

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

*При финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований  
и Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки  
научной и научно-технической деятельности,  
проект № 17-45-241010*

## **РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Материалы IV Международной научной конференции  
Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.

Научный редактор  
*Е. А. Ваганов*

Красноярск  
СФУ  
2017

УДК 528.8(063)  
ББК 26.0с51я43  
Р326

**Редакционная коллегия:**

*Е. А. Ваганов* (науч. ред.), доктор биологических наук, профессор, академик РАН, и. о. ректора СФУ; *Г. М. Цибульский* (отв. ред.), доктор технических наук, профессор, директор Института космических и информационных технологий СФУ, заведующий кафедрой систем искусственного интеллекта; *М. В. Носков*, доктор физико-математических наук, профессор; *В. Б. Кашкин*, доктор технических наук, профессор; *В. И. Харук*, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформационных систем Института космических и информационных технологий СФУ; *Ю. А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель научно-учебной лаборатории «Информационная поддержка космического мониторинга» Института космических и информационных технологий СФУ

Р326 **Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли** : материалы IV Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 324 с.

ISBN 978-5-7638-3728-5

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

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

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

**УДК 528.8(063)**  
**ББК 26.0с51я43**

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

ISBN 978-5-7638-3728-5

© Сибирский федеральный университет, 2017

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 528.8

**О. П. Архипкин, Б. Э. Бекмухамедов, Г. Н. Сагатдинова**

Национальный центр космических исследований и технологий,  
Алма-Ата, Казахстан; e-mail: oarkhipkin@rambler.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДАРНЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧС**

Описано использование радарных двухполяризационных космоснимков SENTINEL-1 в различных задачах космического мониторинга ЧС, включая мониторинг схода снежного покрова, прохождения паводковых вод, оценка пострадавших от пожаров площадей и детектирование нефтяных загрязнений на поверхности Каспийского моря. При этом рассмотрены возможности использования поляризационных свойств этих данных.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, чрезвычайные ситуации, паводки, зоны затопления, радарные данные, пострадавшие от пожаров площади, нефтяные разливы.*

### **Введение**

Главными задачами космического мониторинга ЧС, которым наша организация занимается уже более 15 лет, являются мониторинги паводков и пожаров. В свою очередь, мониторинг паводков включает задачи оперативной динамики схода снежного покрова и прохождения паводковых вод, а мониторинг пожаров – задачи оперативного определения очагов пожаров и оценки площадей, пострадавших от пожаров. Отдельной задачей выделяется космический мониторинг динамики заполнения важнейших водохранилищ, а также ряда других водных объектов.

Решение этих задач осуществляется в трех уровнях. На первом на основе данных низкого разрешения получается ежедневная оперативная информация о ситуации с ЧС и отслеживается динамика ее развития на всей территории республики. На следующем уровне проводится детализация ситуации для отдельных регионов с использованием данных среднего разрешения, получаемых периодически. Еще более детальная информация формируется на третьем уровне для небольших по площадям территорий на основе космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения, использование которых требует существенных финансовых средств. В критических случаях для этих целей возможно привлечение ДДЗ соответствующих международных организаций, поставляющих их бесплатно.

Первоначально космический мониторинг ЧС базировался на данных первого уровня, два других использовались нерегулярно в качестве вспомогательных или в особых случаях. В настоящее время на регулярной основе проводится мониторинг и на втором уровне. Это стало возможным после появления в свободном доступе оптических данных Landsat-8 и Sentinel-2 A, а также радарных данных Sentinel-1 A и Sentinel-1 B (в текущем году). Это существенно повысили информационность

космического мониторинга ЧС. Так, к примеру, пострадавшие от пожаров площади теперь оцениваются главным образом по данным среднего разрешения.

Важную роль в повышении информативности играют и радарные данные, особенно при мониторинге паводков. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что на них слабо влияет как время суток, так и наличие любой облачности. С другой стороны, особенности структуры данных Sentinel-1 (двойная поляризация, наличие фазовой составляющей) позволяют также проводить дополнительные исследования подстилающей поверхности.

### **Возможности использования космоснимков Sentinel-1 при мониторинге паводков**

Слабая чувствительность к облачности и времени суток, регулярность, достаточно хорошее пространственное разрешение (25 м) радарных данных Sentinel-1 A/B, а также наличие свободного доступа к ним позволяют значительно повысить уровень космического мониторинга прохождения паводковых вод и наводнений. Наличие двойной поляризации (VV/VH) с амплитудными и фазовыми составляющими расширяют возможности детектирования зон затопления, а также позволяют получить дополнительную информацию о состоянии и развитии паводковой ситуации [1; 2].

Для выделения водных поверхностей две поляризации позволяют проводить их совместный анализ, рассматривать различные их комбинации, использовать амплитудные и фазовые поляриметрические методы, включая текстурный и фазовый анализ. Данный анализ дает возможность выделить такие объекты в зонах затопления, как затопленные растительность, различные объекты инфраструктуры (здания, дороги, линии электропередач и др.), а также разделить влажные почвы и затопленные территории.

Особенности радарной съемки в С-диапазоне позволяют использовать данные Sentinel-1 для определения начала таяния снежного покрова и определения степени содержания воды в нем. Алгоритм распознавания зон снеготаяния по радарным данным состоит из трех основных этапов. На первом этапе происходит создание базового изображения, которое формируется на основе усреднения всех полученных снимков исследуемой подстилающей поверхности в зимний период существования устойчивого снежного покрова с сухим снегом без зон снеготаяния. Усреднение состоит в вычислении среднего арифметического значения в каждом пикселе для всех снимков за этот период.

На следующем этапе определяется параметр Ratio, который вычисляется в каждом пикселе и представляет собой отношение значений в этом пикселе для текущего снимка с влажным снежным покровом и базового снимка, созданного на предыдущем этапе. На третьем и последнем этапе формируются карты зон снеготаяния на основе классификации с использованием пороговых значений, которые позволяют выделить эти зоны и оценить степень содержания воды в снеге.

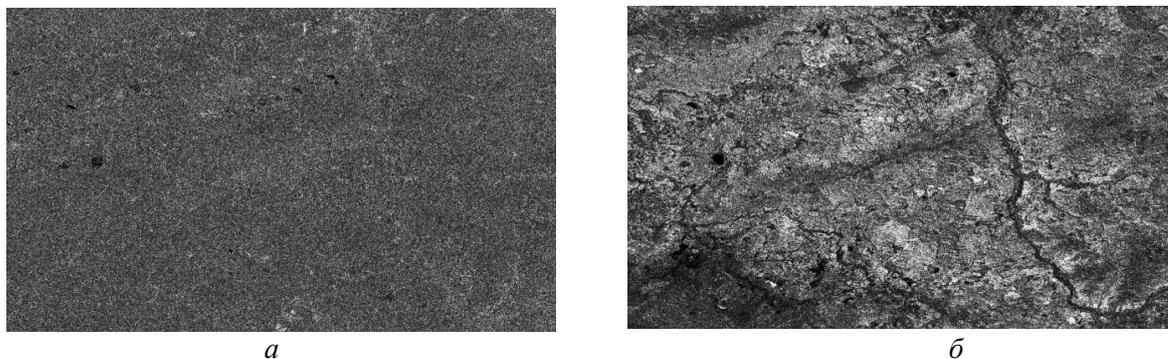
На рис. 1 представлена работа алгоритма распознавания зон снеготаяния. Вычисления параметра Ratio при снежном покрове с сухим снегом дают темно-серую поверхность (рис. 1, а), а при наличии воды в снеге поверхность светлеет (рис. 1, б). И чем больше воды в снеге, тем светлее поверхность. В тех местах, где образуется водная поверхность, изображение становится темным.

### **Место данных Sentinel-1 в других задачах космического мониторинга ЧС**

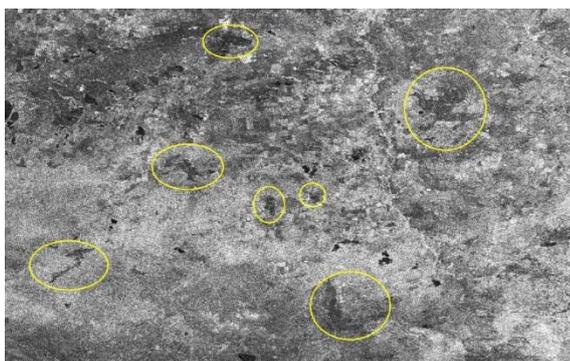
*Мониторинг пожаров.* В этом случае радарные данные Sentinel-1 могут использоваться только для определения площадей, пострадавших от пожаров. Для этих целей они применяются как вспомогательные, так как в настоящее время такие площади определяются раз в декаду по оптическим данным Landsat-8 и Sentinel-2 A. При этом в случае постоянной облачности или дымки возможен сдвиг в их определении на несколько декад. Площади в отличие от очагов длительно сохраняются

на космонимках и поэтому все они будут в конце концов зафиксированы. Радарные данные могут быть полезны, когда возникает необходимость оперативно отследить результаты пожаров при наличии облачности.

При радарной съемке наблюдается такое интересное явление. Так как снежный покров прозрачен для неё, то на снимках в период наличия снежного покрова можно фиксировать площади, пострадавшие осенью от пожаров (рис. 2). Здесь отметим, что в январе 2017 года на территории Карагандинской области наблюдался устойчивый снежный покров.



**Рис. 1. Оценка степени содержания воды в снежном покрове с помощью параметра Ratio по радарным снимкам Sentinel 1B за 16 марта (а) и 9 апреля (б) 2017 года**



**Рис. 2. Пострадавшие от пожара площади (выделены кругом), зафиксированные на территории Карагандинской области на снимке Sentinel 1B за 3 января 2017 года, которые также были зафиксированы на снимке Landsat-8 за 27 сентября 2016 года**

*Детектирование нефтяных slickов на водной поверхности.* В этой задаче главным объектом наблюдения является акватория Каспийского моря, в регионе которого резко возросла интенсивность добычи и перевозки нефти. Радарные данные всегда являлись основными источниками информации при детектировании нефтяных slickов. Оптические данные также применяются для этих целей, но все равно проблемы в пространственно-временном аспекте покрытия контролируемой территории мониторингом остаются. Это обусловлено тем, что только данные МОДИС являются ежедневными, но их применение ограничено как вследствие малого разрешения, пригодного только для детектирования крупных нефтяных разливов, так и частого наличия облачности над исследуемым регионом. В этом смысле регулярное использование радарных данных Sentinel-1 A/B усиливают возможности мониторинга нефтяных slickов и в пространственном, и во временном аспектах, так как позволяют охватить мониторингом большие территории и в большем временном интервале.

Исследования статистическими методами с использованием программного пакета Statistica зависимости величины амплитуды обратного рассеяния от угла съемки для нефтяных slickов, slickов другой природы и чистой водной поверхности показали

значительное превышение амплитуд VV над амплитудами VH для нефтяных slickов, только для углов съемки больше 42,5 градуса они сближаются. Амплитудная зависимость от угла съемки для воды, нефтяных slickов и slickов другой природы для поляризации VH показывает, что в большинстве случаев возникают сложности по использованию поляризации VH для идентификации нефтяных slickов. Однако бывают случаи, когда все эти объекты разделяются. В этих случаях можно использовать VH для идентификации нефтяных slickов. Вследствие сказанного выделение нефтяных загрязнений проводится главным образом на основе анализа поляризации VV стандартными амплитудными методами.

