Сургутского и Нижневартовского районов.

Заключение

Мониторинговые работы ведутся с целью формирования баз данных, на основе которых формируются аналитические отчеты, даются практические рекомендации по предупреждению экологических проблем, разрабатываются технико-экономические обоснования развития региона, в том числе развитие объектов добычи и транспорта нефти и газа, контролируется строительство новых объектов производственной инфраструктуры, издаются тематические карты, атласы.

Данные дистанционного зондирования Земли и их обработка являются неотъемлемой частью информационного и научно-аналитического сопровождения рационального недропользования и природопользования Югры.

Результаты мониторинга нарушенных земель в области природопользования и недропользования, полученные с помощью методов дешифрирования данных ДЗЗ, и архивные космические снимки различного пространственного разрешения на территорию округа интегрируются в **геоинформационный портал ЮГРА.** Рабочее окно геопортала ЮГРА отображено на рис. 4. Пространственная информация сервиса представлена в виде тематических карт. В каждой карте присутствуют как тематические слои, характеризующие конкретное направление, так и повторяющиеся, базовые или логически дополняющие.

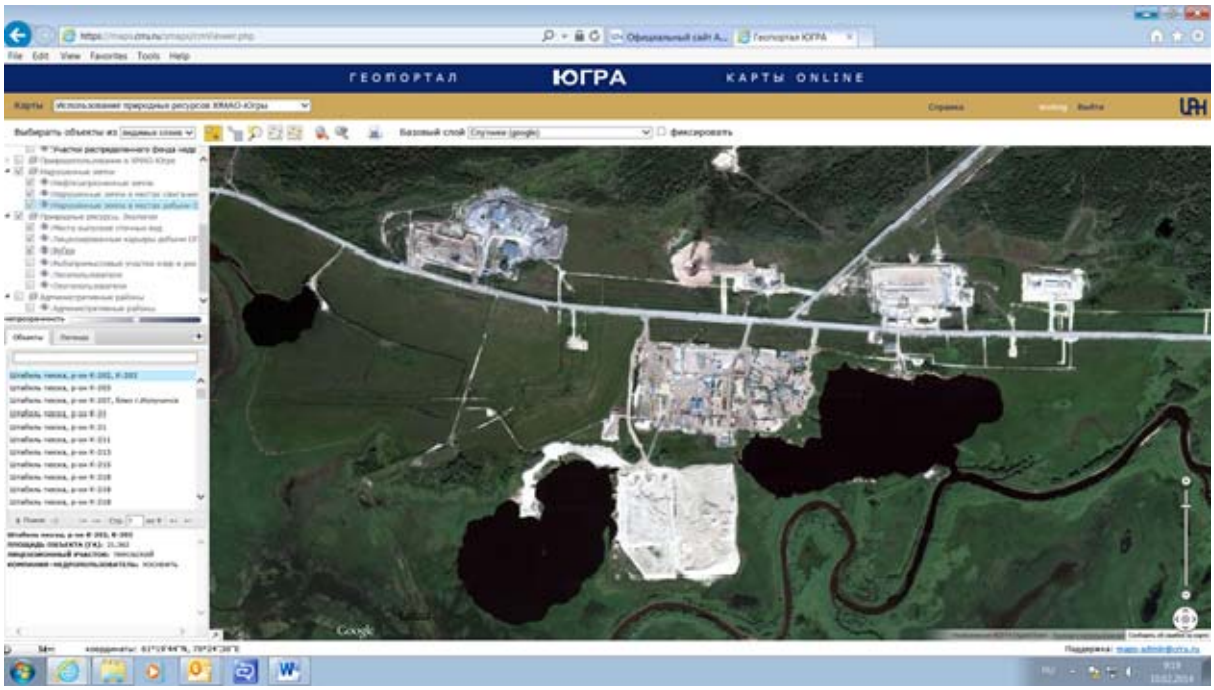


Рис. 4. Сайт Геопортала ЮГРА (фрагмент рабочего окна пользователя, имеющего закрытый доступ)

Основное назначение Геопортала ЮГРА – обеспечить органы государственной власти и местного самоуправления автономного округа, компании – недропользователей и граждан пространственными данными для повышения оперативности и эффективности решения различных задач по управлению территорией ХМАО – Югры.

Информация доступна на сайте центра рационального недропользования по адресам http://www.crru.ru/ и http://maps.crru.ru/.

УДК 528.8.0:622

ЧИСЛЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СЛЕДОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ РАДИОНУКЛИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОГАММАСЬЁМОК ТЕРРИТОРИЙ

В. Ф. Рапута[(1)], Т. В. Ярославцева[(2)]
[(1)]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
e-mail: raputa@sscc.ru
[(2)]ФБУН Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
e-mail: tani-ta@list.ru

NUMERICAL RECONSTRUCTION OF RADIONUCLID TRACES OF AEROSOL DEPOSITION WITH USING AIRBORNE GAMMA SURVEY OF TERRITORIES

V. F. Raputa[(1)], T. V. Yaroslavtseva[(2)]
[(1)]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
e-mail: raputa@sscc.ru
[(2)]FBIS Institute of Hygiene of Federal service on customers' rights protection and human well-being surveillance, Novosibirsk
e-mail: tani-ta@list.ru

Предложена модель реконструкции поля выпадений полидисперсной примеси от мгновенного источника. Фракционный состав примеси в источнике по скоростям оседания задаётся с помощью логнормального распределения. Проведена апробация разработанной модели на данных дистанционного зондирования аварийного загрязнения окрестностей Сибирского химического комбината Cs^{137}.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, аэрозоль, радиоактивное загрязнение, реконструкция, обратная задача.

Введение. Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате прошлых аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной [1; 2]. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в значительной степени затруднено обеспечением соответствующей входной информацией. К ним следует отнести неопределённости высоты и мощности источника аварийного выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания, определение текущих метеорологических условий и т. д., что приводит к необходимости использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения, создания и развития соответствующих моделей реконструкции [3].

1. Модель реконструкции следов аэрозольных выпадений радионуклидов при аварийных выбросах в атмосферу. Предварительный анализ имеющихся экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение их концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания спектра размеров частиц в источнике целесообразно использовать логнормальное распределение. Тогда, с учётом формулы Стокса, функция распределения по скоростям оседания w в атмосфере примет вид:

$$N(w)=\frac{1}{w^{1/2}c\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln w-\ln w_n)^2}{8\sigma^2}},\quad n\ge 1. \tag{1}$$

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является соотношение

$$p=\int_0^\infty wq_w N(w)dw\ , \tag{2}$$

где q_W – поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w.

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена:

$$u(z)=u_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^n,\qquad K_z=k_1\frac{z}{z_1}\ , \tag{3}$$

где u_1 и k_1 – значения u и K_z при $z=z_1$.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_W вблизи земли можно представить в виде

$$q_w(x,y)=\frac{Mc^\omega}{2(1+n)\sqrt{\pi}f_0\Gamma(1+\omega)x^{1.5+\omega}}\exp\left(-\frac{c}{x}-\frac{y^2}{4f_0^2x^2}\right). \tag{4}$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра, ось y направлена в поперечном ветру направлении, M – мощность источника примеси, f_0 – дисперсия флуктуаций направления ветра,

$$c=\frac{u_1H^{1+n}}{(1+n)^2k_1}\ ,\qquad \omega=\frac{w}{k_1(1+n)}\ . \tag{5}$$

С учётом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде

$$\begin{aligned}p(x,y,\vec{\theta})&=\frac{M}{2(1+n)\pi\sqrt{2k_0}x^{1.5}c\sigma}e^{-\left(\frac{c}{x}+\frac{y^2}{4f_0^2x^2}\right)}\int_0^\infty\frac{w^{0.5}}{\Gamma(1+\omega)}e^{-\frac{1}{8\sigma^2}(\ln w-\ln w_n)^2}\left(\frac{c}{x}\right)^\omega dw=\\&=\frac{\theta_1}{x^{1.5}}e^{-\left(\frac{c}{x}+\frac{y^2}{4f_0^2x^2}\right)}\int_0^\infty\frac{\omega^{\theta_2}e^{-\theta_3\ln^2\omega}}{\Gamma(1+\omega)}\left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega\ ,\end{aligned} \tag{6}$$

$$\theta_1=\frac{Mk_1^{3/2}(1+n)^{1/2}}{2\pi\sqrt{2k_0}c\sigma e^{\frac{1}{8\sigma^2}\ln^2\frac{w_n}{k_1(1+n)}}},\qquad \theta_2=\frac{1}{4\sigma^2}\ln\frac{w_n}{k_1(1+n)}+\frac{1}{2},\qquad \theta_3=\frac{1}{8\sigma^2}\ . \tag{7}$$

Исследование свойств функции (6) показывает, что она в интервале значений $x\in(0,\infty)$ достигает максимума в некоторой точке x_0, монотонно возрастает при $x\in(0,x_0)$ и соответственно монотонно убывает в интервале значений $x\in(x_0,\infty)$ и

стремится к нулю при $x \to 0$, $x \to \infty$. Оценка неизвестных параметров $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, входящих в соотношение (7), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений уровней радиации в точках местности. Следует также отметить, что величина c соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация лёгкой примеси.

Замечание. Параметры θ_2, θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1, который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

2. Численная реконструкция северного следа выпадений ^{137}Cs, образовавшегося в результате аварии на реакторном заводе в Томске-7. С использованием разработанной модели реконструкции полей атмосферных выпадений примесей проведён анализ данных аэрогамма-спектральной съёмки окрестностей Сибирского химического комбината (Томская обл.), выполненной в сентябре 1993 г. лётной экспедицией НПО «Тайфун». На момент съёмки плотность загрязнения ^{137}Cs на оси следа достигала 1 Кюри/км^2. Протяжённость следа составила более 50 км. К северу от СХК по ограниченному числу точек численно восстановлен след выпадений ^{137}Cs, образовавшийся в результате крупной радиационной аварии на реакторных заводах комбината в шестидесятых годах прошлого столетия (рис. 1). В правой части рис. 1 представлена измеренная и численно восстановленная плотность выпадений радионуклида по оси следа. Показан уровень соответствия измеренных и вычисленных значений плотности выпадений в контрольных точках (тёмные кружки).

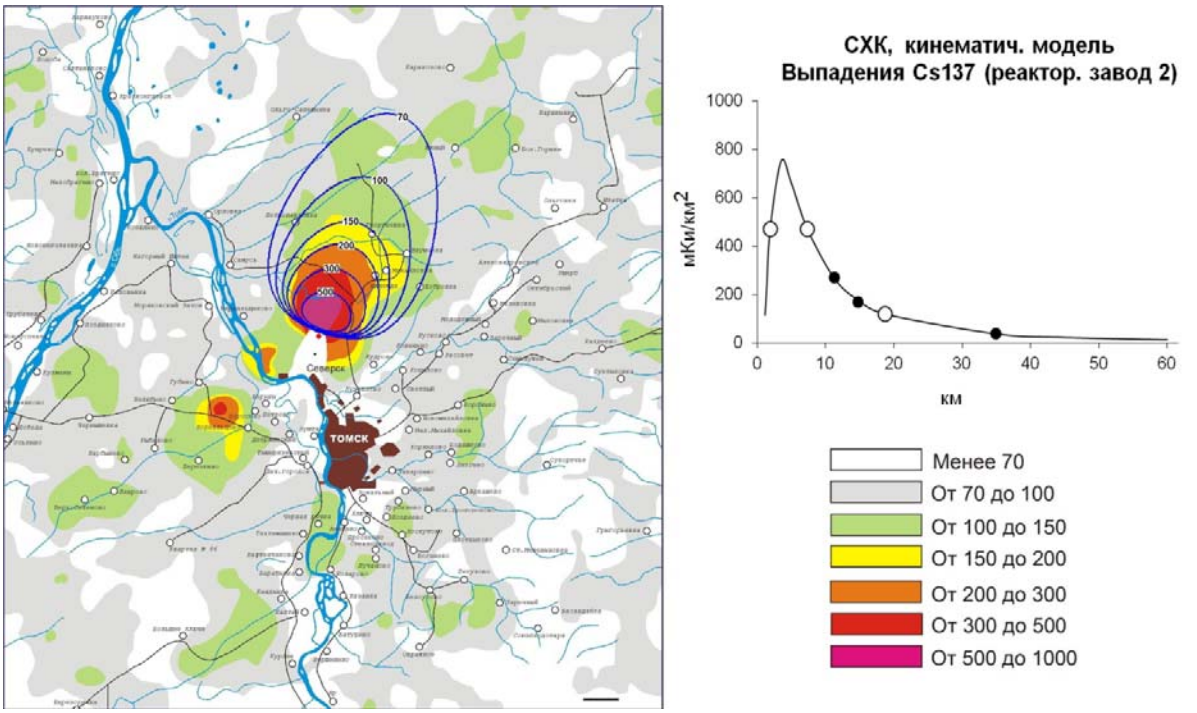


Рис. 1. Карта-схема плотности загрязнения почв ^{137}Cs (мКюри/км^2) на 1993 г. по данным аэрогаммасъёмки и численно восстановленный по модели реконструкции (6) северный след аэрозольных выпадений радионуклида от аварийных выбросов в атмосферу на реакторном заводе в Томске-7. ○ – опорные точки, ● – контрольные точки наблюдений

С использованием полученных оценок параметров моделей реконструкции и закона радиоактивного распада для ^{137}Cs проведено прогнозное восстановление современного состояния следа, а также на предположительное время аварии (вторая половина 60 годов прошлого столетия).

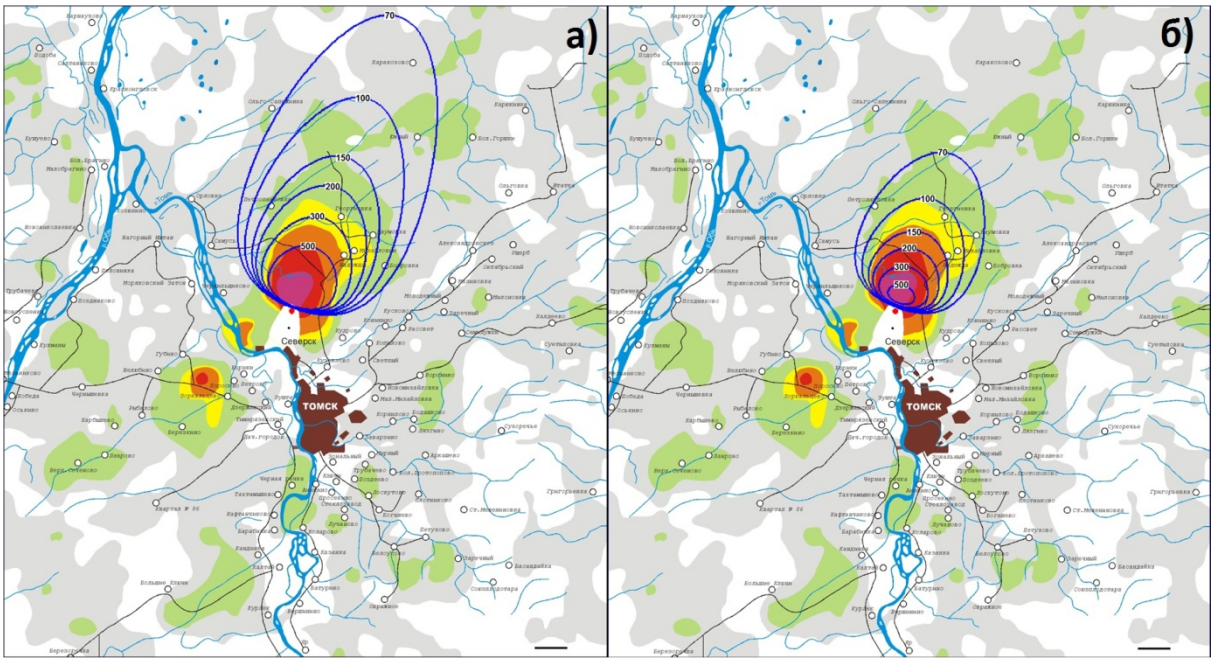


Рис. 2. Прогнозные поля плотности загрязнения почв ^{137}Cs (мКюри/км^2) к северу от Сибирского химического комбината на предполагаемое время аварийного выброса (а) и на 2012 г. (б)

Заключение. Разработанные малопараметрические модели реконструкции выпадений полидисперсной примеси дают возможность численного анализа данных наблюдений практически в пределах всего следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (6) требуется привлечение относительно небольшого объёма данных измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приёмом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма полезной является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Её наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени.

Список литературы

1. Израэль Ю.А., Цатуров Ю.С., Назаров И.М. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 5–18.

2. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате / С.М. Вакуловский, В.М. Шершаков, Р.В. Бородин и др. // Радиация и риск. 1993. Вып. 3. Прил. 2. С. 3–48.

3. Рапута В.Ф. Численная реконструкция радиоактивного загрязнения местности от аварии на радиохимическом заводе в Томске – 7 // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 733–737.