Для полнополяризационных радарных данных вводят такой поляризационный параметр как Conformity Coefficient (коэффициент соответствия), который формируется из матрицы рассеяния с учетом фаз всех четырех поляризаций для каждого пикселя. Этот параметр используется для определения slickов и оценки толщины нефтяных пленок [3]. Для радарных данных Sentinel-1 предлагается для качественной оценки толщины пленки использовать параметр угол поворота плоскости поляризации ( $\alpha$ -угол), формируемый на основе фазовой информации двух поляризационных данных. В качестве проверки такой возможности сравнили оценку толщины пленки по  $\alpha$ -углу для поляризаций VV и VH и по Conformity Coefficient – для 4-го поляризационного снимка UAVSAR за 9 июня 2015 года фрагмента Северного моря. Этих два случая получили практически идентичные оценки.

### **Заключение**

1. Радарные данные Sentinel-1 позволили улучшить эффективность и информативность космического мониторинга паводков как за счет своих технических особенностей (независимость от погодных условий и времени суток, регулярность, хорошее пространственное разрешение), так и за счет использования их поляриметрических свойств (две поляризации, наличие фазовой информации).

2. При космическом мониторинге пожаров космоснимки Sentinel-1 дают возможность отследить развитие динамики пострадавших от пожаров площадей в условиях высокой облачности.

3. При проведении космического мониторинга нефтяных разливов данные Sentinel-1 позволяют улучшить его пространственную и временную составляющие. Наличие двойной поляризации пока не дает новых явных возможностей получения дополнительной информации при выделении нефтяных загрязнений, хотя возможно в дальнейшем такая возможность появиться.

### **Список литературы**

1. Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н. Использование различных оптических и радарных данных дистанционного зондирования при оперативном космическом мониторинге паводков в Казахстане // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2016. Т. 9, № 7. С. 1045–1058.

2. Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н. Использование поляриметрических радарных данных при космическом мониторинге паводков и наводнений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. ст. М: ИКИ РАН, 2017. Т. 14, № 2. С. 175–184.

3. Mapping sea surface oils slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR Image / B. Zhang, W. Perrie, L. Xiaofeng, W. Pichel // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. L10602. P. 1–5.

**А. А. Бучнев, В. П. Пяткин**

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирск; e-mail: baa@ooi.sccc.ru, pvp@ooi.sccc.ru

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**A. A. Buchnev, V. P. Pyatkin**

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

## **CLASSIFICATION OF THE HYPERSPECTRAL DATA OF THE EARTH REMOTE SENSING**

Рассматривается система классификации гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включающая автоматическую (кластерный анализ) и контролируруемую классификации. Оценивается применимость классификатора Байеса для нормально распределенных векторов признаков к обработке этих данных. Описана реализация классификатора спектрально-углового картирования.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектральные данные, кластерный анализ, алгоритм K-средних, классификация с обучением, классификатор Байеса, классификатор спектрально-углового картирования.*

Эффективность дистанционных исследований Земли из космоса во многом определяется используемыми методами обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Функциональные возможности разработанного в ИВМиМГ СО РАН совместно с ФГБУ «НИЦ "Планета"» Росгидромета РФ программного комплекса PlanetaMonitoring для обработки данных ДЗЗ дают возможность использовать при их обработке практически функционально полный набор операций [1]. Программный комплекс PlanetaMonitoring реализует технологии предварительной и тематической обработки многоспектральных (МС) данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. В настоящее время на орбитах находится более ста космических аппаратов ДЗЗ, большая часть которых оснащена МС сканерами, позволяющими получать МС изображения с высоким (0,3–10 м) пространственным разрешением и с небольшим количеством спектральных каналов. В последние годы в практику ДЗЗ активно внедряется гиперспектральная (ГС) аппаратура, спутники оснащаются ГС сканерами, обеспечивающими съёмку в видимом и инфракрасном диапазонах спектра [2; 3]. Отличительной особенностью ГС изображений является их низкое пространственное разрешение (несколько десятков метров) и высокое спектральное разрешение (несколько сотен, а в перспективе – несколько тысяч каналов). Определённый импульс исследованиям по созданию алгоритмов, методов и технологий для обработки ГС спутниковых данных в нашей стране был получен в связи с успешным запуском в последние годы российских космических аппаратов, оснащенных ГС аппаратурой. Это спутники серии «Ресурс-П» № 1, № 2 и № 3 (запущен 13.03.2016). Спутник оснащён МС сканером (пространственное разрешение 3 м, 5 каналов в диапазоне 0,45–0,9 мкм

и в панхроматическом режиме (0,58–0,8 мкм – 0,9 м) и ГС сканером (пространственное разрешение 30 м, до 255 каналов со спектральным разрешением 5–10 нм в диапазоне 0,4–1,1 мкм). Цель настоящего исследования – оценить возможность использования системы классификации (контролируемой и неконтролируемой), реализованной в программном комплексе PlanetaMonitoring, в классификации ГС данных ДЗЗ.

Известно, что непосредственное использование традиционных алгоритмов для обработки данных ГС сканеров приводит к определенным трудностям, связанным с большой размерностью векторов измерений [3]. В рамках создания программного комплекса PlanetaMonitoring по обработке данных ДЗЗ была разработана система классификации, включающая классификацию с обучением (контролируемую классификацию) [4] и автоматическую классификацию (кластерный анализ) [5]. Контролируемая классификация реализует стратегию максимального правдоподобия Байеса для нормально распределенных векторов признаков в классах. Оценки параметров классификатора (векторов средних и ковариационных матриц в классах) получаются на основе обучающих выборок. В основе кластерного анализа лежит использование алгоритма К-средних.

Эти классификаторы, разработанные для обработки данных ДЗЗ с относительно небольшим количеством спектральных диапазонов (МС данные), были достаточно легко адаптированы для обработки ГС образов, полученных сканерами с высоким спектральным разрешением. Однако такое прямое использование классификаторов сопровождается следующими негативными обстоятельствами:

1. Высокие вычислительные затраты, обусловленные большой размерностью векторов признаков  $N$  (например, сканер ГСА спутника Ресурс-П № 3 имеет  $N = 255$  спектральных канала). Расстояние Махалонобиса, используемое для оценки близости векторов признаков к центрам классов, является значением квадратичной формы с весовой матрицей размерности  $N \times N$ . Расстояние Махалонобиса является также одним из типов метрик, используемых нами в реализации алгоритма К-средних.

2. Для классификации с обучением требуются большие объемы обучающих данных. Чтобы избежать сингулярностей при вычислении матриц, обратных к ковариационным, минимальный объем обучающих выборок в классах должен равняться  $N+1$  вектору. Известно, что для получения хороших оценок ковариационных матриц в мультиспектральных данных ( $N \sim 10$ ) объем обучающей выборки  $V$  в классе должен быть таким, чтобы выполнялось следующее условие для соотношения размерности:  $V/N > = 100$  [6]. Ясно, что для выполнения подобного условия в ГС данных ( $N \sim 100$ ) объем обучающей выборки должен быть увеличен не менее чем на порядок.

Этих затруднений можно избежать путем извлечения из ГС данных признаков, позволяющих построить набор векторов, размерность которых соответствует размерности МС образа. С этой целью полный набор спектральных диапазонов разбивается на блоки (соседние блоки могут пересекаться), каждый из которых представлен в результирующем векторе признаков одним значением. Это значение может быть: 1) средним по блоку; 2) максимальным в блоке; 3) главной компонентой в блоке; 4) центральным в блоке. Кроме того, предоставляется возможность выбора главных компонент исходного набора ГС векторов данных в соответствии с упорядоченной по убыванию последовательностью собственных чисел ковариационной матрицы. Количество выбираемых главных компонент определяется суммарной дисперсией.

К полученному таким образом МС образу в полной мере применимы функции системы контролируемой классификации программного комплекса PlanetaMonitoring. Хотя подобное снижение размерности ГС образов используется достаточно часто (см., например, [7]), применять его следует с осторожностью из-за возможных потерь

полезной информации. В частности, метод главных компонент, являясь линейным преобразованием, может разрушать нелинейности, присутствующие в данных [8].

В последнее время в состав системы контролируемой классификации комплекса PlanetaMonitoring нами включен еще один классификатор: классификатор спектрально-углового картирования [9]. Первоначально разработанный специально для классификации ГС данных этот классификатор не содержит какой-либо специфики этих данных и может быть использован для классификации и МС данных. В качестве расстояния  $\rho(x, y_i)$  вектора признаков  $x$  до прототипа  $y_i$  класса  $i$  используется угловое расстояние:

$$\rho(x, y_i) = \arccos\left(\frac{x^T y_i}{\|x\| \cdot \|y_i\|}\right).$$

Вектор  $x$  зачисляется в класс, для которого угловое расстояние  $\rho(x, y_i)$  является минимальным. В качестве прототипов классов (ссылочных векторов) авторы алгоритма [8] используют библиотеку лабораторных спектров. Мы в своей реализации алгоритма в качестве прототипов классов используем векторы средних, полученных на основе обучающих и контрольных выборок классов. Для работы с обучающими и контрольными полями используется тот же инструментарий, что и для классификатора Байеса [4]. Классификатор работает в двух режимах: тестовом и рабочем. По результатам тестового режима вычисляется вероятность правильной классификации и строится матрица ошибок. Анализируя соответствующие показатели и выполняя при необходимости корректировки обучающих выборок классов, можно добиться необходимого уровня правильной классификации. В рабочем режиме классификатор обрабатывает весь набор данных, используя построенные прототипы классов. При этом может использоваться заданное пороговое значение угла  $\alpha$ : если для вектора признаков  $x$  минимальное значение угла  $\min_i \rho(x, y_i) > \alpha$ , то этот вектор заносится в класс отклоненных векторов.

Для вычислительных экспериментов использовался один из файлов известного набора данных спектрометра AVIRIS [10]. Размер файла  $614 \times 2678$ , размерность векторов измерений 210. Из этого файла были сформированы два набора векторов признаков размером  $614 \times 2678$  векторов: один с размерностью векторов признаков 184 (на основе визуального анализа спектральных составляющих векторов измерений) и второй с размерностью векторов признаков 21 (взяты главные компоненты из каждых 10 последовательных спектральных составляющих). Вычисления производились в рамках модели параллельного программирования OpenMP под управлением ОС Windows-10 на компьютере с 4-ядерным процессором i3-2100. В таблице приведены затраты времени в секундах на контролируемую классификацию указанных наборов данных классификаторами Байеса и спектрально-углового картирования в зависимости от числа выделяемых классов.

**Таблица**

Размерность векторов признаков	Классификатор Байеса		Спектрально-угловой классификатор	
	15 классов	10 классов	15 классов	10 классов
184	246	152	3.60	2.40
21	3.65	2.50	0.50	0.34

На представленных ниже рисунках демонстрируются результаты работы классификаторов (демонстрируются нижние фрагменты полных рисунков). На рис. 1 изображен спектральный канал с номером 72 исходного набора данных; на рис. 2 – результат кластеризации набора векторов признаков размерности 184 (выделялось 10 кластеров); на рис. 3 – результат, полученный применением классификатора Байеса

к набору векторов признаков размерности 184. Белым цветом выделен класс отклоненных векторов. Чтобы избежать затруднений, связанных с выбором обучающих и контрольных полей в пространстве многомерных векторов признаков, для ввода этих полей использовалась карта кластеризации (рис. 2). Априорные вероятности классов задавались с использованием выходных данных операции кластеризации. Вероятность правильной классификации составила 0.86 (0.998 для обучающих и 0.722 для контрольных полей). На рис. 4 представлен результат, полученный применением спектрально-углового классификатора к набору векторов признаков размерности 184. Были использованы те же обучающие и контрольные поля, что и в построении рис. 3. Вероятность правильной классификации составила 0.737 (0.821 для обучающих и 0.653 для контрольных полей).

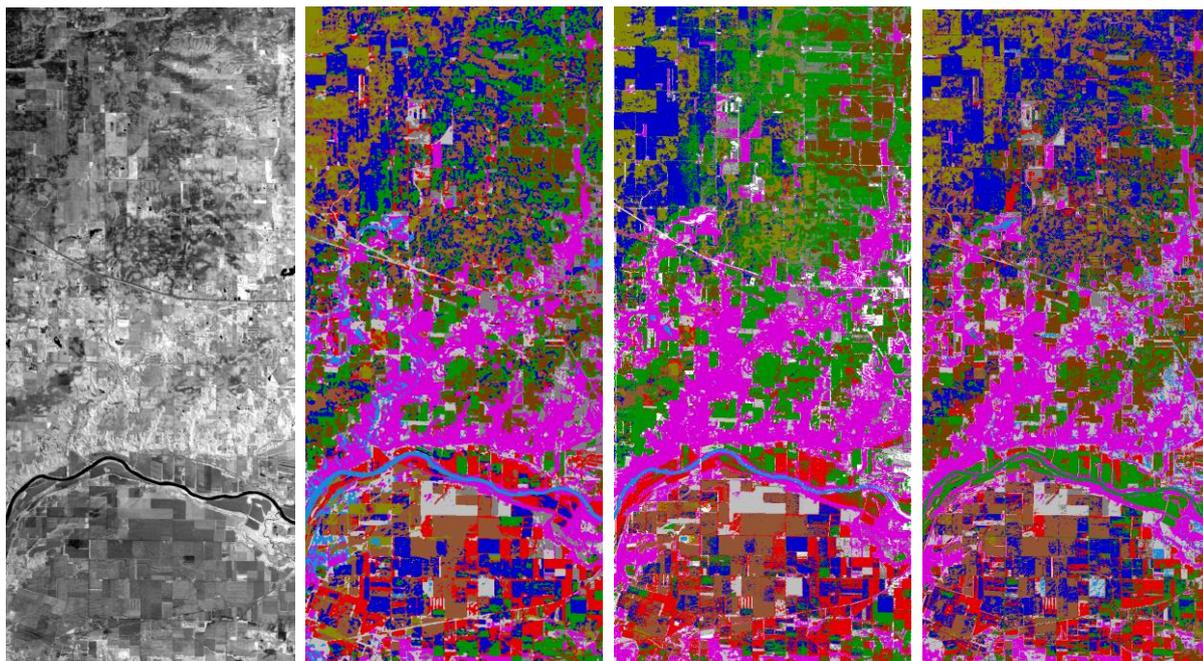


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Рис. 4

Включение технологии классификации ГС данных ДЗЗ в состав программного комплекса PlanetaMonitoring позволяет расширить возможности системы классификации комплекса по построению карты тематических классов данных ДЗЗ различного спектрального разрешения.

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

#### Список литературы

1. PlanetaMonitoring: программный комплекс обработки спутниковых данных / В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. А. Кровотынцев, В. П. Пяткин, Г. И. Салов // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.
2. Бондур В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. 557 с.

4. Асмус В. В., Бучнев А. А., Пяткин В. П. Контролируемая классификация данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2008. № 4. С. 60–67.
5. Асмус В. В., Бучнев А. А., Пяткин В. П. Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2010. № 2. С. 58–66.
6. 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. М., 2002.
7. Мельников П. В., Пестунов И. А., Рылов С. А. Экспериментальное сравнение методов классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения по спектральным и пространственным признакам // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: сб. материалов III Междунар. науч. конф., 13–16 сент. 2016 г. Красноярск: СФУ, 2016. С. 28–33.
8. Marques de Sa J. P. Pattern Recognition. Concepts, Methods and Applications. Berlin: Springer, 2001. 318 p.
9. The Spectral Image Processing System (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data / F. A. Kruse, A. B. Lefkoff, J. W. Boardman [et al] // Remote Sensing of Environment. 1993. № 44. P. 145–163.
10. URL: [https://aviris.jpl.nasa.gov/data/get\\_aviris\\_data.html](https://aviris.jpl.nasa.gov/data/get_aviris_data.html).

**А. П. Гук<sup>(1)</sup>, Л. Г. Евстратова<sup>(2)</sup>**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск  
e-mail: guk\_ssga@mail.ru

Государственный университет по землеустройству, Москва  
e-mail: lge\_21@mail.ru

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛЕСА ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ**

**Aleksander P. Guk<sup>(1)</sup>, Larisa G. Evstratova<sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies; e-mail: guk\_ssga@mail.ru

<sup>2</sup>State University of Land Use Planning; e-mail: lge\_21@mail.ru

## **PROBLEMS AND PERSPECTIVS AUTOMATIC INTERPRETATION AND CLASSIFICATION OF FOREST USING MULTISPECTRA IMAGES**

Рассмотрены основные вопросы, возникающие при дешифрировании лесных массивов по космическим снимкам высокого разрешения. Выделены главные проблемы каждого этапа обработки. Приведен ряд примеров действующих практически автоматических алгоритмов дешифрирования леса по многоспектральным снимкам высокого разрешения. Отмечены основные направления развития автоматических алгоритмов дешифрирования. Перечислены основные алгоритмы, над которыми ведется работа в настоящее время.

*Ключевые слова: дешифрирование лесных массивов, основные проблемы дешифрирования, примеры использования различных дешифровочных признаков, автоматические алгоритмы.*

Авторы несколько лет занимались дешифрированием лесных снимков среднего и высокого пространственного разрешения. В настоящее время уже разработано несколько автоматических алгоритмов различного типа, некоторые из которых приведены в данной работе.

Рассмотрим основную сущность и проблемы алгоритмов автоматического дешифрирования снимков.

Алгоритмы делятся на параметрические и непараметрические. Большинство алгоритмов построены на использовании выбранных некоторым образом параметров. Выбранные параметры получают обучением по эталонным участкам, для которых дешифровочные признаки достаточно точно известны. В основном существует два подхода: 1) эталонные участки выбираются на одном и том же снимке (дешифрируемый снимок); 2) эталоны получают ранее по большим массивам точек и хранят в специальной базе. Причем для каждого объекта (группы объектов) создается собственная база для каждого определенного класса объекта. Заметим, что условия съемки должны быть хотя бы приблизительно также учтены. Стоит заметить, что в последнее время появились весьма эффективные алгоритмы учета самого сильного фактора, влияющего на дешифрируемость объектов – атмосферы. Для этого используют значение яркостей в дополнительных спектральных каналах, что помогает учитывать влияние атмосферы на яркости объектов исследуемого изображения. *Таким образом,*

*первое наше предложение – создание специализированных банков. Несмотря на кажущуюся сложность, задача разрешима за счет собственной структуры ряда признаков объектов и с учетом создания региональных баз данных.*

Далее необходимо выбрать критерий соответствия дешифровочных признаков объектов, а также критерий близости объектов, то есть собственно принадлежности объекта заданному классу (что в общем случае не одно и то же). При этом весьма важным является собственно значение критериев и их надежность [1].

Далее следует определиться с методом «просмотра» объектов на снимке с целью дешифрирования изображения.

Наиболее часто применяемый способ, как уже упоминалось [2], – это сегментация, построенная тем или иным методом. В результате выделяются области, однородные по заданному признаку, которые затем распознаются путем сравнения заданных критериев.

Для практических решений задач нами был введен термин *скользящей сегментации*, которая заключается в последовательном просмотривании снимка плоской фигурой определенного вида: квадрат, круг, прямоугольники и т. д. Целесообразно использовать метод скользящего площадного анализа в быстрых алгоритмах, связанных с предложенными модифицированными методами, методами главных компонент, или Tasseled Cap, независимых компонент, а также методов кратномасштабных преобразований при сегментации.

В целом последовательный просмотр изображения хотя еще и не до конца разработан, но имеет большие перспективы.

Второй вариант состоит в точечном выделении объектов (отдельных конкретных элементов) по одиночным векторным признакам (например, кластерный анализ или Байесовский классификатор). Однако затем обычно приходится выполнять объединение объектов, то есть снова формировать площадные объекты.

Следующий важный этап – это собственно дешифрирование снимков, то есть присвоение значения выделенному объекту путем последовательного сравнения каждого дешифрируемого элемента с каждым эталоном и в соответствии с заданными критериями отнесение дешифрируемого элемента к соответствующему классу.

### **Оценка качества дешифрирования в соответствии с выбранной методикой**

Полученные результаты представляются в форме, необходимой заказчику: в виде карты, пространственной модели, 3D-моделей и т. д.

Следует отметить, что практически каждая из описанных проблем требует дополнительных исследований и разработки усовершенствованных алгоритмов.

Тем не менее **на кафедре разработан ряд действующих автоматических алгоритмов**, некоторые из которых будут приведены в данной работе.

Как известно, измерения яркостей в многоспектральной съемочной системе сильно коррелированы. Сущность метода главных компонент PCA состоит в выборе нового базиса, в котором изменения не коррелированы (по крайней мере, менее коррелированы). Получение матрицы преобразования PCA основывается на использовании корреляционной матрицы измерений. В работе предложен видоизмененный метод главных компонент, отличающийся тем, что для различных участков леса выбираются базисные векторы, имеющие подобные спектральные значения, что позволяет выделять не только наиболее значительные компоненты преобразованного изображения, но также применять более тонкие эффекты, используя ряды преобразованных изображений, что подробно будет изложено в последующих исследованиях.

### Модифицированный метод Tasseled Cap

Развитием метода PCA является модифицированный метод Tasseled Cap. Для него были впервые получены коэффициенты преобразования для снимков FORMASAT-2B. Коэффициенты были рассчитаны по модифицированному алгоритму.

Рассмотрим несколько подробнее разработанный модифицированный метод Tasseled Cap [3].

Tasseled Cap – линейное преобразование исходного многоспектрального изображения в пространство признаков, базисы которого определяются съемочной системой, набором типовых объектов с использованием метода главных компонент [4].

В этом методе векторы матрицы преобразования  $\bar{U}_1, \bar{U}_2 \dots \bar{U}_K$  вычисляются как средние значения базисных векторов, полученных в результате обработки большого количества снимков однотипной поверхности путем преобразования Карунена-Лоэва матрицы R. Таким образом, базисные векторы определяют средние направления вектора измерений яркости для соответствующего признака. Коэффициенты преобразования определяются в первую очередь типом датчиков (съемочной системы), но также существенно зависят от набора объектов формирующих сцену. В соответствии с этим определять коэффициенты Tasseled Cap целесообразнее по типовым участкам, включающим характерный набор объектов для исследуемой местности.