УДК 528.88

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОЖАРООПАСНОЙ СИТУАЦИИ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

И. В. Рублёв
ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"»
e-mail: igor-rublev@mail.ru

SATELLITE MONITORING OF DESIGNATED FIRE SITUATION IN THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT

I. V. Rublev
FSBI «Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”»
e-mail: igor-rublev@mail.ru

В статье рассмотрены некоторые методы оперативного мониторинга пожароопасной ситуации по данным дистанционного зондирования с использованием геоинформационных систем. Описаны космические аппараты (КА) и данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), используемые для отслеживания пожароопасной обстановки. Описана технология оперативного мониторинга, проблемы своевременного обнаружения точек вероятного возгорания.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, пожароопасная ситуация, геоинформационный подход.

Введение. Результаты небрежного отношения с огнём, хозяйственная деятельность населения, а так же последствия засухи и других природных явлений ежегодно вызывают в России десятки тысяч лесных пожаров, охватывающих огромные площади. По статистическим данным более 70 % от всего числа лесных пожаров происходит по вине человека [1].

Пожары, обнаруженные в течение 5–15 часов после их возникновения, обычно могут быть локализованы и потушены. По истечении указанного срока чаще всего этого сделать не удается, что приводит к массовой гибели леса.

Независимо от причины возникновения пожары оказывают глубокое воздействие на почвенно-растительный покров, землепользование, производство, местную экономику, а также производят выброс огромного количества газов и продуктов сгорания в атмосферу, что приводит к проблемам со здоровьем у населения, не говоря уже о глобальном воздействии на климатические условия [2].

Учитывая тот факт, что леса на территории РФ распределены неравномерно (83 % лесных земель находится в азиатской части России) и, что самое главное, занимают огромную территорию (порядка 769,8 млн га) [3], возникает проблема ежедневного оперативного мониторинга пожароопасной ситуации на большой территории в течение всего пожароопасного периода.

На сегодняшний день можно выделить три основных вида мониторинга за состоянием пожароопасной ситуации: наземные наблюдения, мониторинг с использованием авиации и спутниковый мониторинг. Первые два обладают большей точностью, однако более затратны в плане человеческих ресурсов и высокой стоимости их проведения. Ещё одной проблемой является необходимость ежесуточного мониторинга за труднодоступными и отдалёнными пожароопасными регионами. В связи с этим хотелось бы отметить преимущества и возможности использования спутникового мониторинга с применением геоинформационных технологий для получения оперативных данных по пожароопасной ситуации в Сибири.

Методика. Основной принцип работы системы спутникового мониторинга: специализированные спутники, находящиеся на солнечно-синхронных орбитах производят съёмку земной поверхности в видимом и ИК-диапазоне (с последующей передачей на наземную станцию). На основе разности температуры поверхности земли и температуры пожара возможно определить его местоположение и произвести выделение [4].

Спутниковые данные. Использование спутниковых систем низкого разрешения, таких как NOAA (прибор AVHRR) [5], TERRA, AQUA (MODIS) [6], Suomi NPP (VIIRS) позволяют охватывать большие территории и покрывать за сутки весь земной шар, но точность определения пространственного положения не так высока и может колебаться от 300 до 1000 метров в зависимости от угла визирования [7]. Однако большим плюсом этих систем является их свободное распространение. Данные, передаваемые с КА, могут быть приняты любым пользователем, обладающим необходимым приёмным оборудованием.

Данные среднего и высокого разрешения, получаемые с таких спутников как Метеор-М, Канопус-В, Ресурс-П, Landsat-8 способны выявлять более мелкие очаги пожаров, однако на то, чтобы покрыть хотя бы территорию Сибири для некоторых спутников, потребуется не меньше недели.

Одним из серьёзных препятствий на пути спутникового мониторинга являются облака, так как они не прозрачны для видимого и ИК диапазонов, в которых работают оптико-электронные приборы вышеперечисленных спутниковых систем.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что в оперативном спутниковом мониторинге пожароопасной обстановки целесообразно применять комплексный подход с использованием всевозможных данных с различных спутниковых систем.

Технологии. СЦ «НИЦ «Планета» ведёт круглосуточный прием данных со всех вышеперечисленных спутников, ежедневно и оперативно выпускает соответствующую продукцию по пожароопасной ситуации в СФО, а также участвует в программе информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [8].

В рамках этой программы с наступлением пожароопасного сезона ежедневно, на протяжении всех суток, ведутся работы по обнаружению точек вероятного возгорания (ТВВ). Основываясь на принимаемых данных с группировки космических аппаратов NOAA, TERRA и AQUA, позволяющих получать данные по всей территории России не реже четырёх раз в сутки, производится выявление ТВВ. В зависимости от интенсивности пожара, состояния атмосферы и времени суток возможно выявлять точки на площади от 1 га. Благодаря большому количеству каналов с необходимым для выявления очагов возгораний спектральным охватом и чувствительными приборами на бортах КА точность выявления ТВВ весьма высока. Полученные результаты мониторинга (отчеты в виде таблиц, тематические каты и другая требуемая информация) оперативно рассылаются всем заинтересованным пользователям.

Для более детального изучения пожароопасной обстановки необходимо использовать данные более высокого разрешения. Обработка многоспектральных данных Landsat-8 осуществляется посредством цифрового порогового алгоритма оценки пожароопасной обстановки, который реализован в среде ENVI и основан на разности спектральных кривых. Он представляет собой дерево решений, выделяющее на изображении класс, относящийся к горящей кромке пожаров. Выделенный класс конвертируется в векторный слой с атрибутивной информацией, где автоматически высчитывается статистика, в которой описывается как общая площадь горящей кромки, так и отдельно взятых участков охваченных огнём, рис. 1.

По данным дистанционного зондирования можно выявлять и картировать участки, пройденные огнём. Снимок получен с КА «Ресурс-П», пространственное разрешение 12 м. Выделена площадь выгоревшего участка, которая составила более 86 км², т. е. 8600 га, рис. 2.

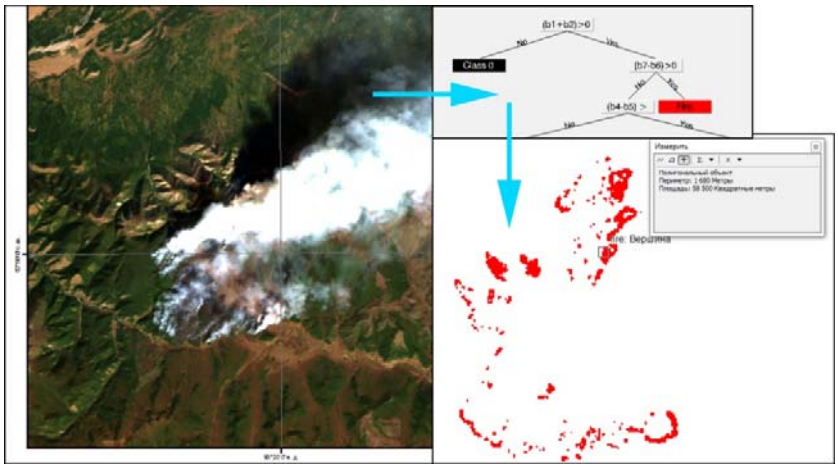


Рис. 1

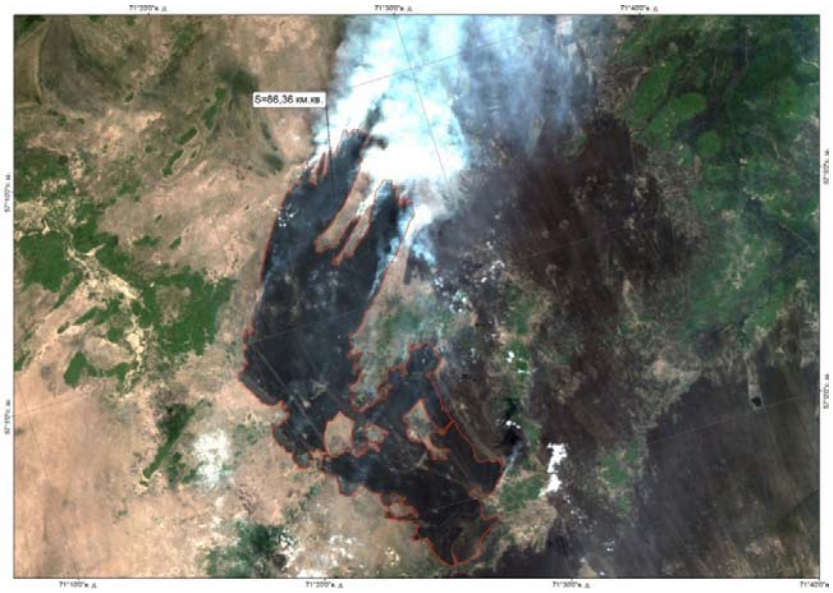


Рис. 2

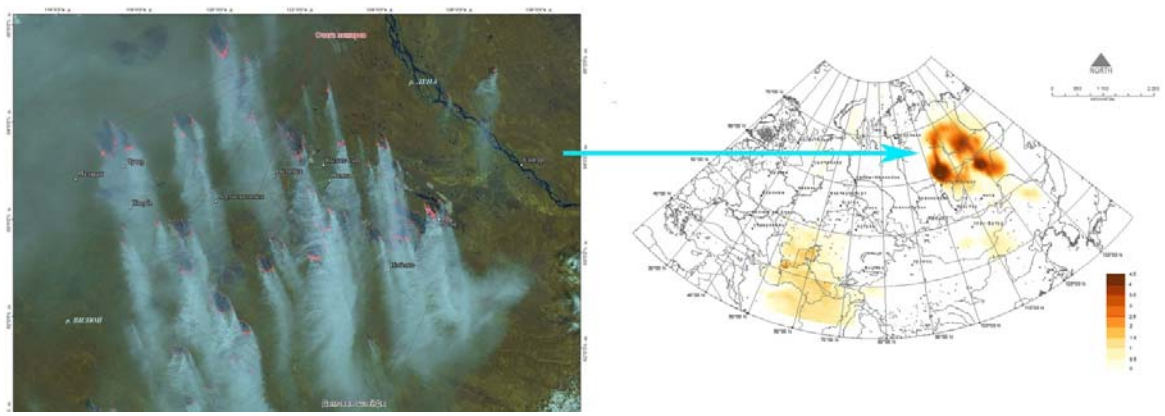


Рис. 3

Наблюдения за распространением дымов от пожаров также является неотъемлемой частью спутникового мониторинга пожароопасной ситуации. Учитывая большие площади, охватываемые пожарами, и распространение смога на сотни километров и более, данные со спутников низкого разрешения с широкой полосой съёмки, покрывающей значительную территорию, как нельзя лучше справляются с этой задачей. На рис. 3 представлена продукция такого наблюдения. Данные получены со спутника Suomi NPP: слева – с прибора VIIRS, производимого съёмку в видимом и ИК диапазонах, справа – с прибора OMPS, данные которого позволяют выявлять скопление и концентрацию аэрозолей в атмосфере.

Заключение. Вследствие того, что леса России составляют 1/5 часть лесов планеты [9], охрана, своевременное обнаружение и ликвидация лесных пожаров – очень актуальная задача, которая является жизненно важной не только в национальных интересах, но и в глобальных для всего человечества.

В этом плане космический мониторинг лесных пожаров является источником оперативной и объективной информации о пожароопасной обстановке в различных регионах, он имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами мониторинга – высокую оперативность, большую территорию охвата наблюдений и меньшие операционные расходы. На наблюдаемых территориях спутниковые данные служат весомым дополнением к традиционным методам мониторинга, а на неохраняемых – это единственное средство наблюдения и оценки последствий лесных пожаров.

Список литературы

1. Щетинский Е.А. Охрана лесов от пожаров: учеб. пособие. Ч. 1 // Федеральная служба лесного хозяйства России Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства. 1998. С. 53.

2. Мединцев С.Ю., Орехов А.А., Кочкарь Д.А. Системы мониторинга лесных ресурсов: состояние и пути развития // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2009. № 6. С. 72.

3. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы. // Аналитический обзор ИОА. 2003. Сер. Экология. Вып. 68. С. 224.

4. Ханин А.А., Чеботарёв Р.С. Принципы оптического метода автоматического детектирования лесных пожаров // Алгоритм Безопасности. 2011. № 1. С. 76–77.

5. Kidwell K.B. NOAA polar data user’s guide: NOAA NESDIS, NCDC. 1988. P. 148

6. Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. N 4. P. 1088–1100.

7. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров (пособие для лесных пожарных). М., 1994. С. 15.

8. Беляев А.И., Коровин Г.Н., Лупян Е.А. Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров МПР РФ // Материалы науч. конф. Москва, 16–18 ноября 2004 г. М., 2004. С. 419–423.

9. Шубин В.А., Гиряев Д.М. Леса России. М.: Изд. ВНИИЦлесресурс, 1997. С. 3–16.

УДК 528.88

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Е. Ю. Сахарова[1,2], Л. А. Сладких[1], Е. Н. Кулик[2]
[1]Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»
[2]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
e-mail: elena.saharova27@gmail.com
e-mail: sla@rcpod.siberia.net
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

SATELLITE MONITORING OF GRAIN CROPS IN THE SOUTH PART OF WESTERN SIBERIA

E. Yu. Sakharova[1,2], L. A. Sladkikh[1], E. N. Kulik[2]
[1]Siberian Center FGBU "SRC "Planeta"
[2]Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: elena.saharova27@gmail.com
e-mail: sla@rcpod.siberia.net
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

В сфере сельского хозяйства актуальным вопросом является получение достоверной информации о состоянии сельскохозяйственных угодий. В статье на примере южных территорий Западной Сибири представлены результаты использования данных дистанционного зондирования Земли для осуществления мониторинга состояния посевов зерновых культур.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг растительности, вегетационный индекс.

Введение

Использование спутниковых данных позволяет осуществлять мониторинг состояния посевов зерновых культур: отслеживать динамику развития культур, изменение состояния посевов, реакцию растений на погодные факторы и вредителей, периоды вегетации и т. д. Для выполнения анализа состояния посевов по спутниковым данным рассчитываются индексы вегетации (NDVI), которые отражают общую активность вегетации растений. В Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета» (СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета») применение данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) для сельскохозяйственных целей началось с 2005 г. Первые шаги были сделаны в сторону прогнозирования урожайности яровой пшеницы в тестовых хозяйствах на территории Новосибирской области и позволили накопить большой объём данных измерений вегетационного индекса [1; 2]. Полученные прогностические значения сравнивались с фактическими значениями урожайности и для проведения оценки выполненной работы рассчитывалась оправдываемость прогнозов (таблица).

Оценка состояния посевов зерновых культур

Выявление устойчивой зависимости между индексами NDVI и урожайностью, накопленная база измерений NDVI на тестовых полях и база статистических значений урожайности зерновых культур за период с 2001 по 2011 гг. стали основой для проведения дальнейших исследований. В соответствии с агроклиматическим районированием Новосибирской области для проведения исследований изначально были выбраны хозяйства с разным уровнем земледелия. На основании анализа данных, полученных в результате прогнозирования урожайности, был разработан алгоритм оценки состояния посевов зерновых культур. Данный алгоритм реализован в виде

программных модулей на языке IDL и используют функционал программного комплекса ENVI и MODIS Conversion Tool Kit. Алгоритм оценки, основанный на использовании спутниковых данных, позволяет разделить посевы на три градации, принятые в агрометеорологии: хорошее, удовлетворительное и плохое состояние посевов [3]. В данном направлении работ используется оперативная и архивная информация с космических аппаратов (КА) Terra и Landsat. Так, например, информация с КА Terra, благодаря периодичности съёмки и большому охвату территории, используется для решения задач по регулярному мониторингу состояния посевов на обширных территориях.

Таблица

Результаты расчета оправдываемости прогноза по хозяйствам и районам Новосибирской области

	Годы										Средняя оправдываемость прогнозов, %
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Количество хозяйств	26	30	36	38	50	36	56	41	39	34	
Количество полей в хозяйствах	161	201	236	229	277	181	528	325	297	399	
Оправдываемость прогноза в хозяйствах (%)	88	82	97	84	90	97	87	–	74	81	86,7
Среднерайонный прогноз (количество районов)	–	–	6	16	30	30	30	30	30	30	
Оправдываемость среднерайонной урожайности (%)	–	–	85	84	88	87	85	69	66	78	80,3

В рамках данной работы для исследования общих закономерностей развития сельскохозяйственных культур за большой ряд лет в течение периодов вегетации проводились измерения индекса NDVI и строились графики, отражающие общую динамику развития (рис. 1). На основании анализа полученных результатов, имея хозяйства с различным уровнем земледелия, были рассчитаны пороговые значения NDVI, необходимые для автоматизированной классификации посевов по градациям. Для возможности изучения динамики развития определенных культур необходимо знать размещение культур на полях в хозяйстве. На рис. 2 представлена схема размещения культур в хозяйстве ЗАО «Завьяловское».

На стадии разработки алгоритма оценки состояния посевов одной из первоначальных задач возникла необходимость отделения пахотных земель от прочей территории области. Для каждой исследуемой области на основании обработки информации с КА Landsat были построены маски неиспользуемых земель. К категории неиспользуемых земель были отнесены лесные массивы, элементы гидрографии, населенные пункты, пастбищные угодья и т. д. Использование масок в работе программных модулей позволяет выполнять оценку только для территории, на которой располагаются сельскохозяйственные культуры.

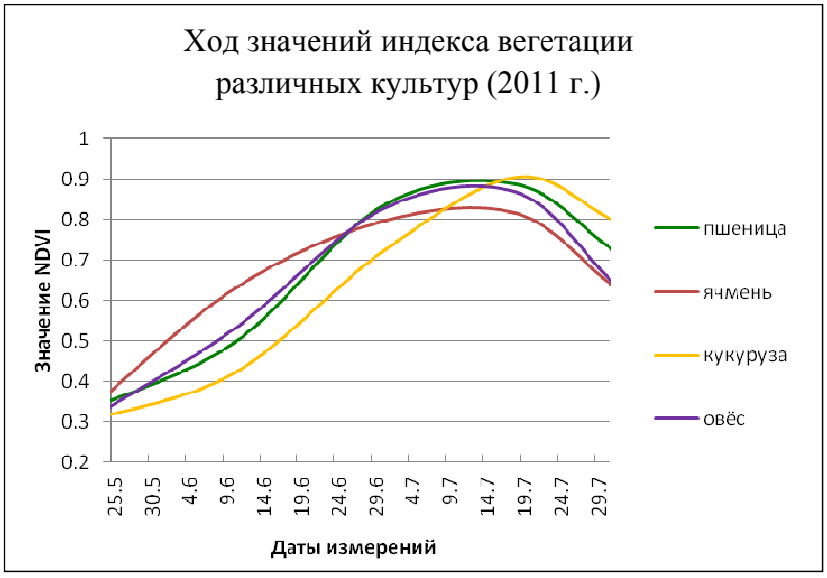


Рис. 1. Динамика развития культур, ЗАО «Завьяловское» Тогучинского района

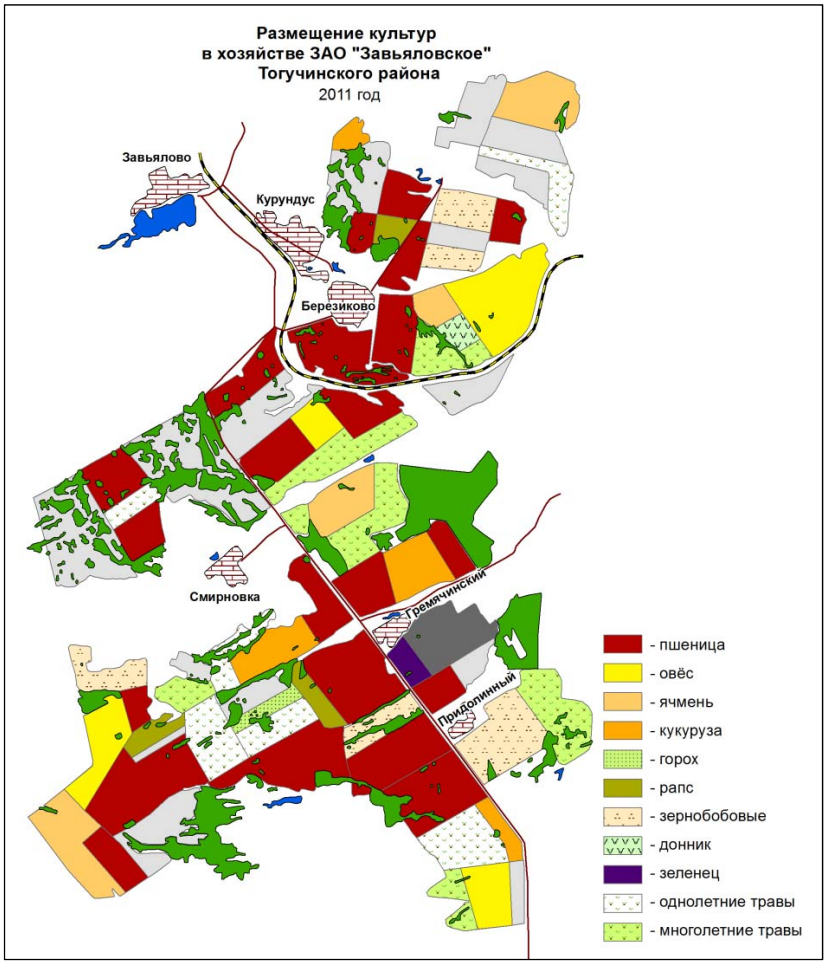


Рис. 2. Схема размещения культур, ЗАО «Завьяловское» Тогучинского района

С 2012 г. оценивается состояние посевов зерновых культур на территориях Новосибирской, Омской и Кемеровской областей, а также на территории Алтайского края. Результат обработки спутниковых данных оформляется в виде карт оценки состояния посевов зерновых культур с процентным соотношением каждой градации.

Данные карты создаются с определенной периодичностью в течение всего вегетационного периода для каждой исследуемой области и позволяют оценить общую динамику развития культур. Для этого на каждую безоблачную дату по информации с КА Terra рассчитывается индекс вегетации, далее полученный растр совмещается с масками облачности и неиспользуемых земель. Значения индекса NDVI на пахотных территориях, не исключенных масками, разделяются на три градации (хорошее, удовлетворительное, плохое состояние посевов) в соответствии с рассчитанными ранее пороговыми значениями. На полученное изображение наносятся элементы гидрографии, населенные пункты, границы административных районов, производится оформление конечного продукта с формированием легенды карты (рис. 3).

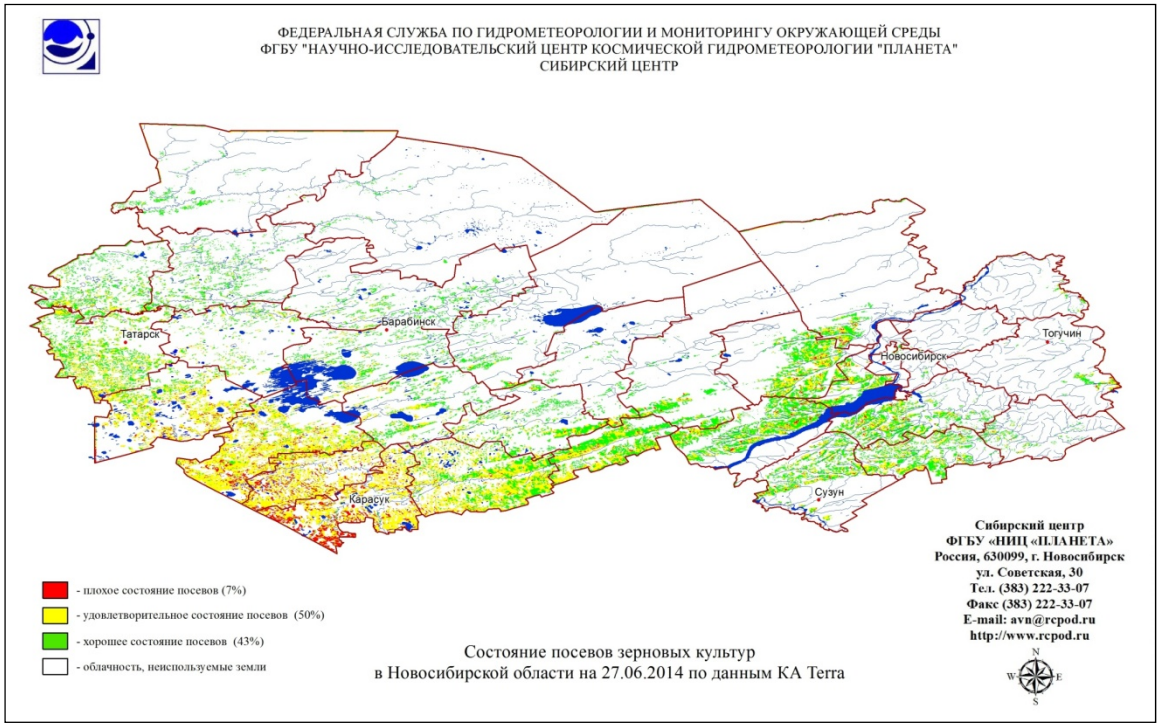


Рис. 3. Карта оценки состояния посевов зерновых культур, Новосибирская область, 27 июня 2014 г.

Реализованный алгоритм показал свою работоспособность при выполнении оценки состояния посевов для объектов разного масштаба: территорий целых областей, отдельных хозяйств и единичных полей. При выполнении оценки состояния посевов зерновых культур по отдельным полям используются измерения, производимые в автоматическом режиме в реперных точках, созданных специально для каждого хозяйства.

Результаты работы алгоритма оценки состояния посевов по спутниковым данным сравнивались с независимыми наземными агрометеорологическими обследованиями, проводимыми специалистами гидрометеостанций совместно с работниками сельского хозяйства [4]. В среднем разница между значениями наземных и дистанционных методов оценки состояния посевов зерновых культур за три года проведения наблюдений составила: по Новосибирской области – 9 %; по Алтайскому краю – 13 %; по Кемеровской области – 8 %.

Заключение

Разработанный комплекс программных модулей имеет высокую эффективность за счёт: автоматизации измерений значений вегетационных индексов по реперным точкам;

автоматизации расчетов пороговых значений на основе анализа многолетних наблюдений; интегрирования уникальных масок неиспользуемых земель. Обновление материалов съемок обеспечивает актуализацию масок, отражающих изменения в системе землепользования, что положительно отражается на качестве работы алгоритма. Алгоритм оценки состояния посевов зерновых культур по спутниковым данным позволяет реализовать оперативный мониторинг состояния посевов как на региональном уровне, так и на уровне отдельных полей. Накопленная база знаний по оценке состояния посевов позволяет анализировать динамику развития сельскохозяйственных культур. Полученные карты оценки состояния посевов в оперативном режиме передаются в отделы агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

Список литературы

1. Сахарова Е.Ю., Сладких Л.А., Захватов М.Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов: в 2 т. Т. 1. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 67–72.

2. Сладких Л.А., Кулик Е.Н., Сахарова Е.Ю. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. ; науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 329–333.

3. Сапрыкин Е.И., Сладких Л.А., Кулик Е.Н.. Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли. 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 : СГУГиТ, 2015. С. 40–46.

4. Сахарова Е.Ю., Сладких Л.А., Кулик Е.Н. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации. 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 : СГУГиТ, 2015. С. 47–52.

УДК 551.51, 528.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ОБЛАЧНОСТИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ВО ВРЕМЯ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

О. А. Томшин, В. С. Соловьев
ФГБУН Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН
e-mail: otomshin@ikfia.sbras.ru

STUDY OF CLOUD VARIATIONS IN NORTHERM HEMISPHERE DURING FORBUSH DECREASES OF COSMIC RAYS

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

По данным спутниковых и наземных наблюдений проведены исследования вариаций облачного покрова в Северном полушарии во время Форбуш-понижений. Показано наличие корреляционной связи вариаций облачности и потока КЛ с коэффициентом –0,82 (уровень значимости $p < 0,001$) для широтной зоны 70°–90°N и –0,68 ($p < 0,001$) для зоны 50°–70°N. Амплитуда вариаций облачности во время событий для участка 70°–90°N составила ~4 %, для участка 50°–70°N ~1 %.

Ключевые слова: облачность, Форбуш-понижения, дистанционное зондирование.

Введение

Исследованию солнечно-земных связей и их влияния на атмосферные процессы, облачный покров посвящен ряд работ [1–7]. Известно, что в период Форбуш-понижений (ФП) потока космических лучей (КЛ), а также после мощных геомагнитных возмущений или солнечных вспышек наблюдаются изменения в облачном покрове, в распределении приземного атмосферного давления и высоты геопотенциальных поверхностей.

В данной работе приведены результаты исследования вариаций облачного покрова в Северном полушарии в зависимости от вариаций интенсивности потока космических лучей в период 2000–2012 гг.

Данные

Для исследований отклика облачного покрова на вариации потока КЛ были выделены две широтные зоны в северном полушарии: 70°–90°N и 50°–70°N.

По данным нейтронных мониторов, установленных на четырёх станциях в северном полушарии, был произведён отбор 25 случаев ФП в период 2000–2012 гг. Приведённые в работе вариации потока КЛ получены по данным нейтронного монитора станции ИЗМИРАН, г. Москва (http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm). Амплитуда вариаций потока КЛ в рассматриваемых событиях составила от ~5 до ~22 %. Методом наложения эпох был проведен анализ вариаций облачного покрова и вариаций КЛ относительно «нулевого» дня. За «нулевой» день брался день с наименьшим значением потока КЛ относительно 90-дневного среднего. Подобная методика использовалась в работе [6].

Изменения облачного покрова оценивались по среднесуточным данным мультиспектрального радиометра MODIS (ИСЗ Terra), рассчитывающего распределение облачности (параметр Cloud fraction) с пространственным разрешением 1°x1° [8].

Обсуждение

Для исследуемых широтных зон методом наложения эпох были построены графики вариаций среднесуточных значений облачного покрова и потока КЛ в период отобранных ФП-событий, представленные на рис. 1. Сплошной линией на рис. 1 показаны вариации КЛ, сплошной линией с треугольными маркерами – вариации облачного покрова зоны 70°–90°N, прерывистой линией – вариации облачности зоны 50°–70°N.

Как показано на рис. 1, значения облачности для участка 70°–90°N за пять суток до «нулевого» дня начинают плавно расти и достигают максимума в «нулевой» день, после чего плавно спадают до невозмущённых значений в течение пяти суток. Амплитуда вариаций облачности в рассматриваемый период составила ~ 4 %. Коэффициент корреляции облачности и потока КЛ, усредненных по 25 случаям, составил –0,82 ($p < 0{,}001$), однако стоит отметить, что в отдельных случаях наблюдались положительные корреляции. Динамика вариаций облачности над участком 50°–70° N не показала заметного отклика на изменения в потоке КЛ, тем не менее коэффициент корреляции в данном случае составил –0,68 ($p < 0{,}001$). Амплитуда вариаций составила ~ 1 %. Значения стандартного отклонения (на рис. не показаны) для обеих широтных зон достаточно велики. Большой разброс значений облачности, возможно, обусловлен сезонными вариациями и циклонической активностью.

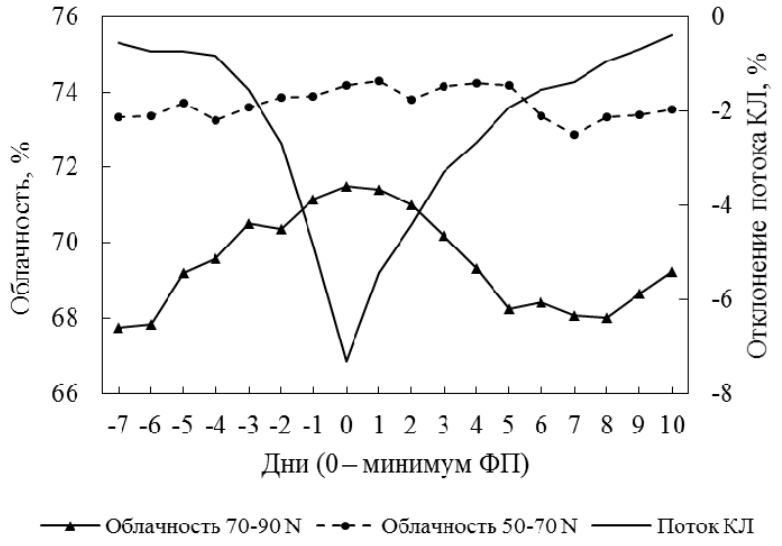


Рис. 1. Усредненные вариации потока КЛ и облачного покрова, рассчитанные по 25 событиям ФП

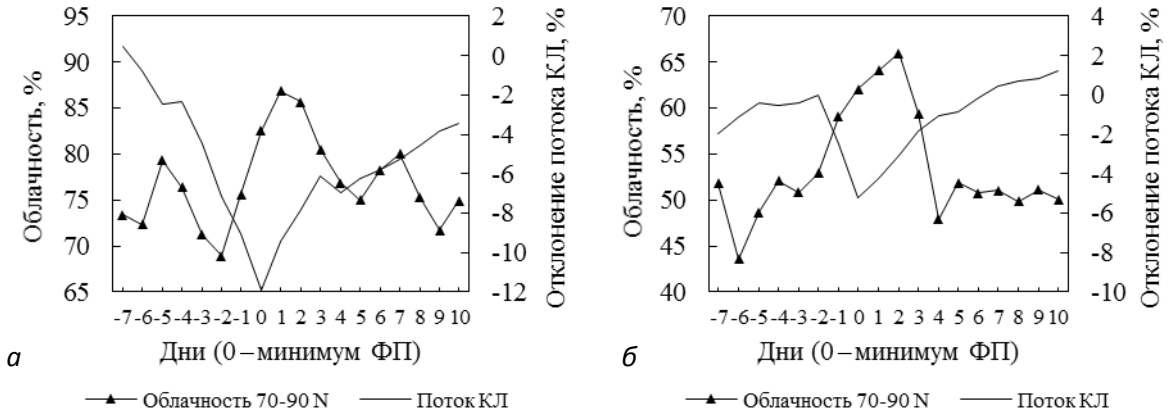


Рис. 2. Вариации потока КЛ и облачного покрова над зоной 70°–90° N во время отдельных случаев ФП: *а* – 16 июля 2000 г. и *б* – 29 апреля 2001 г.