Экспериментальные работы показали, что коэффициенты, приведенные в формуле (1), определенные по эталонным участкам с заданным набором объектов, работают лучше, чем коэффициенты, рассчитанные по всему снимку.

$$U_{Tas} = \begin{pmatrix} 0,303 & 0,730 & -0,470 & -0,122 \\ 0,218 & 0,337 & 0,772 & -0,212 \\ 0,084 & 0,231 & 0,284 & 0,748 \\ 0,894 & -0,316 & -0,065 & 0,021 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

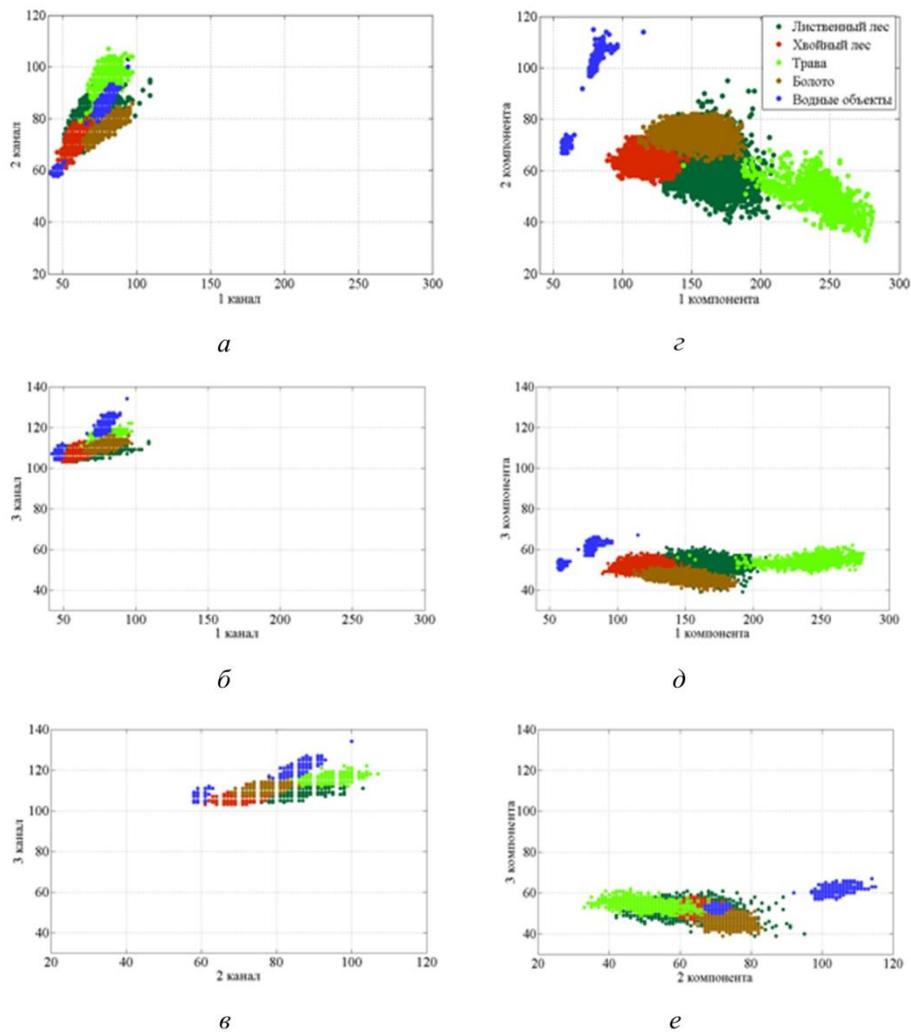
Расчет коэффициентов был выполнен в частности: по фрагментам снимков, содержащих определенный набор объектов (в нашем примере – хвойную и лиственную растительности, водные объекты, болота, луга); по всему снимку; по фрагментам с использованием процедуры отбраковки измерений.

Набор коэффициентов, приведенный на рис. 1, рассчитан с учетом того, что на снимках находятся объекты определенного типа. Преобразованные яркости после применения Tasseled Cap более «растянуты» по пространству признаков и практически не перекрываются; это показывает лучшую делимость и дешифрируемость классов после преобразования Tasseled Cap по сравнению с методом главных компонент.

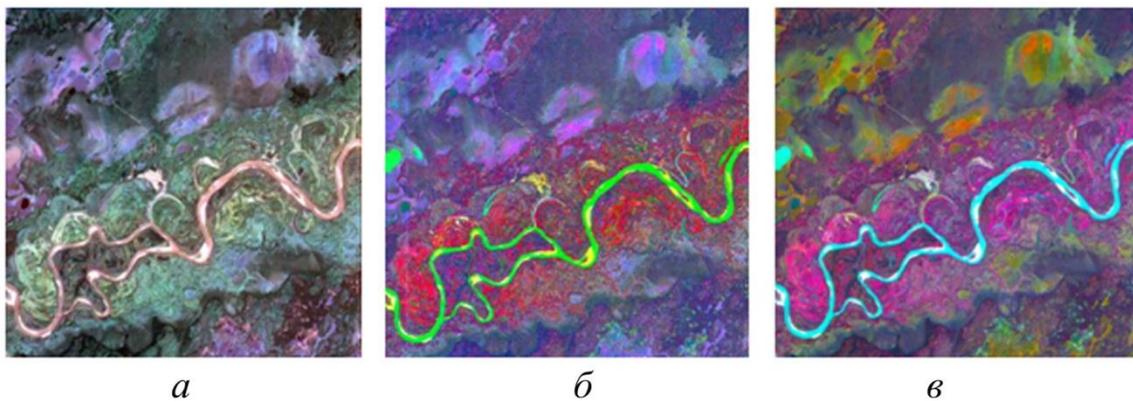
Как показали эксперименты, в этом случае разделение объектов после преобразования лучше, чем для обычного преобразования, рассчитанного для всего снимка. Преобразование Tasseled Cap, коэффициенты которого рассчитаны по фрагментам, дают лучшее разделение объектов, чем при использовании коэффициентов, рассчитанных по всему изображению.

Физическим основанием улучшения изображения является «растяжение» изображений в новом пространстве признаков. Согласно рис. 2, преобразование по методу главных компонент позволяет «растянуть» распределение яркостей и улучшить их делимость. Собственные векторы и собственные значения различны для каждого изображения в зависимости от масштаба и условий съемки, а также от изображенной на снимке местности и других факторов.

Кроме того, базисные векторы можно связать с определенными свойствами объекта, то есть использование значения элементов базисного (собственного) вектора характеризует состояние объекта, изображенного на снимке, как дополнительный дешифровочный признак. На этом предположении основан метод преобразования исходных изображений Tasseled Cap.



**Рис. 1. Графики распределения яркостей элементов изображения пяти различных объектов в пространстве спектральных яркостей (*a*, *б*, *в*) и пространстве Tasseled Cap (*г*, *д*, *е*)**



**Рис. 2. Результаты преобразования Tasseled Cap и метода главных компонент: *a* – исходный снимок FORMOSAT-2 в реальных цветах; *б* – псевдоцветное изображение по первым трем компонентам метода главных компонент; *в* – псевдоцветное изображение по первым трем компонентам преобразования Tasseled Cap**

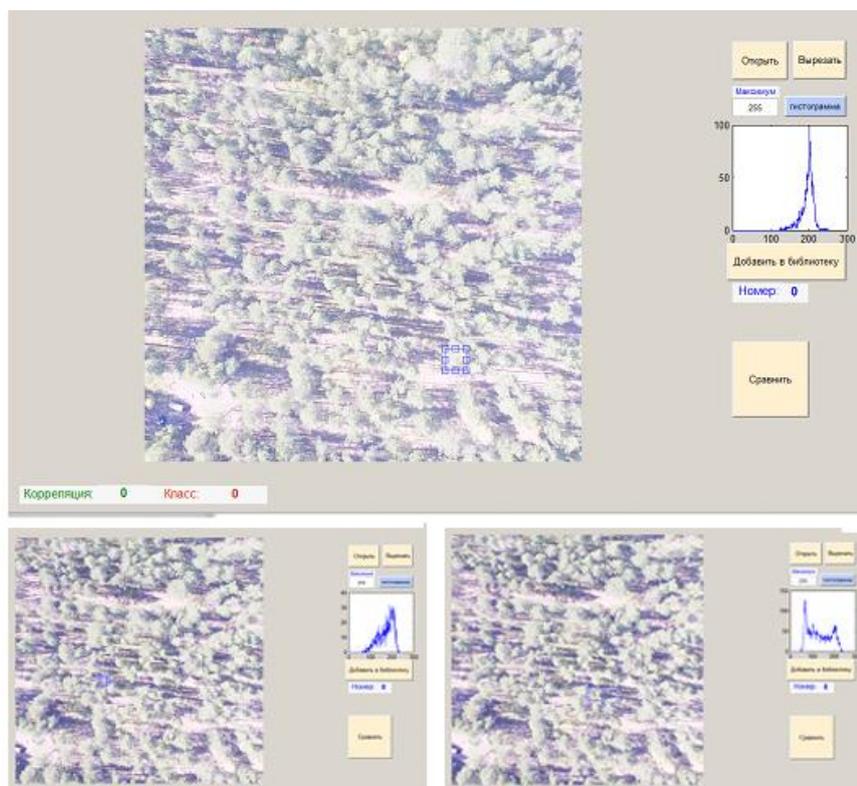
Практически данные алгоритмы целесообразно использовать для оперативного выделения объектов на больших массивов леса [3]. Тем не менее при оперативном мониторинге больших объемов лесных массивов этот метод можно считать приемлемым.

По аналогичной технологии действуют алгоритмы, использующие анализ Фурье, а также метод независимых компонент.

### **Алгоритм дешифрирования лесных массивов по космическим снимкам высокого пространственного разрешения статистическим непараметрическим способом**

Исследования космических снимков высокого разрешения показали, что функция плотности распределения яркостей полностью описывает изменения яркостей лесного покрова [2], различает разные виды лиственного покрова и устойчива к различным типам растений. На основе этого был разработан алгоритм дешифрирования снимков, основанный на сравнении функции плотности вероятностей яркостей оцениваемого (дешифрируемого) объекта и функции плотности распределения вероятностей эталонного объекта. Достоверность дешифрирования 90–95 %. На рис. 3 показаны различные функции плотности распределения яркостей, по которым можно идентифицировать различные параметры леса.

Также были разработаны с использованием структурных признаков алгоритмы определения параметров для мониторинга леса, алгоритмы многоуровневого дешифрирования, основанные на применении анализа Фурье, вейвлет-анализа, которые были использованы для выделения границ леса, выделение рубок леса и определения однотипных участков леса (по эталону). Результаты приведены в работах [5–10]. Также проведены экспериментальные работы по определению большинства таксационных характеристик леса, включая размер кроны, высоту дерева и т. д.



**Рис. 3. Фрагменты изображения и графики функции плотности распределения яркостей некоторых типов леса**

## **Заключение**

Оценим некоторые возможные перспективы развития алгоритмов, а также новые общие направления развития методов распознавания образов:

- поиск и развитие новых устойчивых дешифровочных признаков объектов на различных изображениях;
- разработка комплексных дешифровочных признаков и алгоритмов;
- разработка структурных алгоритмов на базе Фурье и вейвлет-преобразований;
- разработка новых методов, основанных на непараметрических алгоритмах для многомерных дешифровочных признаков;
- разработка геометрических, топологических данных и данных, полученных с использованием ГИС;
- создание базы эталонных объектов и надежных критериев.

И наконец, самое главное – создание законченных технологий дешифрирования различного типа снимков и объектов различного назначения для получения заданного вида продукции. На кафедре в настоящее время ведутся интенсивные исследования в этой области, будут представлены в ближайшее время в виде рабочих технологий определения по космическим снимкам высокого разрешения для определения по снимкам большинства таксационных объектов.