На рис. 2 представлены вариации облачности во время двух отдельных событий для высокоширотной зоны 70°–90°N: а) 16 июля 2000 г. и б) 29 апреля 2001 г. (обозначения аналогичны рис. 1). Амплитуда вариаций облачности для обоих случаев составила ~ 20 %, в то время как ослабление потока КЛ во время события 2000 г. составило ~ 12 %, а во время события 2001 г. ~ 5 %. Максимум в вариациях облачности в первом случае приходится на вторые сутки после «нулевого» дня, во втором случае – на третьи сутки. В первом случае наблюдается плавное восстановление значений облачности к прежним на фоне плавного восстановления потока КЛ, в то время как во втором случае восстановление носит более быстрый характер, совпадающий с более резким восстановлением потока КЛ.

Заключение

Анализ вариаций облачности и потока КЛ, рассчитанных по 25 событиям ФП, показывает наличие корреляционной связи с коэффициентом –0,82 (уровень значимости $p < 0{,}001$) для высокоширотной зоны 70°–90°N и –0,68 ($p < 0{,}001$) для зоны 50°–70°N. Максимум в вариациях облачности приходится на «нулевой» день, день с наименьшим значением потока КЛ. Амплитуда вариаций облачности во время событий для зоны 70°–90°N составила ~4 %, для зоны 50°–70°N ~1 %.

Список литературы

1. Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 1992, Т. 32. С. 1–22.
2. Svensmark H. Influence of cosmic rays on Earth's climate. Phys. Rev. Lett, 1998. V.81. Pp. 5027–5030.
3. Пудовкин М.И., Егорова Л.Ю., Веретененко С.В. Вариации температуры в нижней атмосфере во время форбуш-понижений космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 5. С. 128–129.
4. Solovyev V.S., Kozlov V.I. Latitudinal Variations of Northeast Asia Cloudiness During Stage of Increasing of the Activity of 23rd Solar Cycle // Proceedings of SPIE. Vol. 6522, 65221Z (2006).
5. Solovyev V.S. Investigation of Impact of Solar-Terrestrial Connections on Cloudiness in Northern Asia on Remote Sensing Data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXIst ISPRS Congress Beijing 2008, Proceedings of Commission VIII, Vol. XXXVII, Part B8, Commission VIII, ISSN 1682-1750. P. 587–590.
6. Kristjánsson J.E., Stjern C.W., Stordal F., Fjæraa A.M., Myhre G., and Jónasson K. Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds – a reassessment using MODIS data // Atmos. Chem. Phys. 2008. № 8. P. 7373–7387.
7. Соловьев В.С., Козлов В.И. Влияние вариаций космических лучей на распределение облачности в Северной Азии // Известия ВУЗов. Физика. 2009. № 2. С. 16–19.
8. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Transactions AGU. 2007. V. 88, № 2. P. 14–17.

УДК 630*181:614.841.2

ДИСТАНЦИОННЫЕ ДАННЫЕ В ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ СИБИРИ

Ю. О. Усатая, Е. И. Пономарев, Е. Г. Швецов
Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
e-mail: Julia_Usat@mail.ru

REMOTE SENSING DATA FOR WILDFIRE CHARACTERISTICS ANALYSIS OVER SIBERIA

Ключевые слова: дистанционные методы, радиометр, термически активная зона, детектирование, радиационная температура, классификация изображений, лесной пожар, спектральные характеристики, интегральная мощность теплоизлучения от пожара FRP.

Лесные пожары могут представлять угрозу объекту нефтегазового комплекса. В частности месторождения, осваиваемые на севере Красноярского края, находящиеся в зоне, где при благоприятных внешних условиях вероятны лесные пожары, в том числе массовые. В связи с этим, с одной стороны актуально развивать дистанционные методы мониторинга лесных пожаров, а с другой – развивать методы прогнозирования горимости территорий и энергетических характеристик пожара.

На территории Сибири ежегодно фиксируется большое количество лесных пожаров. В связи с большим охватом территории объективный мониторинг ЛП может быть проведен только с использованием спутниковых систем. В Лесном фонде РФ более 51 % лесов отнесено под спутниковые методы мониторинга лесных пожаров [1; 2], которые активно развиваются и применяются на практике на протяжении двадцати лет. В середине 2000-х гг. спутниковые данные включены в систему учета лесных пожаров ИСДМ – Рослесхоз [2; 3] и в систему «Каскад» МЧС РФ [4]. Начиная с 1996 г., в исследовательских целях формируется банк данных о лесах и пожарах (рис. 1), фиксируется спутниковыми методами в Институте леса им. В.Н Сукачева СО РАН [2; 5; 6]. В связи с этим актуальна разработка технологий оценки энергетических характеристик пожара на основе дистанционных радиометрических данных.

В данной работе мы исследовали возможность дистанционных спутниковых оценок энергетических параметров горения в лесу и связь энергетических пожаров с внешними условиями (типа растительности и метеорологическими характеристиками).

Информация о районе исследования

Район исследований включает территории Среднесибирского плоскогорного таёжного района, Приангарского района, Восточно-Сибирского таежного мерзлотного. В этих районах часто фиксируются крупные и экстремальные крупные пожары. На этих территориях были выбраны пожары 2012–2013 гг. под зоной с доминированием сосняков и под зоной с доминированием лиственничников.

Исходная информация была взята из ГИС данных о лесных пожаров института леса СО РАН. Выборка включает 5 пожаров, по 20 наблюдений для каждого пожара, по 100 и более значений на каждый район. Сведения о метеорологических параметрах из открытых баз данных «Росгидрометцентр» (rp5.ru). Показатель влажности ПВ-1 был восстановлен для 3 метео пунктов, Богучаны, Тура, Якутия, вблизи которых зафиксированы пожары (рис. 1).

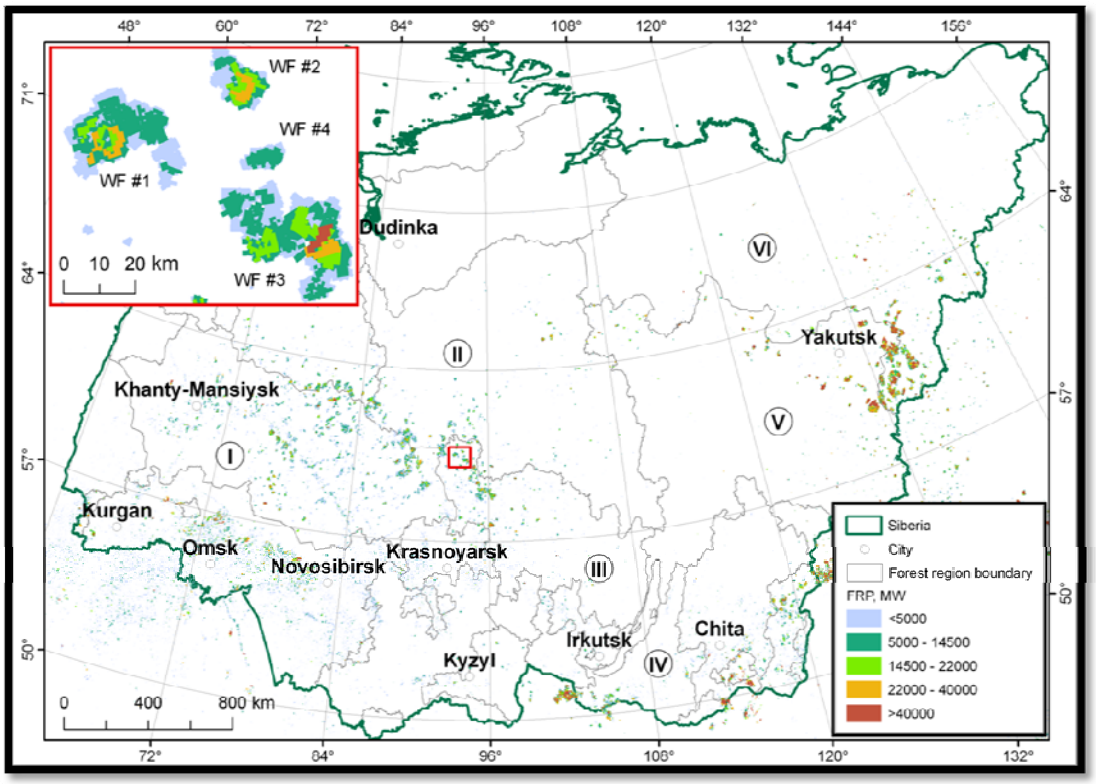


Рис. 1. Пример распространения пожаров в Сибири в 2012 г. на основе показателя FRP. Диаграммами представлены максимальные и средние значения FRP (МВт) по лесным районам Сибири

Для каждой записи был вычислен показатель интегральной мощности теплоизлучения FRP.

Были построены временные ряды динамики FRP.

Проведено сравнение данных энергетических характеристик термически активных зон горения в различных условиях (преобладающие древостои).

Вычислены средние значения за весь срок наблюдений, минимальные, максимальные и диапазон вариации значений.

Были проведены вычисления показателя пожарной опасности ПВ-1.

Были построены временные ряды динамики ПВ-1.

Была построена и оценена связь значений FRP max и ПВ-1.

В сезоны с низкой горимостью до 80–90 % пожаров характеризуются средними значениями FRP < 1200–4000 МВт.

В экстремальный пожароопасный сезон 2012 зафиксировано более 60 % пожаров с FRP > 5000 МВт.

Спорадические максимумы FRP >20 000 МВт – случаи высокоинтенсивного горения, верховые пожары.

Основные результаты

Для каждого зафиксированного полигона был вычислен показатель FRP (максимальная, средняя и минимальная). Ежедневный круглосуточный мониторинг пожаров позволил зафиксировать в базе данных до 5–10 наблюдений в день.

1. На основе этой информации были построены ряды, отражающие суточную, а также долгопериодическую динамику изменения показателя FRP в течение времени развития пожара (рис. 2). В работе использовано более $2{,}6 \cdot 10^5$ записей о пожарах на территории Сибири за 2012 г.

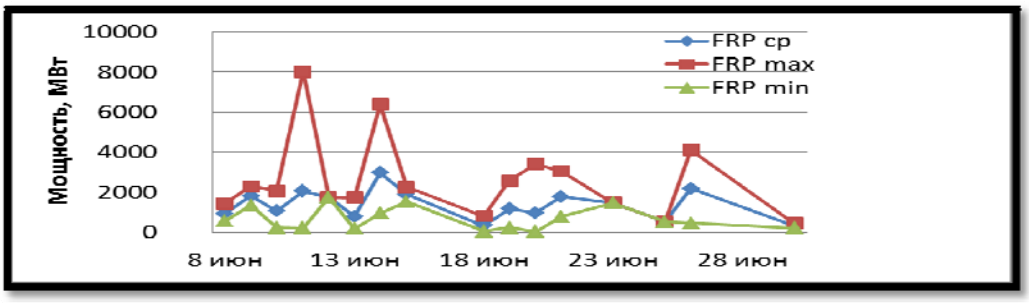


Рис. 2. Динамика мощности теплоизлучения от пожара в лесах с преобладанием сосновых насаждений по данным спутниковых наблюдений в районе действия метеостанции Якутск за 2012 г.

Используя соотношение Кауфмана, определили мощность теплоизлучения FRP max в дни наблюдения пожара, которая изображена на рис. 3, 4.

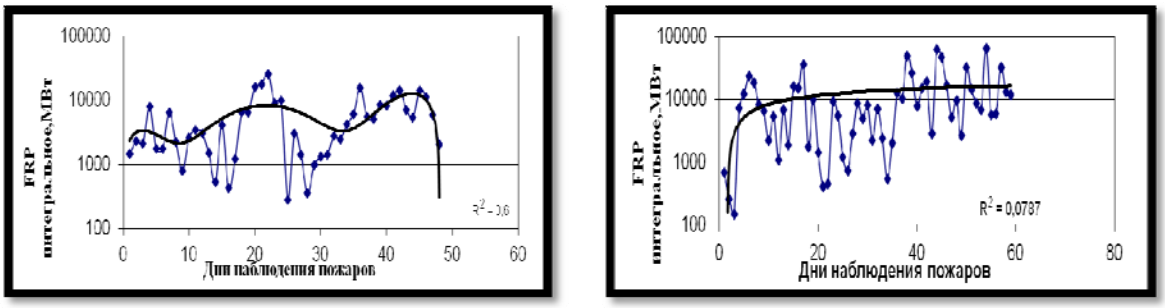


Рис. 3, 4. Максимальные значения FRP в дни наблюдения лесных пожаров с преобладанием лиственичных и сосновых насаждений за 2012 г. в районе действия метеостанций Якутск, Тура, Богучаны

На основе метеорологических данных установили динамику показателя пожароопасности ПВ-1 в районе действия лесного пожара, которая изображена на рис. 5, 6.

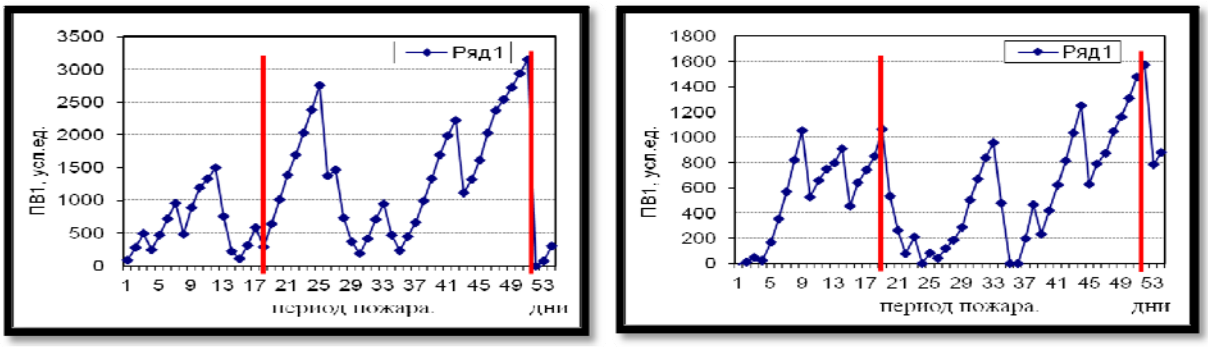
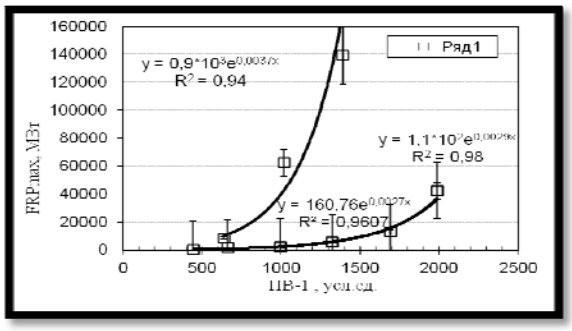


Рис. 5, 6. Показатель влагосодержания ПВ-1 в дни наблюдения лесных пожаров с преобладанием лиственичных и сосновых насаждений за 2012 г. в районе действия метеостанций Якутск, Тура, Богучаны

2. Природная пожарная опасность в лесу по условиям погоды, по которой можно судить о возникновении и распространениях низовых пожаров в насаждениях различных типов леса.

Оценили уровень связи между FRP и ПВ-1, которая изображена на рис. 7, 8.

В первом приближении эта связь описывается экспоненциальной функцией с достоверностью аппроксимации на уровне 0,94.



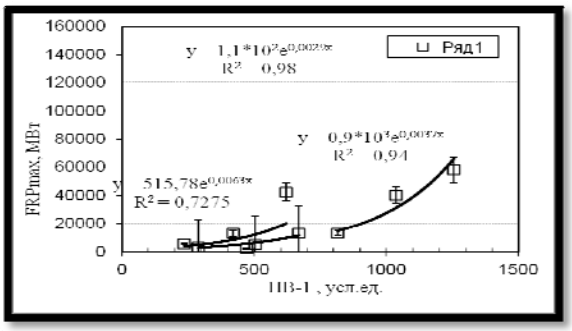


Рис. 7, 8. Связь значений FRP max от изменения показателя влагосодержания ПВ-1 в дни наблюдения лесных пожаров с преобладанием лиственичных и сосновых насаждений за 2012 г. в районе действия метеостанций Якутск, Тура, Богучаны

Заключение

Изучили и применили на практике методику количественной оценки мощности теплоизлучения от пожара (FRP) по съемкам в среднем инфракрасном диапазоне с использованием данных TERRA/Modis. Впервые для территории Сибири данные о теплоизлучении от активной зоны горения были получены для выборки пожаров. Рассмотрены случаи пожаров в различных лесорастительных условиях – в лесах с преобладанием сосновых и лиственничных насаждений.

Для выборки пожаров получены данные о динамике показателя теплоизлучения, определенные дистанционным методом. Установлено, что уровень вариации теплоизлучения от активной зоны пожара зависит от внешних условий (температура, осадки), типа растительного покрова и времени проведения съемки, что отражает изменение режима горения.

Зафиксированы средние значения показателя FRP < 1200–4000 (МВт) (для пожаров в лесах с преобладанием сосновых насаждений) и < 1200–1000 (МВт) (для пожаров в лесах с преобладанием лиственичных насаждений).

Максимальные значения фиксировались в диапазоне 40000 (МВт) – 75000 (МВт).

Были получены оценки уровня связи между вариацией FRP и значением показателя влагосодержания ПВ-1. В первом приближении эта связь описывается экспоненциальной функцией с достоверностью аппроксимации на уровне 0,94.

Список литературы

1. Андреев Ю.А., Брюханов А.В. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона): справ. пособие. Красноярск, 2011. 272 с.

2. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) / С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Г.Н. Коровин, Р.В. Котельников, Е.А. Лупян, В.Е. Щетницкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М., 2008. 5, т. II. С. 419–429.

3. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В., Стыценко Е.В. Флитман // Дистанционное Зондирование земли из космоса. М., 2012. Т. 9,2. С. 9–26.

4. Кудрин А.Ю., Резников В.М. Аэрокосмическая система мониторинга пожарной обстановки // Технологии гражданской безопасности. 2006. 4(10). С. 36–49.

5. Пономарев Е.И., Шевцов Е.Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2013. 5. С. 45–54.

6. Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сиб. экол. журнал. 1996. Т. 3, 1. С. 85–92.

УДК 528.8.04, 528.88

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ

Е. В. Федотова, У. А. Будник
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий
ФГБУН Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения
Российской академии наук
e-mail: elfed@ksc.krasn.ru

SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF CONIFEROUS FORESTS DAMAGE DURING SIBERIAN SILKMOTH OUTBREAK

E. V. Fedotova, U. A. Budnik
Siberian Federal University
Forest Institute SB RAS
e-mail: elfed@ksc.krasn.ru

Целью работы является анализ распространения повреждения пихтовых древостоев сибирским шелкопрядом во время вспышки его массового размножения в 2010–2014 гг. на территории Республики Алтай. Для проведения анализа использовались многоспектральные изображения Landsat, цифровая модель рельефа. Проведены оценки ландшафтной приуроченности повреждений, площади поврежденных лесов.

Ключевые слова: многоспектральные данные Landsat, повреждения лесов сибирским шелкопрядом, пространственно-временная динамика вспышки.

Введение

Вспышки численности сибирского шелкопряда периодически происходят на территории Красноярского края и сопредельных территорий, в том числе в горных районах, и для анализа их распространения, оценки площадей поврежденных лесов постоянно используются данные дистанционного зондирования [1–4].

Цель данного исследования – анализ пространственно-временной динамики повреждения темнохвойных древостоев при вспышке массового размножения сибирского шелкопряда в Республике Алтай (рис. 1):

– связь (приуроченность) повреждений с элементами рельефа;

– временная динамика роста площади повреждений.

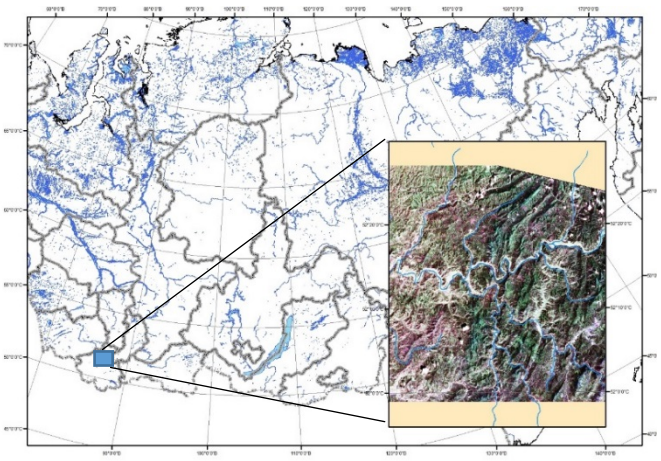


Рис. 1. Положение исследуемой территории

Задачи:

– сбор и предварительная обработка снимков Landsat;

– выделение поврежденных участков леса на снимках;

– анализ параметров рельефа участков поврежденных лесов.

Работа над снимками Landsat. Подготовительный этап

В работе использовались снимки приборов TM, ETM+ и OLI платформ Landsat5, 7, 8; в общей сложности семь сцен. В качестве базового снимка «нормального» состояния леса был взят снимок 2006 г. Был вырезан фрагмент сцены, ограниченный координатами 52°27' с. ш./87°09' в. д. и 51°59' с. ш./87°55' в. д. Затем были вырезаны такие же фрагменты из всех использующихся снимков.

Из анализа были исключены участки территории, находящиеся на высоте более 650 м н.у.м., поскольку при визуальном анализе многоспектральных изображений и определении положения поврежденных лесов они не поднимались выше 650 м н.у.м.

Маска темнохвойных лесов на данную территорию была построена по зимнему снимку Landsat5 2010 г. Нелесные территории имеют небольшую площадь и сосредоточены по рекам Байгол и Лебедь. По визуальному анализу летних снимков можно выделить смешанные леса с примесью деревьев лиственных пород, они не были исключены из дальнейшего анализа.

На предварительном этапе обработки проводилась топографическая нормализация снимков методом С-коррекции для сглаживания различий в уровнях освещенности склонов разной экспозиции [5].

Классификация снимков и выделение территории с поврежденными лесами.

На первом этапе было осуществлено построение обучающих выборок поврежденных лесов, выделенных в результате наземных исследований в 2013 г. Эти обучающие выборки использовались для классификации снимков 2013 и 2014 гг. Для снимков 2010, 2011, 2012 гг. обучающие выборки были определены с помощью сравнения спектральных характеристик здоровых и поврежденных темнохвойных насаждений. Обучающие выборки других типов подстилающей поверхности определялись для каждого снимка индивидуально, поскольку классификация проводилась методом минимального расстояния. Этот метод не требует нормальности распределения значений в выборках.

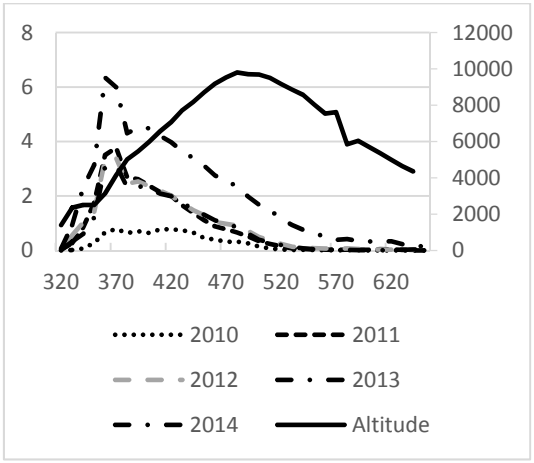
Оценка точности классификации проводилась для класса «поврежденные насаждения» по снимку 2014 г. Были выбраны 256 точек методом случайной стратификации. Материалы по оценке точности классификации представлены в таблице. Общая точность классификации 86,67 %. Оценка с помощью каппа-статистика показывает результат 0,71 в целом и 0,59 для класса поврежденных лесов, что соответствует очень хорошему совпадению.

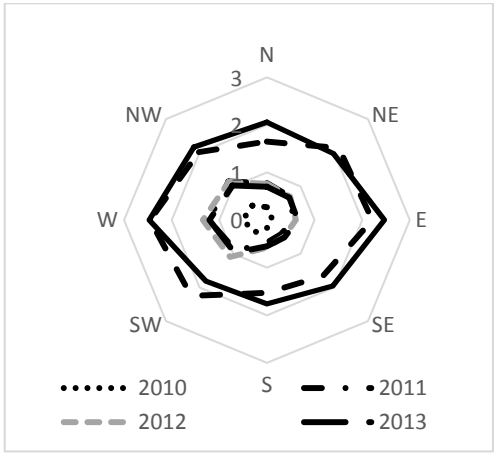
На рис. 2 приведены графики изменения экспозиции, крутизны склонов и высоты над уровнем моря для поврежденных лесов. Нормирование выполнено по отношению к рельефу, не превышающему 650 м н. у. м.

Таблица

Оценка точности классификации

Название класса	Всего по наземным данным	Всего по классифи-кации	Количество верно классифициро-ванных точек	Точность классификатора	Точность пользователя
Поврежден-ные леса	46	60	43	93,48 %	71,67 %
Фон	104	90	87	83,65 %	96,67 %
Всего	150	150	130		





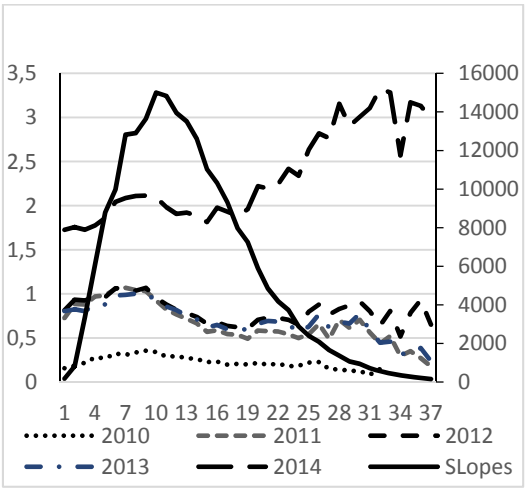


Рис. 2. Нормированные площади экспозиций, крутизны и высоты н.у.м. территории поврежденных лесов и абсолютные значения площадей (га) территории в целом

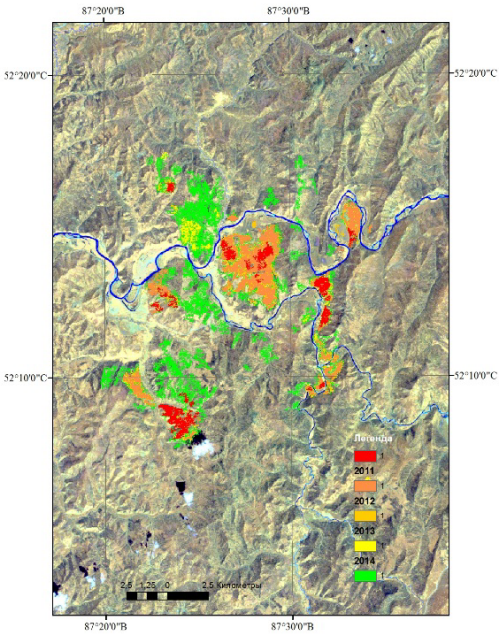


Рис. 3. Положение поврежденных лесов в 2010–2014 гг.

Повреждения лесов 2010 г. занимают площадь примерно 585 га. В 2011 г. произошло значительное распространение повреждения и площадь достигла 1755 га.

В течение 2012–2013 гг. значительного увеличения площади не произошло, повреждение лесов распространялось по склонам до 5° и более 20° крутизны, занимая склоны западной экспозиции. Летом 2014 г. (снимок 2014 г. был получен 13 июля) площадь повреждений резко увеличилась до 4540 га, повреждения распространились на более крутые склоны, в т. ч. восточной экспозиции.

На рис. 3 показано, как распространялись повреждения темнохвойных насаждений в 2010–2014 гг.

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

Список литературы

1. NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmoth outbreaks in eastern Siberia / K.J. Ranson, A.A. Kozuhovskaya, Y.P. Kondakov, I.A. Pestunov, V.I Kharuk. // Int. J. Remote Sensing. 2004. V. 25, No. 24. P. 5543–5555.

2. Буренина Т.А., Кузьмичев В.В., Харук В.И. Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2005. № 1. С. 153–162.

3. Съемка Spot-Vegetation в анализе динамики повреждения горнотаежных лесов сибирским шелкопрядом / С.Т. Им, К.Д. Рэнсон, В.В. Солдатов, В.И. Харук // Исследование земли из космоса. 2007. № 1. С. 74–80.

4. Им С.Т., Харук В.И., Федотова Е.В. Спектрорадиометрическая космосъемка в анализе зоны вспышки массового размножения сибирского шелкопряда // Журнал СФУ. Сер. Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 4. С. 346–358.

5. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types / D. iano, E. Chuvieco, J. Salas, I. Aguado // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2003. Vol. 41, No. 5. P. 1056–1061.

УДК 528.88

МОНИТОРИНГ ПАВОДКОВОЙ ОБСТАНОВКИ МЕТОДОМ ДЗЗ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДАННЫХ ПРИБОРА MODIS НА ПРИМЕРЕ ПАВОДКА НА РЕКЕ ЧУЛЫМ ВЕСНОЙ 2014 г.

М. П. Шагаев[1,2], Е. Н. Кулик[2]
[1]Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»
[2]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
e-mail: shagaev@rcpod.ru
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

FLOOD SPACE MONITORING AND ASSESSMENT OF POTENTIALS OF MODIS DATA' USE FOR FLOOD MONITORING ON THE EXAMPLE OF CHULYM RIVER FLOOD, SPRING 2014

M. P. Shagaev[1,2], E. N. Kulik[2]
[1]Siberian Center FGBU "SRC "Planeta"
[2]Siberian State University of Geosystems and Technologies
e-mail: shagaev@rcpod.ru
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

В статье рассмотрены возможности применения методов дистанционного зондирования Земли при мониторинге паводковой обстановки. Приведены результаты проведенных экспериментов в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета» на примере паводка на реке Чулым Новосибирской области в 2014 г.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, мониторинг паводковой обстановки, данные прибора MODIS.

Введение

Паводки и наводнения – это стихийные бедствия, охватывающие большие территории и превосходящие по наносимому ущербу все другие чрезвычайные ситуации. Наиболее эффективным методом слежения за паводком может служить метод космического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). В ФГБУ «НИЦ «Планета» регулярно проводится мониторинг паводков. Для выявления затопленных территорий используются данные с таких космических аппаратов (КА) как Ресурс-П и Landsat-8, так как они имеют высокое пространственное разрешение. Такие спутники дают снимки, содержащие исчерпывающую информацию о паводке на момент съемки. Однако интервалы между съёмками территории наводнения этими КА могут быть крайне велики. Для решения проблемы своевременного обновления можно использовать данные со спутников, производящих ежедневное зондирование земной поверхности.

Цель эксперимента состояла в демонстрации технологических возможностей методики мониторинга паводка, а также оценке потенциала использования информации с КА TERRA и AQUA на примере наводнения на реке Чулым в апреле 2014 г.

Мониторинг половодья. В начале апреля 2014 г. на реке Чулым начался паводок. Для мониторинга затопленных территорий использовались данные со спутников Ресурс-П и Landsat-8 с пространственным разрешением до 15 м каждый, а также данные GoogleMaps.

Для определения областей подтопления было необходимо выделить положения поймы реки. Для этого был использован снимок местности из архива GoogleMaps (рис. 1).

Данные со спутника Ресурс-П за 16 апреля 2014 г. были основным источником информации о паводковой обстановке во время подъема воды. Для определения уреза воды была проведена классификация изображения по методу IsoData. После выделения классов, соответствующих территориям подтопления, была получена карта подтопления (рис. 2).

Рис. 1. Летний снимок местности из архива GoogleMaps с выделенным контуром поймы р. Чулым

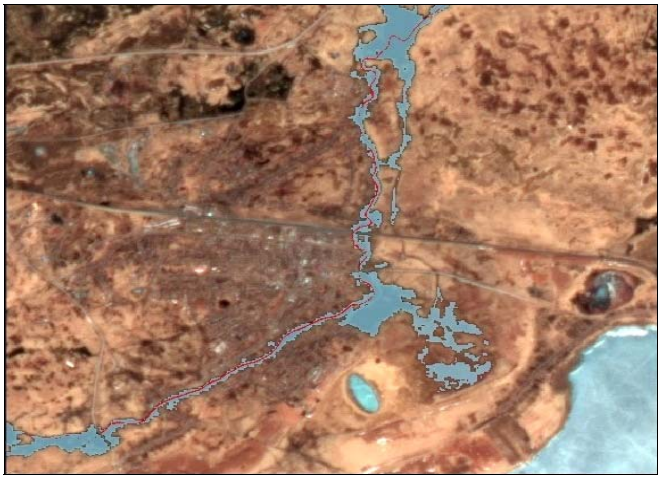


Рис. 2. Результат обработки снимка Ресурс-П за 16 апреля 2014г. Красным выделена пойма реки, синим – область затопления

После коррекции снимок был приведён к разрешению 15 м с помощью метода Pan Sharpening. Далее была проведена классификация по методу IsoData с целью выделения областей подтопления. Ниже приведен снимок с наложенным на него векторным слоем зон подтопления. По этому изображению можно оценить, насколько площадь водной поверхности уменьшилась за 25 дней (рис. 3).