## **Список литературы**

1. Гук А. П., Евстратова Л. Г. Конструирование технологических схем обработки изображений для автоматизированного дешифрирования многоспектральных космических снимков // *Геодезия и картография*. 2015. № S15-2. С. 9–16.
2. Гук А. П., Евстратова Л. Г. Новый статистический подход к распознаванию лесных массивов // *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.)* / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 14–16.
3. Гук А. П., Алтынцев М. А. Преобразование Tasseled Cap для космических снимков FORMOSAT-2 // *Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 3. С. 39–47.
4. Crit E. P., Kfuth R. J. The Tasseled Cap De-Mystified // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. V. 32, № 1. 1986. P. 81–86.
5. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Алферова А. С. Использование структурных признаков изображений типовых участков местности для выявления изменений состояния территорий по космическим снимкам высокого разрешения // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2009. № 6. С. 49–52.
6. Локализация изменений объектов природно-территориальных комплексов по разновременным космическим снимкам / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, А. С. Гордиенко, М. А. Алтынцев // *Геодезия и картография*. 2010. № 2. С. 19–25.
7. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, Е. П. Хлебникова, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов, А. С. Гордиенко, Д. П. Симонов // *Геодезия и картография*. 2013. № 7. С. 31–40.
8. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических снимков. Выявление изменений состояния территорий и объектов по многозональным космическим снимкам, полученным на разные даты / 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. № 8. С. 33–41.
9. Гук А. П., Арбузов С. А., Гук А. А. Использование метода независимых компонент при дешифрировании снимков лесных массивов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2014. Т. 4, № 1. С. 3–7.
10. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Алтынцев М. А. Разработка методики определения изменений границы леса по разновременным разномасштабным аэрокосмическим снимкам // *Геодезия и картография*. 2015. № 12. С. 32–39.

**Е. В. Дмитриев<sup>(1)</sup>, В. В. Козодеров<sup>(2)</sup>, А. О. Дементьев<sup>(3)</sup>, А. А. Соколов<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт вычислительной математики РАН, Москва; e-mail: yegor@mail.ru

<sup>(2)</sup>Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова, Москва; e-mail: vkozod@mail.ru

<sup>(3)</sup>Институт вычислительной математики РАН, Москва; e-mail: adementyev@bk.ru

<sup>(4)</sup>Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale;  
e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr

## **МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

**E. V. Dmitriev<sup>(1)</sup>, V. V. Kozoderov<sup>(2)</sup>, A. O. Dementyev<sup>(3)</sup>, A. A. Sokolov<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup>Institute of Numerical Mathematics RAS; e-mail: yegor@mail.ru

<sup>(2)</sup>Lomonosov Moscow State University; e-mail: vkozod@mail.ru

<sup>(3)</sup>Institute of Numerical Mathematics RAS; e-mail: adementyev@bk.ru

<sup>(4)</sup>Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale;  
e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr

## **METHOD FOR HYPERSPECTRAL IMAGE CLASSIFICATION USING ADAPTIVE OPTIMIZATION OF SPECTRAL BANDS**

Гиперспектральное аэрокосмическое зондирование является одним из наиболее перспективных направлений дистанционных методов исследования поверхности Земли. Преимущество данного подхода состоит в возможности использования подробной информации о спектральных характеристиках обследуемого объекта в пределах заданной точности. Общей проблемой стандартных алгоритмов классификации является потеря способности к обобщению при использовании большого количества спектральных каналов. Построение их робастных модификаций и применение методов оптимизации набора используемых каналов может приводить к потере значимой информации в случае, когда обрабатываемая сцена содержит значительное количество разнородных объектов, классификация которых происходит в различных спектральных диапазонах. В данной работе предлагается методика классификации с использованием адаптивной оптимизации, которая в большой степени должна позволить решить данную проблему.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, распознавание образов, гиперспектральные изображения, оптимизация пространства признаков.

В последние годы широкое развитие получила новая технология дистанционного зондирования, сочетающая в себе возможности получения информации об обследуемых объектах на основе пространственного анализа цифровых изображений и методов спектроскопии. Соответствующие подходы получили название гиперспектральных технологий (ГСТ), включающие в себя гиперспектральные авиационные и космические измерения в различных спектральных диапазонах, а также математические методы обработки и анализа получаемых таким образом данных (гиперспектральных изображений).

Сегодня ГСТ имеют множество приложений в различных областях науки, здравоохранения и народного хозяйства. Основное преимущество гиперспектральных технологий состоит в том, что исследователь получает наиболее подробную

информацию о спектральных характеристиках обследуемого объекта в пределах заданной точности. При этом отпадает необходимость в дополнительных предположениях относительно свойств объекта, введение которых часто вносит существенные неопределенности в решение соответствующих задач. Высокое спектральное разрешение гиперспектральных приборов позволяет решать задачи классификации и определения характеристик обследуемых объектов на новом качественном уровне. Так, в частности, при гиперспектральном зондировании растительного покрова исследователи рассматривают задачи тонкой классификации на уровне отдельных таксонов, решение которых было невозможно при использовании стандартного индексного представления мультиспектральных данных.

Преимущества использования гиперспектральных вегетационных индексов аппаратуры Hyperion/EO-1 в сравнении с использованием аналогичных многоспектральных индексов, по данным со спутников IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+ и MODIS, для получения оценки биомассы посевов продемонстрированы в работе [1]. Биомасса посевов оценивалась по данным многоспектрального и гиперспектрального космического зондирования. При анализе использовались двухканальные вегетационные и многоканальные вегетационные индексы, которые выводились с применением сингулярного разложения исходных данных и метода пошаговой регрессии. Результаты показали, что соответствующие индексы, полученные по данным гиперспектрального зондирования, имеют более высокую точность для рассматриваемых сельхозкультур. Также показано, что высокое спектральное разрешение данных гиперспектральной аппаратуры Hyperion/EO-1 при оценке биомассы посевов имеет большую значимость при получении оценок биомассы, чем высокое пространственное разрешение рассмотренных типов мультиспектральной аппаратуры.

Получение ответов на новые научные и экологические вопросы с точки зрения мониторинга лесов подразумевает картографирование породного состава и типов лесов. Совместное использование данных самолетной гиперспектральной аппаратуры и модельных многоспектральных данных аппаратуры Sentinel-2 показывает новые возможности осуществления мониторинга тропических лесов в юго-западной части Ганы [2]. При этом применяются вегетационные индексы для различения текстур лесного покрова, классификации доминантного породного состава и разделения пород деревьев по их функциональному составу: молодые деревья, немолодые деревья, но требующие необходимых условий солнечного освещения, затененные части лесного покрова.

В работе [3] оценивается потенциал существующей в настоящее время и перспективной многоспектральной и гиперспектральной аппаратуры для оценки текстуры почвы и содержания в ней органического углерода. Сравниваются четыре функционирующие в настоящее время спутниковые системы (EO-1 ALI и Hyperion, Landsat 8 OLI, Sentinel-2 MSI) и три планируемые для запуска системы (EnMAP, PRISMA и HypIRI). Для обработки изображений использовались две спектральные базы данных, которые моделировали каждый из указанных приборов: выборочные спектры в соответствии со спектральными особенностями перечисленных приборов; выборочные спектры с действительным или моделируемым шумом (радиометрическим и атмосферным). Добавление шума в модельные спектры приводило к уменьшению статистической точности для всех оцениваемых моделей, особенно для данных Hyperion. Показано, что планируемые гиперспектральные системы способны улучшить точность оценок параметров почв для изображений непокрытого растительностью почвенного покрова относительно результатов, достижимых текущими гиперспектральными и многоспектральными системами. Однако это улучшение

остаётся слишком ограниченным для точного количественного оценивания текстуры почв и содержания в них органического углерода.

Основными недостатками ГСТ являются большие объёмы получаемой информации и высокая сложность методов их обработки. При таком высоком спектральном разрешении возникает зависимость между измерениями, особенно в соседних спектральных каналах. Таким образом, информация, извлекаемая из этих каналов, может казаться избыточной. Возникает задача оценки информационного содержания получаемых данных. В связи с ограниченностью имеющейся априорной информации для обработки гиперспектральных изображений, как правило, применяют робастные методы обучаемой классификации.

Обычная схема построения такого рода методов обработки гиперспектральных изображений состоит либо в предварительном эффективном сокращении размерности признакового пространства, либо в применении алгоритма обучаемой классификации с использованием устойчивых к выбросам оценок необходимых параметров в пространстве полной размерности. Обычно для оптимизации признаков используют разложение по главным компонентам, пошаговые алгоритмы выбора наиболее информативных признаков или метод дискриминантных поверхностей [4]. В качестве альтернативы к анализу главных компонент предлагается использовать критерий максимального межклассового интервала [5]. Существуют работы, в которых для обеспечения устойчивости обучения используются аппроксимации спектральных кривых [6]. Широко применяются алгоритмы, используемые при анализе сигналов. Так, например, в работе [7] предложено использовать трехмерную модификацию метода эмпирических мод для многоклассовой классификации гиперспектральных изображений.

Общим недостатком описанных выше подходов является возможная потеря значимой информации. Разложение по линейным оптимальным базисам не имеет ясного физического обоснования. Признаки с высокой вариативностью в пределах выбранной сцены не всегда являются наиболее информативными для рассматриваемой задачи распознавания. Кроме того, построение таких базисов, как правило, является «сценозависимым». Результат прямого отбора наиболее информативных признаков обладает высокой чувствительностью к малым изменениям обучающего ансамбля. Кроме того, при многоклассовой классификации алгоритм обучается для большого числа объектов, разделимость которых может существенно отличаться. Таким образом, для различных подзадач мы имеем разный набор оптимальных каналов. Попытки простого объединения данных оптимальных последовательностей могут приводить снова к проблеме проклятия размерности.

Для решения данной проблемы предлагается использовать адаптивную оптимизацию признакового пространства. Методика основана на комбинировании декодирующего классификатора [8] и регуляризованного пошагового алгоритма отбора наиболее информативных признаков. Для описания классификатора введем понятие кодовой матрицы (КМ), пример которой представлен на рисунке. Количество строк КМ соответствует числу классов. Для построения КМ необходимо выполнение следующих условий:

- элементами КМ являются числа  $-1$ ,  $0$  и  $1$ ;
- каждый столбец КМ содержит как минимум один элемент  $1$  и один элемент  $-1$ ;
- столбцы КМ попарно неколлинеарны;
- различные строки КМ должны быть различны;
- для любых двух классов должен существовать столбец, в котором эти классы разделяются.

Строки КМ являются уникальными кодами соответствующих классов  $y_i$ . Столбцы  $l_j$  КМ, по сути, представляют собой схемы бинарной задачи классификации, которая строится на основе группировки исходных классов  $y_i$  в соответствии со следующими обозначениями: «1» – целевой объект; «-1» – альтернатива; «0» – прочие объекты, не участвующие в классификации.

		Бинарные классификаторы						
		$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$
Классы	$y_1$	-1	-1	1	1	-1	1	1
	$y_2$	-1	1	0	0	0	0	0
	$y_3$	1	-1	-1	-1	1	1	-1
	$y_4$	0	-1	1	0	1	-1	1

**Рисунок. Пример кодовой матрицы для случая четырех классов**

Базовая методика классификации на основе КМ состоит в следующем. Пусть нам необходимо классифицировать некоторое измерение  $x \in R^M$  (вектор признаков), то есть поставить ему в соответствии один из классов  $y_i$  или сказать, что классификация невозможна. Для этого мы применяем каждый бинарный классификатор  $l_j$  к измерению  $x$  (ответом являются значения 1 или -1) и, таким образом, строим код  $z$  измерения  $x$ . Сравнивая полученный код  $z$  с кодами классов  $y_i$ , выбираем класс  $\hat{y}$ , который соответствует минимальному расстоянию до  $z$  в смысле выбранной метрики.

Для используемого бинарного классификатора введем функцию  $s(x)$ , определяющую вычисление баллов для измерения  $x$ , в соответствии с рассматриваемой бинарной задачей. Функция  $s(x)$  характеризует не только результат алгоритма классификации (сопоставление  $x$  классам 1 или -1), но и надежность этого выбора. Для метода опорных векторов  $s(x)$  указывает на удаленность измерения  $x$  от дискриминантной поверхности в область класса 1. Для байесовской классификации  $s(x)$  можно задать как разность апостериорных вероятностей объекта и альтернативы.

Введем также функцию  $g(y, s(x))$ , которая характеризует потери при классификации в предположении истинности некоторого класса  $y$  из исходного списка. Такую функцию называют «функцией потерь». Как правило, используется ограниченная линейная функция  $g(y, x) = \max\{0, 1 - y \cdot s(x)\} / 2$ , функция Хэмминга  $g(y, x) = [1 - \text{sign}(y \cdot s(x))] / 2$  или экспоненциальная функция  $g(y, x) = \exp(-y \cdot s(x))$ .

Таким образом, описанный выше алгоритм классификации можно сформулировать в терминах минимизации средней потери

$$a(x) = \arg \min_{y_i} \frac{\sum_{j=1}^L |c_{ij}| g(y_i, s_j(x))}{\sum_{j=1}^L |c_{ij}|}, \quad (1)$$

где  $c_{ij}$  – элементы КМ;  $L$  – число столбцов КМ; а индекс  $i$  пробегает номера всех рассматриваемых классов.

В процессе обработки гиперспектральных изображений данным алгоритмом для каждой из задач бинарной классификации  $l_j$  может возникать проблема проклятия размерности. Размеры используемых обучающих множеств будут определяться конфигурацией КМ и в определенных случаях могут быть достаточно большими, например, когда половина классов отмечена как 1, а вторая – как –1. Но даже в этом случае использование всей совокупности каналов может приводить к неустойчивости оценок параметров классификатора  $l_j$ , получаемых в процессе обучения. Стандартный метод отбора наиболее информативных признаков (пошаговый метод последовательного дополнения) заключается в следующем. Пространство всех признаков делится на две группы – принятых в модель и остальных признаков (для которых производится оценка возможности принятия в модель). Для каждого признака из множества «остальных признаков» делается оценка ошибки распознавания при условии его добавления в модель. Из полученного набора ошибок выбирается минимальная и производится ее сравнение с ошибкой предыдущей модели. Если произошло значимое уменьшение ошибки, то соответствующий признак принимается в модель, если нет, то процесс останавливается.

Недостатком данного алгоритма является то, что при малых изменениях обучающего множества полученная оптимальная последовательность может существенно меняться. Эта проблема может быть решена с помощью регуляризации, предложенной в работе [9]. Метод состоит в следующем. Обучающее множество делится случайным образом на две части (обучающую и тестовую) таким образом, чтобы реализации каждого класса делились примерно поровну (кросс-валидация с параметром  $p=0,5$ ). Далее запускается пошаговый метод последовательного дополнения и получается локально-оптимальная последовательность спектральных каналов. Повторяя эти шаги несколько раз, мы получим ансамбль таких последовательностей. Далее из полученного ансамбля выбирается наиболее вероятная последовательность каналов следующим образом. Сначала рассматривается множество каналов с максимальной информативностью. Для этого множества рассчитывается мода и из исходного множества последовательностей выбираются только те, которые соответствуют наиболее вероятному каналу. Далее процесс повторяется, но уже на новом множестве меньшей размерности. Повторения происходят до тех пор, пока не останется только одна последовательность каналов, которая и будет считаться оптимальной для данной группы классов.

Результат применения данного алгоритма будет зависеть от выбранной сцены. Так, например, в работе [10] представлены результаты оптимизации признаков для классификации различных растительных сообществ. Полученные таким образом последовательности оптимальных каналов существенно различаются для разных задач классификации. При обработке сложной сцены можно объединять эти последовательности в единое целое, однако при большом разнообразии классов мы неизбежно приходим к проблеме «проклятия размерности». С одной стороны, используя лишь оптимальные для всей совокупности классов спектральные каналы, мы можем потерять значимую информацию.

Описанная выше проблема может решаться на основе применения классификатора (1) при оптимизации признаков для каждой задачи бинарной классификации  $l_j$ . В этом случае мы будем иметь  $L$  оптимальных последовательностей спектральных каналов. Поскольку данные последовательности будут различны, то мы существенно увеличиваем количество каналов, используемых при классификации.

С другой стороны, такой метод будет очень затратным с точки зрения вычислений (только на этапе обучения), поскольку каждый запуск регуляризованного пошагового отбора каналов довольно затратный. При этом следует учитывать также, что обучение нелинейных классификаторов, например метода опорных векторов с гауссовским ядром, также занимает много времени при наличии больших обучающих выборок.

Для оптимизации вычислительной эффективности нужно принимать во внимание следующие факторы. Использование КМ с малым количеством столбцов более эффективно за счет уменьшения количества запусков процедуры регуляризованного отбора. Примером такой КМ может служить КМ стратегии «один против всех», где число столбцов равно числу строк. Однако применение такой КМ может быть также затруднительным из-за большого числа реализаций в обучающем множестве для класса «-1».

Число столбцов КМ стратегии «каждый против каждого» растет, как квадрат исходного числа классов. Однако при наличии на сцене большого количества хорошо разделяемых групп классов для большинства задач  $l_j$  будет достаточно использовать всего один спектральный канал. Кроме того, скорость вычислений возрастет за счет относительно небольших размеров обучающих данных для классов «1» и «-1». Таким образом, конфигурация предлагаемого метода будет определяться в зависимости от имеющихся обучающих данных по каждому классу.

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

#### **Список литературы**

1. Marshall M., Thenkabail P. Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. 108. P. 205–218.
2. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data / G. V. Laurin, N. Puletti, W. Hawthorne, V. Liesenberg, P. Corona, D. Papale, Q. Chen, R. Valentini // Remote Sensing of Environment. 2016. 176. P. 163–176.
3. Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon / F. Castaldi, A. Palombo, F. Santini, S. Pascucci, S. Pignatti, R. Casa // Remote Sensing of Environment. 2016. 179. P. 54–65.
4. Lee C. and Landgrebe D. A. Decision boundary feature extraction for nonparametric classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. V. 23, Iss. 2. P. 433–444.
5. Li H., Jiang T., Zhang K. Efficient and robust feature extraction by maximum margin criterion // IEEE Transactions on Neural Networks. 2006. V. 17, Iss. 1. P. 157–165.
6. Berg A. S. S. A. and Jensen A. F. C. Robust classification of hyperspectral images // Proc. SPIE 6748, Image and Signal Processing for Remote Sensing XIII. 2007. P. 67480O.
7. Hea Z. and Liu L. Robust multitask learning with three-dimensional empirical mode decomposition-based features for hyperspectral classification // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 121. P. 11–27.
8. Dietterich T. G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes // Journal of Artificial Intelligence Research. 1995. V. 2. P. 263–286.
9. Дмитриев Е. В. Классификация лесного покрова тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.
10. Дмитриев Е. В., Козодеров В. В. Проблемы гиперспектрального авиационного мониторинга почвенно-растительного покрова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8, № 8. С. 1083–1095.

**Е. А. Лупян<sup>(1)</sup>, С. А. Барталев<sup>(1)</sup>, В. А. Толпин<sup>(1)</sup>, Д. Е. Плотников<sup>(1)</sup>,  
Е. С. Елкина<sup>(1)</sup>, Ю. С. Крашенинникова<sup>(1)</sup>, А. Ю. Оксюкевич<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт космических исследований Российской академии наук, Москва;  
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

<sup>(2)</sup>ООО «ИКИЗ», Территория инновационного центра «Сколково», Москва;  
e-mail:org@iki-z.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЗЗ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ПОСЕВОВ**

Настоящий доклад посвящен обзору задач, связанных с проведением мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов, для решения которых могут использоваться спутниковые методы и технологии. В работе проводится анализ основных задач, для решения которых в настоящее время могут эффективно использоваться методы дистанционного мониторинга. В докладе представлен краткий обзор современных спутниковых систем ДЗЗ и особенностей доступа к предоставляемым ими данным. На примере методов и технологий, разработанных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), показаны возможности решения задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Представляются основные возможности созданного ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» спутникового сервиса ВЕГА-Pro для проведения регионального спутникового мониторинга.

*Ключевые слова:* спутниковые технологии наблюдения Земли; мониторинг сельскохозяйственных земель; методы обработки данных; спутниковые данные; информационные системы дистанционного мониторинга.

В последние десятилетия спутниковые данные все активнее используются для решения задач, связанных с получением объективной информации об использовании и состоянии сельскохозяйственных земель. Для решения таких задач достаточно активно создаются и внедряются специализированные информационные системы (см. например, [1–4]). С учетом того, что в последние годы происходит фактически взрывной рост возможностей получения спутниковой информации ДЗЗ, стало возможно существенно расширить круг задач, которые могут решаться с использованием этих данных. Рост объемов получаемой информации и расширение круга ее применения потребовал развития новых методов их обработки и технологий организации их массового использования в информационных системах дистанционного мониторинга.

В настоящем докладе:

- приводится краткий обзор основных направлений использования данных ДЗЗ для решения задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов;
- обсуждаются современные возможности и условия оперативного получения спутниковых данных;
- на примере методов, разработанных в ИКИ РАН, обсуждаются возможности организации максимально автоматизированной обработки спутниковых данных для получения различных характеристик сельскохозяйственных земель и посевов;
- представлены основные возможности использования созданного ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» спутникового сервиса ВЕГА-Pro для организации и поддержки региональных систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов.

### **Основные направления использования данных ДЗЗ для решения задач дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов**

Исходя из опыта создания и внедрения различных систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов, в работе выделены актуальные направления, в которых наиболее востребованы в настоящий момент данные дистанционного зондирования. К ним, по мнению авторов доклада, в первую очередь относятся:

- оценка используемости сельскохозяйственных земель (в том числе выделение обрабатываемых и необрабатываемых земель, а также картографирование земель, занятых различными культурами);
- оценка состояния сельскохозяйственных земель;
- оперативная оценка состояния сельскохозяйственных посевов (в том числе на уровне регионов, районов и отдельных полей).

В рамках этих направлений в докладе сформулированы основные задачи, наиболее актуальные сегодня для систем дистанционного мониторинга.

### **Современные возможности и условия оперативного получения спутниковых данных**

Как уже отмечалось, в последние годы происходил активный рост возможностей спутниковых систем ДЗЗ. Одновременно с этим резко менялась политика доступа к спутниковой информации как в мире, так и в нашей стране. Все это привело к тому, что в настоящее время имеется возможность свободного оперативного доступа к высококачественной спутниковой информации достаточно высокого пространственного разрешения (от 10 м). В докладе делается краткий обзор основных типов спутниковой информации, которая сейчас может свободно (бесплатно) использоваться в системах дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Именно наличие такой информации делает рентабельным создание как государственных, так и коммерческих систем дистанционного мониторинга сельского хозяйства.

### **Примеры методов и подходов обработки спутниковых данных для получения различных характеристик сельскохозяйственных земель и посевов**

Безусловно, особое значение при решении задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов имеют методы анализа спутниковой информации, которые позволяют восстановить различные характеристики и параметры, необходимые для ведения такого мониторинга. При этом особенно важно, что методы обработки данных должны быть максимально автоматизированы. Только это позволяет, с одной стороны, получать объективную (независимую от мнения конкретного оператора) информацию, а с другой стороны – существенно сократить расходы на эксплуатацию систем мониторинга и в итоге сделать их рентабельными. В докладе приводятся примеры таких методов, разработанных в ИКИ РАН, в том числе:

- методы картографирования основных типов сельскохозяйственных культур [5–7];
- методы оценки используемых сельскохозяйственных земель [5, 8, 9];
- методы оценки состояния сельскохозяйственных культур [10, 11].