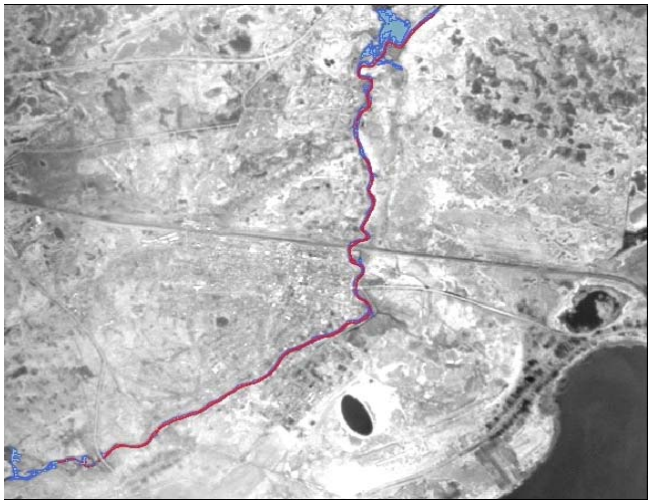


Рис. 3. Снимок со спутника Landsat-8 от 12 мая 2014 г. Красным выделена пойма реки, синим – область затопления

Основываясь на полученных результатах, в среде ArcGIS была проведена оценка площади водной поверхности разлившейся реки на моменты 16 апреля и 12 мая 2014 г. Также была рассчитана площадь поймы. Основываясь на этих оценках, были рассчитаны площади затопления на эти даты.

В пределах области интереса площадь паводка составила: 16 апреля ~2,54 км^2; 12 мая ~0,42 км^2; площадь поймы ~0,24 км^2.

Использования данных прибора MODIS. При мониторинге паводковой обстановки важным фактором является своевременность полученных данных. Становится очевидной необходимость использования данных со спутников, производящих ежедневное зондирование земной поверхности, таких как TERRA и AQUA.

С учетом облачности интервал между съемками для таких КА составляет в среднем 4–5 дней. Необходимо учитывать особенность использования таких данных, поскольку съемочное оборудование этих КА позволяет получать снимки низкого пространственного разрешения. В нашей работе мы использовали данные прибора MODIS с этих спутников, имеющие пространственное разрешение 250 метров.

Для визуальной оценки информативности данных на снимки MODIS от 16 апреля 2014 г. наложен контур областей затопления, полученный после обработки снимка КА Ресурс-П на аналогичную дату (рис. 4).

Общий контур наводнения, который удалось классифицировать на снимках MODIS, в общих чертах повторяет контур паводка, который был получен на основе данных спутника Ресурс-П (рис. 5).

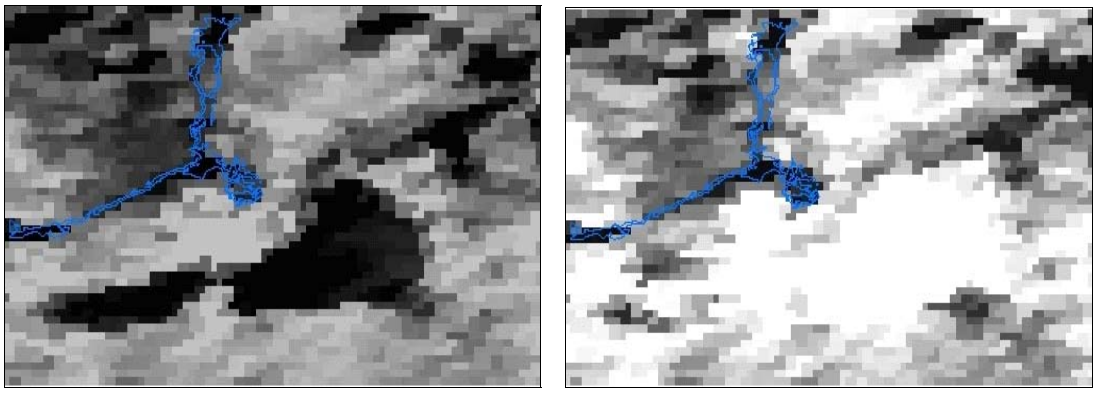


Рис. 4. Снимок MODIS со спутника Aqua: красный и инфракрасный спектральные каналы

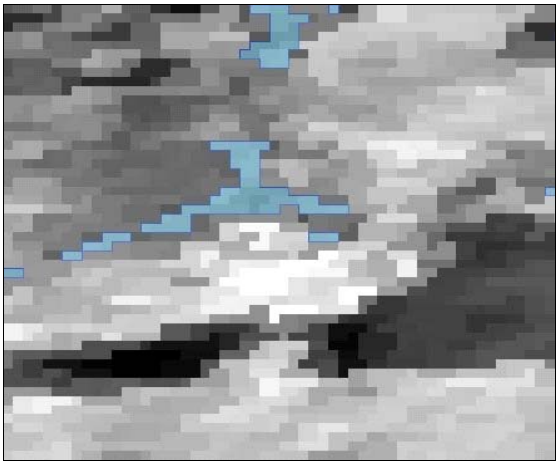


Рис. 5. Выделение водной поверхности на снимке MODIS

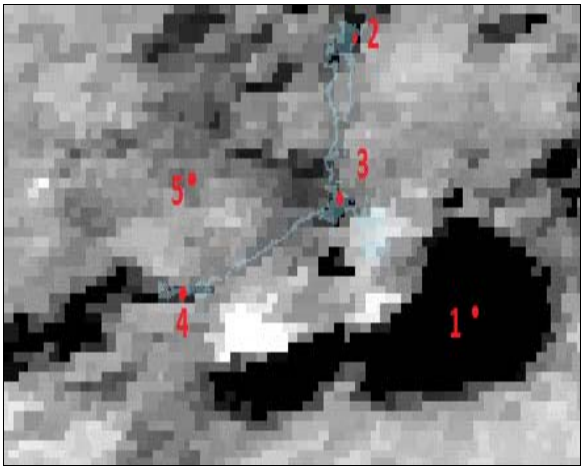


Рис. 6. NDVI по данным MODIS (Terra), 16 апреля 2014г. Характерные значения NDVI для областей: 1 (озеро, лёд) – 0,10; 2 – 0,14; 3 – 0,2; 4 – 0,2; 5 (посёлок) – 0,23

Для выделения областей подтопления и уточнения площади паводка были рассчитаны значения индекса NDVI для территории паводка (рис. 6).

Поскольку по снимкам MODIS нельзя выделить контуры затопления с высокой точностью, следовательно, нет возможности с приемлемой точностью рассчитать площади затопления по контурам. Таким образом, встаёт вопрос оценки доли площади, занятой водой, внутри одного пикселя. Сложность этой задачи обуславливается тем, что нельзя просто сравнить отношения яркости пикселя в некотором спектре в разное время (до и во время наводнения), так как изменяется множество условий проведения съемки, таких как высота Солнца, угол съёмки и пр. Однако сравнение NDVI лишено этих недостатков. Ниже приведена формула для оценки доли пикселя, занятого водой.

$$s = \frac{(1-\beta)*(\alpha-\gamma)}{(1-\gamma)*(1-\beta-(1-\gamma)*k)}, \quad (2)$$

где α – значение индекса NDVI до наводнения; γ – значение индекса NDVI во время наводнения; β – значение индекса NDVIдля пикселя, полностью занятого водой; k – отношение значений яркости водной поверхности в ближнем инфракрасном канале во время наводнения и до него; s – доля площади пикселя, занятого водой.

На момент паводка 16 апреля 2014 г. на снимке не было обнаружено открытых водных поверхностей достаточной площади для определения коэффициентов β и k, следовательно не было возможности использовать точное решение. Таким образом, оценка площади паводка была проведена на основе приближенного решения.

Рассчитывая площадь подтопления по площади контура, классифицируемого как водная поверхность, получили площадь паводка равной 6 км^2, что более чем в 2 раза превышает реальную площадь паводка на данном участке реки в этот период. При учете поправки площадь паводка была оценена в 4 км^2, что в 1,5 раза ближе к истине, чем предыдущий результат.

Вывод

Основной проблемой мониторинга половодий методом ДЗЗ можно назвать нехватку оперативных данных. Эта проблема связана с ограничениями частоты повторения спутниковой съемки конкретных затопляемых территорий и наличием облачности. Поэтому при наблюдениях половодий целесообразно использовать информацию со всех доступных космических систем. Вместе с тем пространственное разрешение данных некоторых КА, таких как TERRA и AQUA, не позволяет достоверно дешифрировать кромку воды и приводит к ошибкам в определении масштабов половодья. Таким образом, оперативный мониторинг паводков из космоса без использования наземных наблюдений в некоторых случаях малоэффективен. Для улучшения качества мониторинга необходимо использовать данные со стационарных гидропостов и по возможности организовывать временные (мобильные) посты гидрологических наблюдений в паводкоопасных районах. В перспективе целесообразно провести моделирование зон затопления по космическим снимкам высокого пространственного разрешения в сочетании с данными об уровнях воды, определяемых на гидропостах. Такие модели способны обеспечить возможность более оперативно оценивать общую гидрологическую обстановку и динамику её развития.

Список литературы

1. Болтырев В.Б. Опасные природные процессы. 2010. 291 с.

2. Тарарин А.М. Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий в периоды половодий: автореф. М., 2010. 80 с.

УДК 528.88

ПРИМЕНЕНИЕ СЕНСОРА MODIS ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ[1]

А. Ю. Шукилович, Е. В. Федотова, Ю. А. Маглинец
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Институт космических и информационных технологий

Рассмотрены возможности использования данных спектрорадиометра MODIS для решения задач оперативного агромониторинга. Проведен анализ факторов, влияющих на изменчивость и неоднородность спектральных характеристик сельскохозяйственных угодий. Проанализированы тренды вегетационного индекса NDVI для полей Сухобузимского района Красноярского края.

Ключевые слова: оперативный мониторинг, сенсор MODIS, дистанционное зондирование.

Одной из ключевых характеристик земель сельскохозяйственного назначения (ЗСХН), как элемента подстилающей поверхности и объекта мониторинга, является существенная динамика изменения их отражательных свойств во времени. Причины изменения свойств можно разделить на три класса. Во-первых, это – естественная изменчивость погодных факторов, таких как температура воздуха и почвы, их влажность и др. Во-вторых, это – фенологическая изменчивость в процессе развития растений, определяемая для каждого конкретного поля выращиваемой на нем титульной культурой. В-третьих – это техногенное воздействие (проводимые агротехнические мероприятия). Указанные группы факторов находятся в сложной взаимосвязи. Так, очевидно, что первая группа факторов влияет как на смену фенологических стадий, так и на сроки проведения сельскохозяйственных работ. Кроме того, следует учитывать степень засоренности полей, которая сама по себе является фактором, изменяющимся во времени, качество почвенного покрова (которое в пределах одного полевого сезона можно принять за константу), характеристики мезорельефа и др. Более подробно указанные вопросы рассмотрены, в частности, в [1].

Все динамические факторы, связанные с ЗСХН, в первом приближении могут рассматриваться либо как позитивные, либо как негативные. К негативным факторам, влияющим на неоднородность растительного покрова и, следовательно, спектральных отражательных характеристик следует отнести такие, как неравномерные всхожесть, засоренность, переувлажнение и др., которые проявляются практически на каждом поле. Существующие и перспективные агротехнологии в ряде случаев позволяют вносить коррективы, позволяющие преодолеть негативные факторы. Горизонт для принятия оперативных решений составляет от 3 до 7 дней. Для обеспечения такой оперативности для принятия управленческих решений необходимо иметь в распоряжении информацию, обновляющуюся с частотой не реже одного-двух дней. Это определило выбор в качестве основного инструмента для мониторинга динамики ЗСХН сенсора MODIS.

Данный сенсор широко используется в агромониторинге [2–4]. Однако в указанных работах в основном анализируются вопросы картографирования, классификации видов посевов др. Тематика оперативного мониторинга проработана недостаточно, что определяет актуальность нашего исследования.

[1] Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

Исходные данные, постановка задачи

В качестве тестового полигона для проведения исследований были выбраны сельскохозяйственные угодья Сухобузимского района Красноярского края. Основные культуры, используемые в севообороте района, – яровые зерновые культуры (пшеница, ячмень, рожь, овес), многолетние и однолетние травы. Существенную часть занимают земли под паром.

Был сформирован векторный слой контуров сельскохозяйственных угодий (порядка 1500 контуров) района. Данная работа выполнена по данным вегетационного периода 2014 г., когда для всех полей известны произрастающие с/х культуры.

Задачи исследования состояли в следующем:

– выбрать средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), при помощи которых будет осуществляться мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий;

– разработать метод обнаружения и оценки изменения однородности спектральных характеристик поля, что соответствует изменению с/х культуры или поля (изменение почвенных условий, появление сорняков и пр.).

При решении первой задачи был выдвинут ряд требований к источнику данных ДЗЗ:

– для мониторинга растительности спутниковая съемка должна проводиться в зонах спектра, позволяющих наилучшим образом отделять зеленую растительность от других типов подстилающей поверхности;

– пространственное разрешение должно позволять наблюдать отдельные с/х поля;

– необходима высокая периодичность съемки в силу быстрого развития с/х культур.

Немаловажным фактором является стоимость данных ДЗЗ.

В наилучшей степени указанным требованиям удовлетворяют данные наблюдений спектрорадиометром MODIS, установленным на борту спутников Terra и Aqua. Съемочная система имеет спектральные каналы в красной и ближней ИК-зонах с пространственным разрешением 250 м. Широкая полоса обзора при съемке указанной системой обеспечивает возможность наблюдения территории России ежедневно. Результирующие продукты, содержащие характеристики отраженного излучения в видимой и ближней ИК-областях спектра и вегетационные индексы NDVI и EVI, формируются как ежедневно, так и раз в 8 и 16 дней.

Так как требовалось понять, как изменяются за вегетационный период измеряемые прибором MODIS спектральные характеристики с/х полей, было решено использовать продукт MOD09Q1. Данный продукт является композитным, т. е. составленным на основе восьмидневной съемки местности, и содержит данные с атмосферной коррекцией в первом (видимом красном) и втором (ближнем) ИК-диапазонах с пространственным разрешением 250 м.

Решение второй задачи является более сложным, поскольку несколько факторов влияют одновременно на неоднородность измеренных сенсором MODIS характеристик: это и изменение объекта (поля), являющееся «полезной» частью сигнала, и шумы, связанные с функционированием прибора и изменениями условий съемки.

По имеющимся в продукте MOD09Q1 данным красного и ближнего ИК диапазонов был подсчитан индекс NDVI.

Далее задача была разделена на две подзадачи:

1) сравнить и выявить закономерности поведения различных культур на основе NDVI, отталкиваясь от статистики прошлых лет, накопленной на тестовом полигоне;

2) отследить, как на конкретном поле изменяется конкретная культура в течение вегетационного периода.

Методика работы

Исследование проводилось с использованием данных, полученных в период с 17 мая по 30 сентября 2014 г.

После получения продукта MOD09Q1 по каждому снимку был рассчитан индекс NDVI. Для удобства в дальнейшей работе данные NDVI были объединены в одно многослойное изображение, где каждый слой представляет NDVI за конкретную дату съемки. На следующем этапе осуществлялось перепроецирование изображения из синусоидальной проекции в универсальную поперечную проекцию Меркатора и выделение фрагмента, соответствующего территории Сухобузимского района (рисунок).

Рис. Рабочая область, Сухобузимский район

Дальнейшая работа проводилась с данным фрагментом и векторной маской полей. Для каждой культуры были выбраны поля площадью более 200 га. Это сделано для того, чтобы можно было набрать некоторое количество пикселей данных NDVI, целиком лежащих внутри контура поля. Для анализа закономерности поведения различных культур использовались средние NDVI по каждому полю. Для выявления изменчивости растительного покрова поля в течение вегетационного периода учитывалось стандартное отклонение NDVI как показатель разброса значений относительно среднего значения.

В качестве инструмента использованы зональные статистки, а именно величины среднего (mean) и стандартного отклонения (standard deviation) NDVI; зоной выступало каждое отдельное поле.

Получены следующие результаты. По средним значениям NDVI:

1. Разделение культур по одному индексу NDVI не всегда возможно, следовательно, нужно вводить новые параметры.

2. Разделение злаковых культур лишь по индексу NDVI не представляется возможным, так как их вегетационные периоды и изменение вегетационного индекса схожи.

3. Пар легко выделяется в сравнении с полями, засеянными культурами, на графиках отчетливо видно падения индекса в последних числах июня и июля, что очень редко наблюдается на засеянных полях.

При анализе поведения стандартного отклонения NDVI можно предположить, как развивалась та или иная культура на определенном поле за весь вегетационный период; для интерпретации этих данных требуются дополнительные сведения о проводимых на полях агромероприятий.