При рассмотрении возможностей использования результатов обработки спутниковых данных особое внимание уделяется вопросам, связанным с получением информации, интегрированной на различные уровни (регион, район, поле).

### **Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА-Pro для организации и поддержки региональных систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов**

Следует учитывать, что построение эффективных региональных систем спутникового мониторинга сельского хозяйства сегодня возможно только

с использованием современных технологий и систем, обеспечивающих работу с данными дистанционного зондирования, которые позволяют получать, обрабатывать, усваивать и предоставлять пользователям огромное количество информации. Возможности таких информационных технологий и систем продемонстрированы в докладе на примере спутникового сервиса ВЕГА-Pro (<http://pro-vega.ru/>), разработанного ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» [1].

Сервис ВЕГА создавался в первую очередь как инструмент, позволяющий с наименьшими затратами анализировать информацию о состоянии растительного покрова, полученную на основе спутниковых данных как в отдельных точках или объектах (полях), так и на уровне регионов. При этом сервис рассчитан на проведение как пространственного, так и временного анализов информации, на работу с долговременными архивами информации и на оперативно пополняющиеся архивы. Поэтому одной из задач сервиса является ведение оперативно обновляемого архива спутниковых данных и результатов тематической обработки (в первую очередь карт растительности и ВИ). Сервис рассчитан на работу с информацией по всей территории Северной Евразии.

Главной задачей сервиса ВЕГА-Pro является не только обеспечение удобного доступа к данным, но и предоставление различных интерфейсов и инструментов для анализа спутниковых данных и результатов их обработки. Особо следует отметить, что система ВЕГА-Pro позволяет оперировать не только с исходными спутниковыми изображениями, но и с очищенными от шумов и влияния облачности временными композитами. Без таких данных невозможно проведение анализа временной динамики растительного покрова. Для создания таких продуктов были разработаны полностью автоматизированные методы обработки данных, позволившие как сформировать долговременные архивы однородных данных, так и обеспечить постоянное автоматическое обновление информации. В настоящее время сервис позволяет работ с данными, поступающими от более чем 20 различных российских и зарубежных спутниковых систем. Основой сервиса является система распределенных архивов спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [12].

Сервис организован таким образом, что имеет полностью автоматизированные процедуры обработки данных на всех уровнях. Это позволяет получать однородную, максимально объективную информацию по всей территории, не зависящую от субъективного мнения отдельных специалистов, а также облегчает их практическое использование пользователями.

Сервис предоставляет следующие основные функциональные возможности:

- комплексный анализ спутниковых данных различного пространственного разрешения и результатов их обработки, картографических и атрибутивных тематических данных;
- ведение пользовательской базы данных контуров и характеристик различных объектов (полей) и мониторинг их состояния;
- анализ интегральных характеристик состояния растительности по областям, районам или любым объектам, заданным пользователем;
- анализ динамики вегетационного индекса (с 2000 года) с целью определения причин и времени изменений в растительном покрове;
- формирование статистики и аналитических форм состояния растительности на заданных объектах;

Для работы с данными и проведения их анализа были разработаны различные пользовательские интерфейсы: картографический интерфейс, интерфейс работы с рядами данных, интерфейс работы с пользовательскими объектами, интерфейсы работы с информационными бюллетенями и отчетными формами.

Сервис ВЕГА-Pro также предоставляет широкий набор программных интерфейсов для интеграции данных во внешние информационные системы. Поэтому

он может служить для региональных систем дистанционного мониторинга источником постоянно актуализирующейся информации и платформой для их разработки.

### **Заключение**

Таким образом, можно отметить, что в настоящее время имеются большое число технических и технологических возможностей для создания и поддержки региональных систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов.

*Доклад подготовлен при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, контракт 14.616.21.0063, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61615X0063.*

### **Список литературы**

1. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (ВЕГА) / Е. А. Лупян, И. Ю. Савин, С. А. Барталев, В. А. Толпин, И. В. Балашов, Д. Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190–198.
2. Козубенко И. С., Болсуновский М. А. Государственная информационная система мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Краснодарского края // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2011. № 6 (78). С. 076–082.
3. Шатрова К. В., Маглинец Ю. А., Цибульский Г. М. Модель представления информации о состоянии и динамике земель сельскохозяйственного назначения // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 8. С. 984–989.
4. Распределенная система спутникового агромониторинга в Украине / А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун, А. Н. Кравченко, Н. М. Куссуль // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 141–149.
5. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, С. А. Хвостиков, Н. В. Шабанов. М.: ИКИ РАН, 2017. 208 с.
6. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости / Д. Е. Плотников, С. А. Барталев, В. О. Жарко, В. В. Михайлов, О. И. Просяникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 199–208.
7. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5, т. 2. С. 322–330.
8. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации / С. А. Барталев, В. А. Егоров, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, И. А. Уваров // Компьютерная оптика. Самара. ИСОИ РАН. 2011. Т. 35, № 1. С. 103–116.
9. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А. Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 1. С. 330–341.
10. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса ВЕГА / В. А. Толпин, Е. А. Лупян, С. А. Барталев, Д. Е. Плотников, А. М. Матвеев // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581–586.
11. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS / В. А. Толпин, С. А. Барталев, М. А. Бурцев, В. Ю. Ефремов, Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, А. М. Матвеев, А. А. Прошин, Е. В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. № 2. С. 380–389.
12. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев, И. В. Балашов, С. А. Барталев, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий, А. А. Мазуров, А. М. Матвеев, О. А. Суднева, И. Г. Сычуглов, В. А. Толпин, И. А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 247–267.

**Л. Г. Свердлик<sup>(1)</sup>, С. А. Имашев<sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup>Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек  
e-mail: lsverdlik@istc.kg; l.sverdlik@mail.ru

<sup>2</sup>Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке  
e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

## **СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РЕГИОНАХ АЗИИ**

Представлены результаты диагностирования аномалий температуры, основанные на ретроспективном анализе долговременных спутниковых рядов температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы над эпицентрами сильных землетрясений ( $M > 6,5$ ), произошедших в сейсмически активных регионах Азии. Аномальные возмущения температуры наблюдались во всех рассмотренных случаях за 1–10 дней до основного сейсмического события.

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

### **Введение**

В последние годы был выполнен ряд исследований, представляющих результаты ретроспективного анализа спутниковых измерений, которые показали наличие корреляционной связи между сейсмической активностью и вариациями температуры в верхней тропосфере в период катастрофического землетрясения в Японии (*Fukushima*) весной 2011 года [1; 2], а также накануне сильных сейсмических событий в Северном и Центральном Тянь-Шане с 2003 по 2015 годы [3; 4]. Необходимость дальнейшей проверки выявленных закономерностей, связанных с сейсмической активностью тропосферных эффектов, а также дополнительного подтверждения эффективности использования для этих целей данных спутникового дистанционного зондирования требует исследования большего числа крупных землетрясений. Вместе с тем изучение аномальных возмущений температуры не ограничено землетрясениями Центральной Азии, а является частью аналогичной событий в различных сейсмически активных регионах мира как над сушей, так и над океаном.

### **Сейсмические и спутниковые данные**

В рамках настоящего *исследования* проанализированы результаты спутниковых измерений температуры атмосферы в периоды подготовки восьми сильных землетрясений с магнитудами от 6,6 до 8,6, которые были зарегистрированы в Кыргызстане, Индонезии, России, Пакистане, Китае, Непале и Японии. Сведения о сейсмических событиях взяты из каталога землетрясений [5] и на сайте интерактивного сервиса *IEB* [6] (таблица).

Временные серии температуры  $T(t)$  с трехчасовым разрешением по времени ( $\Delta t = 3h$ ) были восстановлены по данным спутниковых измерений на 28 изобарических уровнях ( $p_k$ ) от 600 до 0,1 hPa над каждым участком размером  $\pm 1^\circ$  от эпицентров землетрясений [7]. Продолжительность рядов наблюдений составляла 12 месяцев для EQ01 и 2–3 месяца до и после каждого из рассматриваемых событий EQ02–EQ08.

Характеристики исследуемой выборки сейсмических событий ( $M > 6,5$ )

№	Date	Time	Latitude N	Longitude E	M	Region
EQ01	19.08.1992	18:11:18	42.07	73.63	7.4	<i>Kyrgyzstan, Suusamyr</i>
EQ02	27.12.2011	15:21:56	51.84	95.91	6.6	<i>Russia, Tuva</i>
EQ03	11.04.2012	08:38:36	02.33	93.06	8.6	<i>Indonesia, Sumatera Isl.</i>
EQ04	24.09.2013	11:29:48	27.00	65.51	7.7	<i>Pakistan, Baluchistan</i>
EQ05	12.02.2014	09:19:49	35.92	82.56	6.8	<i>China</i>
EQ06	25.04.2015	06:11:26	28.15	84.71	7.8	<i>Nepal</i>
EQ07	12.05.2015	21:12:58	38.90	142.03	6.8	<i>Japan, Honshu Island</i>
EQ08	30.05.2015	02:21:27	27.83	140.49	7.8	<i>Japan, Ogasawara Isl.</i>

### Методика обработки временных рядов температуры атмосферы

Принципиальный подход к диагностированию аномалий температуры атмосферы ( $\Theta T$ ) остался в неизменном виде [8] и основан на расчетах произведения скользящих дисперсий временных рядов  $\Theta T_{FT}$  и  $\Theta T_{TP}$ . Данная методика была апробирована на серии относительно сильных сейсмических событий ( $K \geq 13,0$ ) в 2003–2015 годах, показав, что аномальные возмущения температуры в области тропопаузы над эпицентральной областью предстоящего землетрясения наблюдались примерно в 70 % случаев [4].

**В то же время** для повышения надежности и объективности идентификации аномалий потребовалась **коррекция некоторых положений, относящихся к выбору признака (параметра), характеризующего аномалии, обработке временных рядов и формированию наборов экспериментальных данных. Обновленная версия методики позволяет анализировать температурные данные с более высоким временным разрешением ( $\Delta t = 3$  часа) и не требует применения процедуры фильтрации низкочастотной составляющей спектра вариаций температуры атмосферы. Это было достигнуто за счет использования не абсолютных величин, а разности между суточным максимумом и минимумом температуры или размаха вариаций ( $R_T$ ) и вертикального градиента температуры ( $\gamma = \Delta T / \Delta p$ ).**

Исследование статистических свойств вариаций температуры проведено на основе вычисления линейной корреляции между рядами  $T(t)$  и  $R_T(t)$  на изобарических уровнях 300 и 100 hPa в скользящем окне. Рассмотрено также поведение приращения температур как между каждыми последовательными элементами ряда  $\Delta T = T(t_{i+1}) - T(t_i)$ , так и  $\Delta T$  для одного и того же момента времени.

Наряду с предваряющими крупные землетрясения аномалиями температуры на тропосферных уровнях проанализированы также особенности вертикального распределения  $T(p_k)$  в стратосфере (~100–1 hPa) и мезосфере (до 0,1 hPa), отмечено воздействие различных возмущающих факторов, синхронизированных с сейсмическими ударами и проявляющихся в квазипериодических колебаниях  $T(t, p_k)$  различного временного масштаба.