Заключение

В работе обоснован выбор источника данных ДЗЗ для решения задачи оценки состояния и изменчивости спектральных характеристик – продукт MOD09Q1 спектрорадиометра MODIS, содержащий данные красного и ближнего ИК-диапазонов, с помощью которых были вычислены вегетационные индексы NDVI для территории Сухобузимского района. Использование данных с пространственным разрешением 250 м ограничивает количество с/х полей, которые могут участвовать в анализе, из-за их небольшого размера. Учитывались поля площадью не менее 200 га.

Проведен анализ изменения NDVI за вегетационный период 2014 г. для сельскохозяйственных полей Сухобузимского района. Показано, что одного вегетационного индекса недостаточно для разделения злаковых культур, хотя выделение паров возможно. Для оценки неоднородности растительного покрова предложено использование стандартного отклонения NDVI.

Развитие работы предполагает включение дополнительных параметров для описания изменения NDVI за вегетационный период, привлечение дополнительных наземных полевых данных, анализ данных за несколько вегетационных периодов.

Список литературы

1. 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 Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН. М., 2013. С. 65.

2. Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П. Изучение динамики NDVI посева сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и республики Хакасия. Красноярск, 2006.

3. Платонов А., Акрамова И. Классификация растительно-земельного покрова с использованием продуктов NDVI спутниковых снимков MODIS. М., 2009.

4. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, И.Ю. Савин, С.А. Исаев, И.А. Уваров. М., 2011.

УДК 528.88: 630*111: 630*113: 574.42

ДИНАМИКА ДРЕВОСТОЕВ В ЭКОТОНЕ АЛЬПИЙСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ ЗАПАДНОГО САЯНА

А. С. Шушпанов, И. А. Петров, В. И. Харук
Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
e-mail: alexandr01061987@gmail.com
e-mail: petrovilsoran@gmail.com
e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

STAND DYNAMICS IN THE ALPINE-TUNDRA ECOTONE OF WESTERN SAYAN

A. S. Shushpanov, I. A. Petrov, V. I. Kharuk
V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
e-mail: alexandr01061987@gmail.com
e-mail: petrovilsoran@gmail.com
e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

На основе временных рядов съемки Landsat выполнен анализ динамики древостоев на верхнем пределе произрастания (Западный Саян, Абаканский перевал). Установлено, что в последние десятилетия наблюдаются возрастание площади сомкнутых древостоев (~ 30 %) и продвижение по градиенту высоты их верхней границы. Рассмотрена связь этого явления с рельефом территории и изменениями климата.

Ключевые слова: изменения климата, съемка Landsat, горные леса, высотный предел древостоев, Западный Саян.

Введение

Леса являются динамической системой, развивающейся в пространстве и времени под влиянием различных факторов. В частности, горные леса являются индикатором климатических изменений. В экотоне горной лесотундры, где рост и развитие растений лимитируется температурой, реакция древесной растительности на изменения климата максимальна [1]. В последние десятилетия наблюдается продвижение древесной растительности в тундру, возрастание сомкнутости и увеличение радиального прироста древостоев [2–5].

Цель работы: анализ воздействия изменений климата на динамику древостоев на верхней границе произрастания.

Объект исследования. Древостои, сформированные сосной сибирской и лиственницей в экотоне горной лесотундры Западного Саяна (Абаканский перевал); анализируемая территория составляет ~ 90 000 га (рис. 1).

Материалы. Топокарты (М 1:100 000; 1975, 1985 гг.), снимки Landsat (Landsat-MSS, 1977 г.; Landsat 8, 2014 г.), данные полевых обследований (2012 и 2014 гг.), цифровая модель рельефа местности (ЦМР, формат SRTM).

Для анализа климатических изменений и трендов использовались данные о температуре, осадках и индекс сухости (SPEI) [6; 7], а также дендрохронологические данные. Общий объём выборки для дендрохронологического анализа составил 70 деревьев *Pinus sibirica*.

Методы

Контуры сомкнутых (сомкнутость крон >0,25) древостоев оцифрованы по топокартам. Обработка снимков выполнена в программном пакете Erdas Imagine.

Произведена топографическая нормализация яркости космоснимков методом С-коррекции [8]. Обучающие выборки сформированы по данным наземных обследований и топокарт. Выделены следующие классы: древостои, кустарники, травяные сообщества, минерализованные и водные поверхности. Классификационная картосхема древостоев получена методом максимального правдоподобия. Точность дешифрирования: 64 % … 75 %; величина каппа = 0,64…0,73. Анализ пространственно-временной динамики древостоев выполнен на основе картосхем и ЦМР (шаг по градиенту высоты 100 м; азимуты разделены на восемь частей). Дендрохронологический анализ проводился с применением стандартных дендрохнонологических методик [9; 10]. Качество перекрестной датировки оценивалось с помощью программы COFECHA [10]. Индексирование хронологий проводилось с помощью программы ARSTAN методом отрицательной экспоненциальной кривой или линейной регрессии [9].

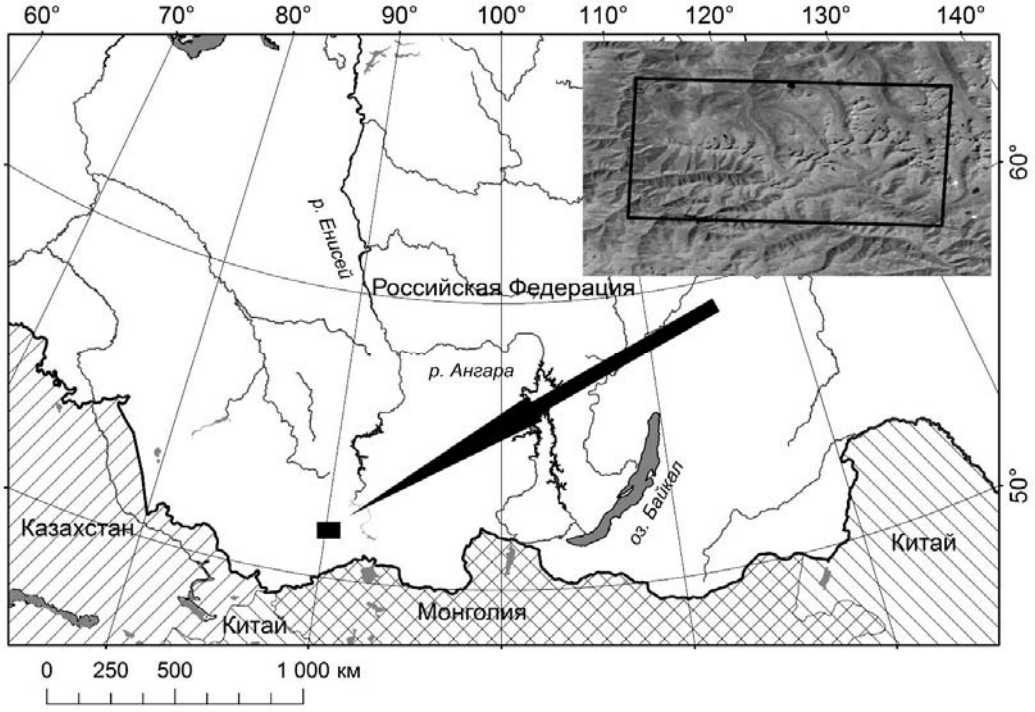


Рис. 1. Расположение объекта исследования (прямоугольник на вставке). Вставка: фрагмент снимка Landsat (1977 г.)

Результаты. В период с 1977 по 2014 г. в зоне альпийской лесотундры Саянского перевала наблюдалось увеличение площади сомкнутых древостоев (в 1,3 раза, с 29,5 тыс. га до 38,5 тыс. га, ~ 1 %/год). Наряду с возрастанием сомкнутости древостоев наблюдалось их продвижение по градиенту высоты (в среднем за весь период на ~1м/год). Величина продвижения была неоднородна по элементам рельефа (рис. 2) и составила 0,7 м/год для склонов южной экспозиции и ~1,1м/год для склонов северной. Кроме того, наблюдалось возрастание величины радиального прироста у деревьев кедра (рис. 2, *г*).

Анализ метеоданных на исследуемой территории выявил возрастающий тренд температур за последние 60 лет (рис. 3) для средних годовых, летних и зимних температур. Рост среднегодовой температуры за последние 100 лет для данной территории составил около 1,5 °С.

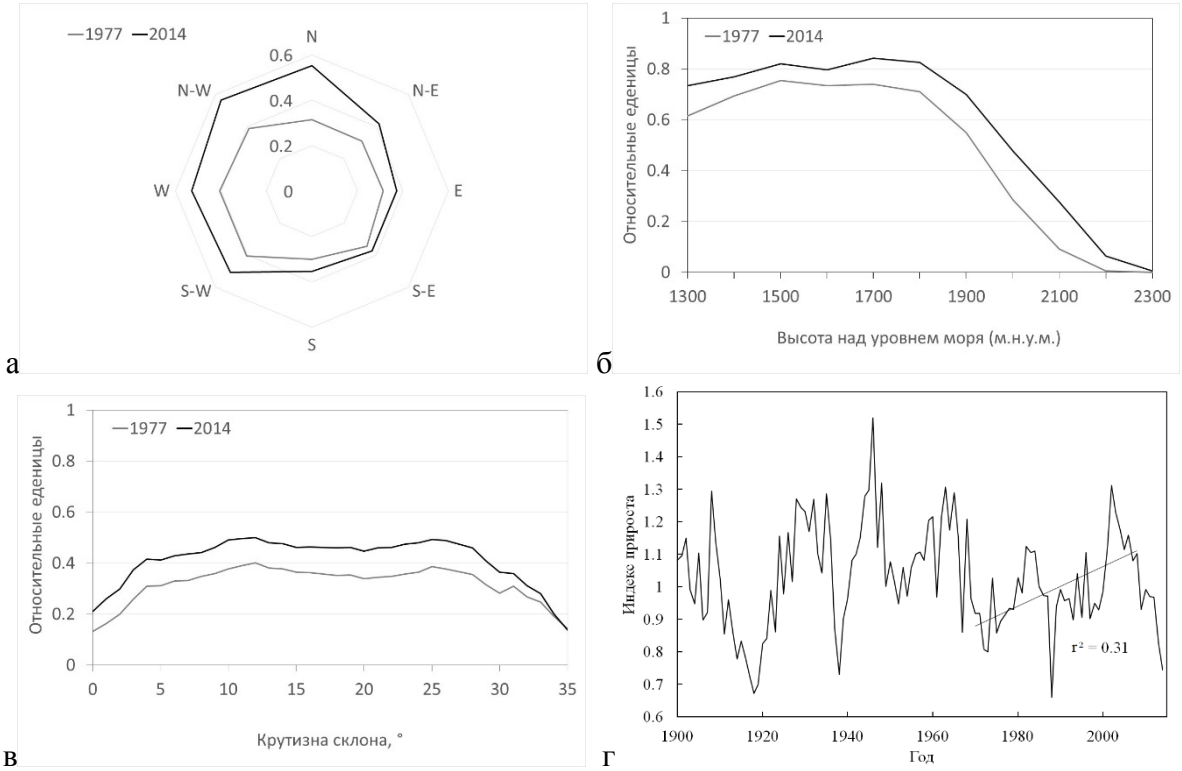


Рис. 2. Величина прироста площади древостоев по азимутам (а), высоте над уровнем моря (б) и крутизне склона (в), а также увеличения радиального прироста (г). Данные нормированы

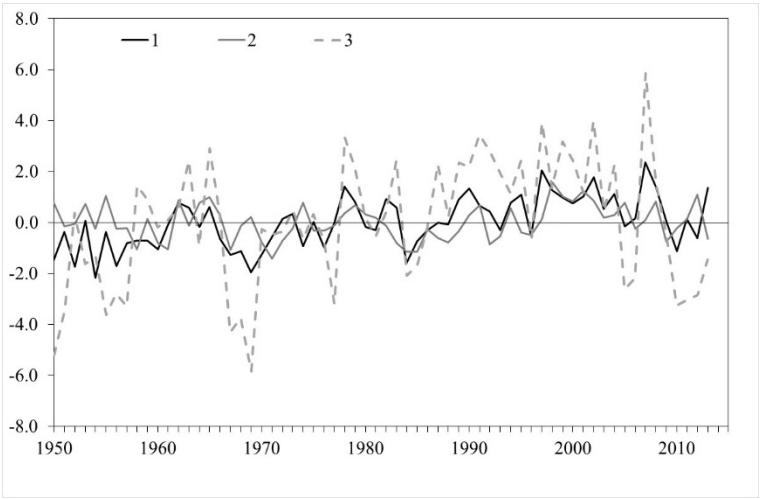


Рис. 3. Отклонение от средних температур:
1 – среднегодовая, 2 – среднелетняя, 3 – среднезимняя

Выводы

1. В экотоне горной лесотундры Западного Саяна в конце XX и начале XXI столетия наблюдается возрастание сомкнутости и продвижение границы древостоев по градиенту высоты.

2. Возрастание среднегодовой температуры на 1 °С способствует продвижению древостоев по градиенту высоты на ~70 м.

3. В экотоне альпийской лесотундры в последние десятилетия наблюдается климатически индуцированное увеличение радиального прироста кедра.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда по проекту № 14-24-00112.

Список литературы

1. Kharuk V., Ranson K., Im S., Oskorbin P., Dvinskaya M., Ovchinnikov D. 2013. Tree-Line Structure and Dynamics at the Northern Limit of the Larch Forest: Anabar Plateau, Siberia, Russia. ARCT ANTARCT ALP RES. 45 (4):526–537.

2. Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // Pages News. 2003. V. 11, № 1. P. 8–10.

3. Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T. & Dvinskaya M.L. Pinus sibirica and Larix sibirica response to climate change in southern Siberian alpine foresttundra ecotone // Scandinavian Journal of Forest Research. 2010a. 24. 130139.

4. Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T. & Vdovin A.S. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia // Global Ecology and Biogeography. 2010b. Vol. 19, Is. 6. P. 822–830.

5. Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L. Forest-tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia // Scandin. J. Forest Research. 2010c. P. 1–10.

6. CRU TS 3.21 dataset. http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__ACTIVITY_0c08abfc-f2d5-11e2-a948-00163e251233.

7. Higher Council for Scientific Research. (http://sac.csic.es/spei.)

8. Riano D., Chuvieco E., Salas J., and Aguado I. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41(5). P. 1056-1061. http://www.cstars.ucdavis.edu/~driano/Riano2003b.pdf

9. Cook E.R., Holmes R.L. 1986. User's manual for program Arstan. In: Holmes RL, Adams RK, Fritts HC, editors. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. P. 50–65.

10. Holmes R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-ring Bulletin. 44:69–75.

СПИСОК АВТОРОВ

Авласко П. В. 42
Алифер И. В. 50
Архипкин О. П. 235
Асмарян Ш. Г. 308
Асмус В. В. 3
Багаутдинов Р. С. 96
Байбикова Т. Н. 139
Балдина Е. А. 37
Барталев С. А. 8
Батырбаева М. Ж. 272
Безбородов В. Г. 12
Бекренев О.В. 50
Белов С. Ю. 101
Беляев Б. И. 16
Ботвич И. Ю. 239, 290
Бронов С. А. 42
Будник У. А. 342
Буряченко В. В. 105
Бучнев А. А. 3
Варейчук Н. С. 50
Варламова Е. В. 243
Витковская И. С. 272
Владимиров В. М. 20
Воронина П. В. 109
Гайнутдинова Г. Х. 113
Гиниятуллина О. Л. 46
Голюков А. С. 117
Гончаров А. К. 50
Горохова И. Н. 247
Гофаров М. Ю. 314
Гришанцева Л. А. 52
Грищенко М. Ю. 251
Гуземина Е. М. 318
Гук А. П. 25
Дагуров П. Н. 56, 120, 124
Данилова И. В. 169
Денисов П. В. 37
Дмитриев А. В. 124
Дмитриев Е. В. 129
Добронец Б. С. 135
Добрынин С. И. 56, 124
Доморацкий Е. П. 139, 143
Дубровская О. А. 207
Дунаева Е. А. 147
Евстратова Л. Г. 25
Евсюков А. А. 256
Емельянов А. А. 59
Емельянов К. С. 52
Захарков С. П. 222
Зверева А. Ю. 260
Зубкова К. И. 52
Иванов В. А. 16
Иванова К. А. 62
Иванова Ю. Д. 178, 290
Им С. Т. 117, 264
Казаков Э. Э. 151
Капитанов В. А. 50
Капралов Е. Г. 151
Карпенко Е. С. 155
Картушинский А. В. 268
Катаев М. Ю. 159, 162, 165
Катковский Л. В. 16
Кауазов А. М. 272
Кашкин В. Б. 278
Кихтенко В. А. 109
Князькин Ю. М. 20
Когутенко Л. В. 282
Козодеров В. В. 129
Кокарев А. Л. 282
Коновалов В. Г. 29
Копенков В. Н. 96
Корец М. А. 169
Кочергин Г. А. 33
Кочнев В. А. 286
Кочубей Л. К. 50
Кукоба Н. А. 290
Кулик Е. Н. 330, 346
Курако М. А. 174
Куревлева Т. Г. 52
Кутинов Ю. Г. 182
Куулар Х. Б. 293
Кушнырь О. В. 52
Ларько А. А. 178
Леженин А. А. 297
Лобанов Г. В. 260
Лобзенёв В. Н. 155
Логванёв И. Г. 155
Лукьянов А. К. 159, 162, 165
Лупян Е. А. 8
Лысаков М. А. 37
Маглинец Ю. А. 20, 226, 350
Маликова О. В. 62
Мамаш Е. А. 109
Маргарян В. Г. 301
Марков В. С. 52
Мартынов С. И. 50
Мартьянов А. С. 37
Мельников П. В. 190
Миков Л. С. 66
Минеев А. Л. 182

Молчанов А. С. 186
Мороз В. В. 50
Морозова А. Ю. 52
Мурадян В. С. 308
Муратова Н. Р. 272
Мышкин В. Н. 96
Никаноров А. М. 50
Никитин Р. М. 42
Никулин Н. А. 42
Новгородцева О. Г. 207
Носков М. В. 20, 226
Паниди Е. А. 151
Пасенюк А. А. 16
Пермитина Л. И. 52
Пестунов И. А. 190, 207
Петров И. А. 354
Поваляев В. А. 42
Полякова Е. В. 182, 314
Пономарев Е. И. 338
Пономаренко М. Р. 197
Попова О. А. 135
Попович В. Ф. 147
Потапов В. П. 46, 66
Прокушкин А. С. 169
Пуртов В. А. 318
Пучков М. Ю. 37
Пяткин В. П. 3
Рапута В. Ф. 230, 297, 322
Ремень Н. С. 318
Рогалев А. А. 200
Рогалев А. Н. 200
Рождественский А. С. 50
Романов А. Н. 69
Ромасько В. Ю. 20
Рублёв И. В. 326
Рублева Т. В. 278
Рудаков В. А. 29
Рыбина Т. А. 203
Рыжкова В. А. 169
Рылов С. А. 207
Сагатдинова Г. Н. 235
Сагателян А. К. 308
Сапрыкин Е. И. 73
Сахарова Е. Ю. 330
Сергеев В. В. 96
Сидорова В. С. 213
Симонов К. В. 174
Симонян Л. М. 301
Синявский Ю. Н. 207
Скачкова А. С. 80
Сладких Л. А. 330
Смирнов В. В. 109
Соловьев В. С. 243, 335
Сосенко В. А. 16
Спивак Л. Ф. 272
Степочкин И. Е. 222
Стыценко Ф. В. 8
Терехов А. В. 151
Ткачева А. А. 105, 218
Томилина А. И. 105
Томшин О. А. 335
Трибунский С. А. 96
Тришкин Б. В. 260
Трошко К. А. 37
Тутатчиков В. С. 84
Ужакина А. П. 260
Ульянченко М. Н. 42
Усатая Ю. О. 338
Усманова З. С. 282
Федоркова Ю. В. 59
Федотова Е. В. 264, 342, 350
Филькин К. Н. 50
Хазиева Е. С. 88
Харук В. И. 20, 117, 264, 354
Хвостов И. В. 69
Хомицевич А. Д. 16
Хорошилов А. А. 109
Цибульский Г. М. 20
Чернулич К. К. 251
Чимитдоржиев Т. Н. 124
Чистова З. Б. 182
Чубаров Д. Л. 109
Шагаев М. П. 73, 346
Шамбарова Ю. В. 222
Шатрова К. В. 226
Швецов Е. Г. 338
Шевырногов А. П. 20, 178, 239
Шестерова И. Н. 282
Шукилович А. Ю. 350
Шушпанов А. С. 354
Якубайлик О. Э. 92
Ярославцева Т. В. 230, 297, 322

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 3

Жёсткая и нечёткая кластеризация данных дистанционного зондирования Земли 3
Асмус В. В., Бучнев А. А., Пяткин В. П.

Спутниковый мониторинг пирогенной гибели лесов России 8
Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Лупян Е. А.

Об организации и опыте использования результатов космической деятельности в Российской Федерации 12
Безбородов В. Г.

Аппаратно-программный комплекс спектральной аппаратуры оптического диапазона для наземной калибровки космических съемочных систем 16
Беляев Б. И., Сосенко В. А., Катковский Л. В., Хомицевич А. Д., Иванов В. А., Пасенюк А. А.

Космический мониторинг в Красноярском крае, этапы становления, перспективы развития 20
Владимиров В. М., Князькин Ю. М., Маглинец Ю. А., Носков М. В., Ромасько В. Ю., Харук В. И., Цибульский Г. М., Шевырногов А. П.

Новые методы и технологии автоматизированного дешифрирования многоспектральных космических снимков высокого разрешения 25
Гук А. П., Евстратова Л. Г.

Дистанционное определение резервного объема прорывоопасных высокогорных озер 29
Коновалов В. Г., Рудаков В. А.

Опыт и перспективы использования результатов космической деятельности в Ханты-Мансийском автономном округе 33
Кочергин Г. А.

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» 37

Применение спутниковых радиолокационных данных для оценки состояния сельскохозяйственных угодий дельты Волги 37
Балдина Е. А., Денисов П. В., Лысаков М. А., Мартьянов А. С., Пучков М. Ю., Трошко К. А.

Прецизионные электроприводы космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли 42
Бронов С. А., Никулин Н. А., Авласко П. В., Поваляев В. А., Никитин Р. М., Ульянченко М. Н.

Оценка ненарушенных земель территорий с высокой антропогенной нагрузкой по данным дистанционного зондирования 46
Гиниятуллина О. Л., Потапов В. П.

Возможности и технические решения региональной станции космической связи СКС-ОМЗ № 2 в составе центра приема и контроля качества космической информации (ЦПО и КККИ) 50
Гончаров А. К., Варейчук Н. С., Никаноров А. М., Алифер И. В., Филькин К. Н., Кочубей Л. К., Бекренев О.В., Капитанов В. А., Мартынов С. И., Рождественский А. С., Мороз В. В.

Возможности современных российских космических средств ДЗЗ по обеспечению регионального мониторинга 52
Гришанцева Л. А., Емельянов К. С., Зубкова К. И., Куревлева Т. Г., Кушнырь О. В., Марков В. С., Морозова А. Ю., Пермитина Л. И.

Устройство для автоматизированной регистрации шероховатости земных покровов 56
Добрынин С. И., Дагуров П. Н.

Информационный ресурс российской орбитальной группировки в интересах поддержки РСЧС 59
Емельянов А. А., Федоркова Ю. В.

Технология комплексной обработки геопространственных данных для мониторинга последствий чрезвычайных ситуаций 62
Иванова К. А., Маликова О. В.

Применение технологии SBAS для определения деформаций земной поверхности (на примере Кузбасса) 66
Потапов В. П., Миков Л. С.

Алгоритм дистанционного определения влажности засоленных почв с использованием данных спутника SMOS 69
Романов А. Н., Хвостов И. В.

Использование спутниковых технологий для мониторинга состояния атмосферы на примере продуктов, полученных на основе данных прибора OMPS космического аппарата SUOMI NPP 73
Сапрыкин Е. И., Шагаев М. П.

Опыт использования данных дистанционного зондирования для картографирования среды обитания охотничьих ресурсов 80
Скачкова А. С.

Параллельная версия n-мерного алгоритма быстрого преобразования Фурье 84
Тутатчиков В. С.

ГИС моделирование трансформации структуры землепользования ландшафтов мира 88
Хазиева Е. С.

Формирование региональной инфраструктуры пространственных данных 92
Якубайлик О. Э.

Секция «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» 96

Применение данных ДЗЗ различного разрешения для выявления курганных могильников 96
Багаутдинов Р. С., Копенков В. Н., Мышкин В. Н., Сергеев В. В., Трибунский С. А.

О некоторых характеристиках рассеивающей способности земной поверхности при дистанционном зондировании в коротковолновом диапазоне радиоволн 101
Белов С. Ю.

Разработка программного обеспечения стабилизации видеопоследовательностей в системах технического зрения 105
Буряченко В. В., Ткачева А. А., Томилина А. И.

Выявление аномалий температуры поверхности Земли по данным дистанционного зондирования 109
Воронина П. В., Мамаш Е. А., Чубаров Д. Л., Кихтенко В. А., Смирнов В. В., Хорошилов А. А.

Бассейновый подход к оценке геоэкологической ситуации: на примере бассейна реки Тагил 113
Гайнутдинова Г. Х.

Гравиметрический анализ водного баланса бассейна озера Байкал 117
Голюков А. С., Им С. Т., Харук В. И.

Приближенный метод расчета отражения сферической волны от двухслойной среды 120
Дагуров П. Н.

Фазовая структура поля микроволн, отраженных и рассеянных слоистой средой 124
Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Чимитдоржиев Т. Н.

Эффективность классификаторов в задаче тематической обработки гиперспектральных изображений 129
Дмитриев Е. В., Козодеров В. В.

Новые подходы к обработке данных на основе численного вероятностного анализа 135
Добронец Б. С., Попова О. А.

О выборе ракурсов проекционных изображений при реконструктивном контроле размеров и формы трехмерных объектов 139
Доморацкий Е. П., Байбикова Т. Н.

Метод дистанционного контроля геометрических характеристик движущихся объектов по их дискретным импульсным изображениям 143
Доморацкий Е. П.

Оценка водообеспеченности сельских территорий с использованием ДЗЗ, ГИС и стандартизированного индекса осадков 147
Дунаева Е. А., Попович В. Ф.

Расширение стандарта WPS для обеспечения технологии обработки данных дистанционного зондирования на стороне клиента с использованием веб-сервисов 151
Казаков Э. Э., Капралов Е. Г., Паниди Е. А., Терехов А. В.

Опыт и перспективы повышения качества материалов космической съемки с российских КА 155
Карпенко Е. С., Лобзенёв В. Н., Логванёв И. Г.

Модификация метода эмпирических ортогональных функций для решения обратной задачи восстановления общего содержания CO_2 159
Катаев М. Ю., Лукьянов А. К.

Результаты восстановления содержания CO_2 над территорией США методом эмпирических ортогональных функций 162
Катаев М. Ю., Лукьянов А. К.

Результаты восстановления содержания CH_4 над территорией США методом эмпирических ортогональных функций 165
Катаев М. Ю., Лукьянов А. К.

Методика автоматизированного картографирования растительности по материалам космической съемки и цифровой модели рельефа местности 169
Корец М. А., Рыжкова В. А., Данилова И. В., Прокушкин А. С.

Геометрический анализ пространственных данных о проявлениях природных катастроф 174
Курако М. А., Симонов К. В.

Анализ нелинейных трендов чистой первичной продукции растительности по спутниковым данным 178
Ларько А. А., Иванова Ю. Д., Шевырногов А. П.

Методика построения цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 182
Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В.

Анализ возможности использования показателя цветового различия при оценке фотоизображений в практике летных испытаний 186
Молчанов А. С.

Схема и методы классификации гиперспектральных изображений на основе спектральной и пространственной информации 190
Пестунов И. А., Мельников П. В.

Совершенствование методики обновления крупномасштабных карт с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий 197
Пономаренко М. Р.

Гарантированные оценки безопасного функционирования систем и техническая устойчивость 200
Рогалев А. Н., Рогалев А. А.

Оценка площадей пожаров на территории Томской области: методический подход, оценка ущерба 203
Рыбина Т. А.

Технология обработки данных с космических аппаратов «КАНОПУС-В», «РЕСУРС-П» и «МЕТЕОР-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации 207
Рылов С. А., Новгородцева О. Г., Пестунов И. А., Дубровская О. А., Синявский Ю. Н.

Гистограммная кластеризация данных дистанционного зондирования Земли 213
Сидорова В. С.

Локализация крон деревьев на основе данных лазерного сканирования и аэрофотоснимков 218
Ткачева А. А.

Верификация VGPM (вертикально обобщенной модели производства) первичной продукции в северо-западной части Японского моря 222
Шамбарова Ю. В., Степочкин И. Е., Захарков С. П.

Применение МТ-графа для организации области поиска в задаче оценивания земель сельскохозяйственного назначения 226
Шатрова К. В., Носков М. В., Маглинец Ю. А.

Анализ данных наземных и спутниковых наблюдений пылевого загрязнения снежного покрова 230
Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф.

Секция «МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ» 235

Использование оптических и радарных ДДЗ в космическом мониторинге паводков в Казахстане 235
Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н.

Изучение начала вегетации наземных экосистем Красноярского края на основе спутниковой информации 239
Ботвич И. Ю., Шевырногов А. П.

Исследования вариаций индекса NDVI растительного покрова Восточной Сибири по многолетним спутниковым данным 243
Варламова Е. В., Соловьев В. С.

Дистанционный мониторинг экологического состояния почвенно-растительного покрова урбанизированной экосистемы 247
Горохова И. Н.

Расчёт значений температуры воздуха по значениям температуры земной поверхности, полученным по тепловым снимкам (на примере Южно-Курильского района) 251
Грищенко М. Ю., Чернулич К. К.

Методы и средства мониторинга гидрологической обстановки и моделирования затоплений 256
Евсюков А. А.

Закономерности распределения NDVI в агроландшафтах Брянской области 260
Зверева А. Ю., Лобанов Г. В., Тришкин Б. В., Ужакина А. П.

Водный баланс бассейна р. Подкаменная Тунгуска по спутниковым данным GRACE 264
Им С. Т., Федотова Е. В., Харук В. И.

Градиентные характеристики поверхности Земли для спутникового мониторинга природной среды 268
Картушинский А. В.

Потенциал применения Казахстанской космической системы дистанционного зондирования Земли для мониторинга засух 272
Кауазов А. М., Батырбаева М. Ж., Витковская И. С., Муратова Н. Р., Спивак Л. Ф.

Озонная аномалия 2011 г. в северном полушарии по данным спутника AURA .. 278
Кашкин В. Б., Рублева Т. В.

Мониторинг горного оледенения по данным дистанционного зондирования Земли на примере Казахстанской части Джунгарского Алатау 282
Кокарев А. Л., Когутенко Л. В., Усманова З. С., Шестерова И. Н.

Изменение магнитного поля Земли и возможные причины этого явления 286
Кочнев В. А.

Использование вегетационных индексов для мониторинга техногенного влияния промышленного центра на состояние пригородной растительности (г. Красноярск) 290
Кукоба Н. А., Ботвич И. Ю., Иванова Ю. Д.

Особенности хребта Уюкский по снимкам Landsat 293
Куулар Х. Б.

Изучение динамики выпадений аэрозольных примесей на основе спутниковых данных 297
Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.

Особенности пространственно-временного распределения градобития и основные задачи рационального управления на территории Республики Армения 301
Маргарян В. Г., Симонян Л. М.

Мониторинг состояния растительности в Армении с помощью дистанционных технологий 308
Мурадян В. С., Асмарян Ш. Г., Сагателян А. К.

Выявление эрозионной активности карстовых северотаежных ландшафтов на основе цифрового моделирования рельефа 314
Полякова Е. В., Гофаров М. Ю.

Мониторинг нарушенных земель на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югра с помощью данных дистанционного зондирования Земли 318
Пуртов В. А., Ремень Н. С., Гуземина Е. М.

Численная реконструкция следов аэрозольных выпадений радионуклидов с использованием аэрогаммасъёмок территорий 322
Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.

Спутниковый мониторинг пожароопасной ситуации в Сибирском федеральном округе 326
Рублёв И. В.

Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур юга Западной Сибири 330
Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Кулик Е. Н.

Исследование вариаций облачности в северном полушарии во время Форбуш-понижений потока космических лучей 335
Томшин О. А., Соловьев В. С.

Дистанционные данные в оценке характеристик лесных пожаров Сибири 338
Усатая Ю. О., Пономарев Е. И., Швецов Е. Г.

Пространственно-временная динамика повреждения темнохвойных лесов сибирским шелкопрядом 342
Федотова Е. В., Будник У. А.

Мониторинг паводковой обстановки методом ДЗЗ и оценка возможностей использования для мониторинга данных прибора MODIS на примере паводка на реке Чулым весной 2014 г. 346
Шагаев М. П., Кулик Е. Н.

Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения 350
Шукилович А. Ю., Федотова Е. В., Маглинец Ю. А.

Динамика древостоев в экотоне альпийской лесотундры Западного Саяна 354
Шушпанов А. С., Петров И. А., Харук В. И.

Список авторов 358

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы II Международной научной конференции,
22–25 сентября 2015, г. Красноярск

Подготовлено к публикации БИК СФУ
Печатается в авторской редакции
Компьютерная верстка: Т.М. Бовкун

Подписано в печать 01.09.2015. Печать плоская
Формат 60x84/8 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 42,54
Тираж 150 экз. Заказ № 2630

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