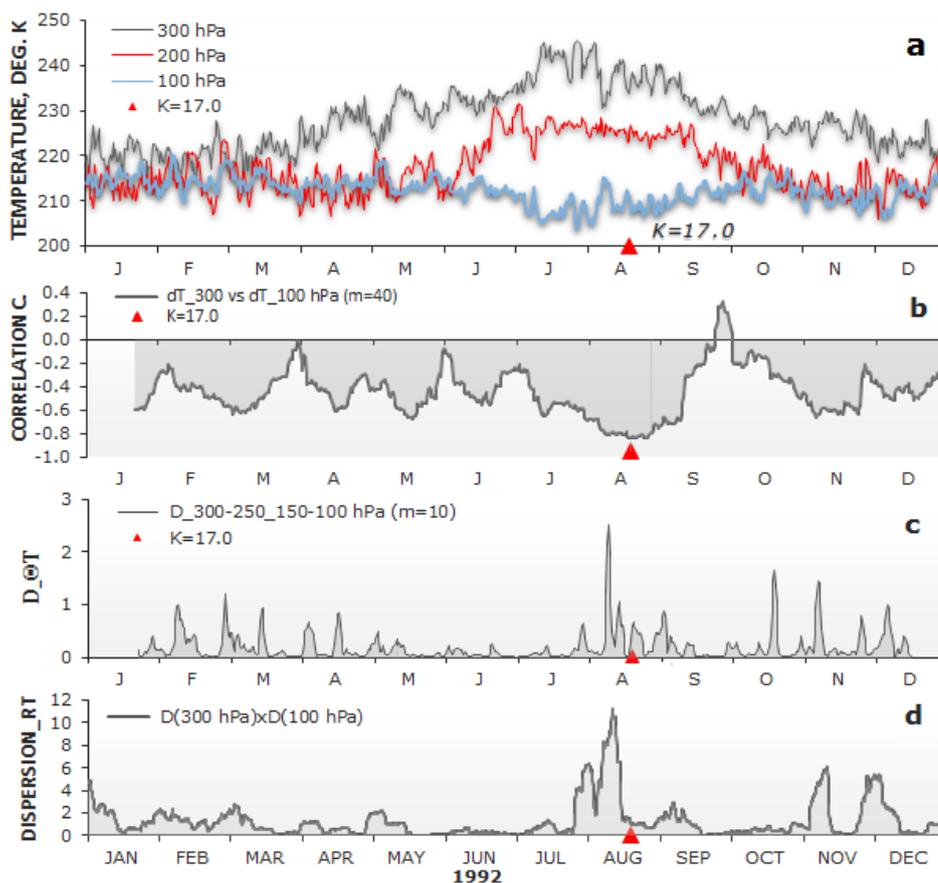
### Обсуждение результатов

#### *Суусамырское землетрясение ( $M = 7,4$ ) 19 августа 1992 года*

По данным [5] 19 августа 1992 года в Северном Тянь-Шане было зарегистрировано сильнейшее за последние десятилетия Суусамырское землетрясение энергетического класса  $K = 17,0$  ( $M_S = 7,4$ ), с которого началась интенсивная активизация сейсмичности. Основное сейсмическое событие сопровождалось большим количеством афтершоков (636 и 527 сейсмических событий в августе и сентябре соответственно). Вариации температуры на изобарических уровнях от 300 до 100 hPa в 1992 году показаны на рис. 1, а.

Корреляционная связь между временными рядами  $\Delta T$  на уровнях 300 и 100 hPa, рассчитанными для одного момента времени в скользящем окне  $m = 20$  дней, показана на рис. 1, *b*. Повышение локальных коэффициентов корреляции до  $R = -0,84$  перед сильным сейсмическим ударом связано как с увеличением амплитуды флуктуаций температуры, так и с синхронностью изменений температуры. Сразу после землетрясения следовало резкое снижение согласованности внутренней динамики рядов, продолжающееся около 2,5 месяца.

Результаты диагностирования аномалий температуры (параметр  $D$ ) в разделенных тропопаузой слоях 300–250 и 150–100 hPa демонстрируют хорошо выраженную область высоких значений  $D = 2,5$  за 8–10 суток до землетрясения (рис. 1, *c*). Подобные результаты были получены с **использованием** произведения значений скользящей дисперсии размаха вариаций ( $R_T$ ) на изобарических уровнях 300 и 100 hPa (рис. 1, *d*).

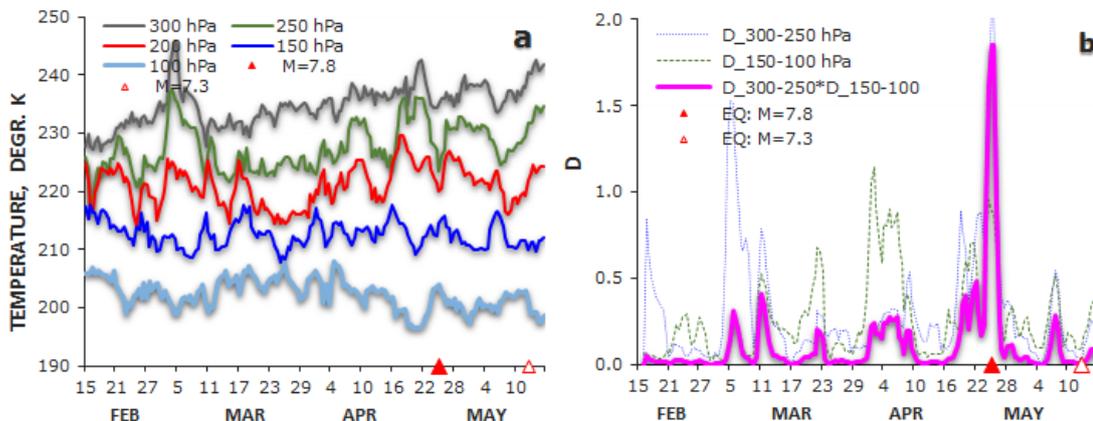


**Рис. 1.** Динамика изменения в 1992 году: температуры на изобарических уровнях 300, 200 и 100 hPa (*a*); корреляционной связи между  $\Delta T = T(t_{i+1}) - T(t_i)$  для одного момента времени (*b*); параметра  $D$  (*c*); дисперсии  $R_T$  (*d*) в 1992 году (красным маркером отмечен момент землетрясения  $K = 17,0$ , 19 августа 1992 года)

### ***Землетрясение в Непале ( $M = 7,8$ ) 25 апреля 2015 года***

Весной 2015 года в Непале произошла серия разрушительных землетрясений. Основной удар ( $M = 7,8$  и  $M = 6,7$ ) пришелся на 25–26 апреля (EQ06). Вариации температуры в феврале – мае 2015 года на изобарических уровнях от 300 до 100 hPa над эпицентром землетрясения показаны на рис. 2, *a* ( $\Delta t = 12$  часов). На рис. 2, *b* представлены временные ряды средних значений аномалий температуры в слоях 300–250 и 150–100 hPa, скользящие дисперсии, рассчитанные по  $m = 6$  предшествующим значениям, и их произведение ( $D$ ). Как видно, области наиболее

высоких значений параметра  $D = 1,85$ , характеризующие быстрые, аномальные, происходящие согласованно изменения температуры в выделенных слоях атмосферы, коррелировали с землетрясением магнитудой  $M = 7,8$ . При этом аномальные уровни  $D > 1,0$  начали проявляться за 24 часа до события и исчезли сразу после этих событий.



**Рис. 2. Вариации температуры на изобарических уровнях от 300 до 100 hPa в Непале (a); скользящие дисперсии в слоях 300–250 и 150–100 hPa ( $m = 6$ ) и их произведение ( $D$ ) (b)**

### Заключение

Анализ спутниковых данных показал, что возникновению рассматриваемой выборки сильных сейсмических событий, произошедших в различных регионах Азии, предшествовало аномальное изменение температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы, которое проявлялось примерно за 1–10 дней до основного толчка и сопровождалось увеличением диапазона суточного изменения температуры. Аномалии температуры наблюдались как в высокогорных регионах, так и над океаном при сильных сейсмических колебаниях дна, в том числе в экваториальной зоне. Принимая во внимание, что эпицентры землетрясений имеют существенные отличия по широте и природным условиям земной поверхности, которые определяют особенности теплового режима атмосферы, используемая методика показала приемлемую эффективность диагностирования аномалий температуры.

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

### Список литературы

1. Кашкин В. Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. 26. № 10. С. 908–916.
2. Имашев С. А., Свердлик Л. Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 1. С. 15–19.
3. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений в 2003–2014 гг. // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 3. С. 16–19.
4. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.
5. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
6. The IRIS Earthquake Browser (IEB). URL: <http://ds.iris.edu/>.
7. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>.
8. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Вестн. КРСУ. 2016. Т. 16, № 5. С. 170–174.

# Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

---

УДК 528.8

**С. А. Барталев<sup>(1)</sup>, Е. А. Лупян<sup>(1)</sup>, И. В. Балашов<sup>(1)</sup>, С. С. Барталев<sup>(1)</sup>,  
М. А. Бурцев<sup>(1)</sup>, А. А. Бриль<sup>(1)</sup>, В. А. Егоров<sup>(1)</sup>, А. В. Кашницкий<sup>(1)</sup>,  
А. А. Мазуров<sup>(1)</sup>, А. Ю. Оксюкевич<sup>(2)</sup>, А. А. Прошин<sup>(1)</sup>,  
К. С. Сенько<sup>(1)</sup>, Ф. В. Стыценко<sup>(1)</sup>, И. А. Уваров<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт космических исследований Российской академии наук, Москва  
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

<sup>(2)</sup>ООО "ИКИЗ", Территория инновационного центра «Сколково», Москва  
e-mail:org@iki-z.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ**

Доклад посвящен обсуждению возможностей создания информационных систем, ориентированных на решение задач регионального мониторинга лесных ресурсов. В нем обсуждаются современные возможности и технологии получения и обработки данных спутниковых наблюдений для решения различных задач мониторинга лесных ресурсов. На примере системы «Вега-Приморье» продемонстрированы возможности создания комплексных систем дистанционного мониторинга лесных ресурсов.

*Ключевые слова: спутники наблюдения Земли, информационные технологии, дистанционный мониторинг, лесные ресурсы, мониторинг лесных пожаров, информационные сервисы.*

Быстрое развитие в последние годы возможностей спутниковых систем дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), появление возможности свободного доступа к поступающим с них данным и развитие технологий автоматизированной обработки спутниковых данных позволяют в настоящее время обеспечить получение оперативной информации для решения задач, связанных с контролем и мониторингом лесных ресурсов. Благодаря этому возможно организовать на основе современных спутниковых технологий решение следующих задач мониторинга:

- лесных пожаров и их последствий;
- процессов усыхания (деградации) и гибели лесов;
- лесопользования (прежде всего рубок);
- лесных ресурсов;
- охотничьих ресурсов.

Это позволяет, в свою очередь, начать создание региональных информационных систем, обеспечивающих комплексный мониторинг лесных ресурсов. Основными задачами таких систем являются:

---

© Барталев С. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. С., Бурцев М. А., Бриль А. А., Егоров В. А., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Оксюкевич А. Ю., Прошин А. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Уваров И. А., 2017

– организация работы со спутниковой информацией, получаемой из различных источников по территории региона (в том числе ее оперативного получения и обработки);

– интеграция имеющихся и создание новых тематических карт лесов по территории региона (включая технологию их обновления);

– создание инструментов для удобного анализа различной информации, предоставляемой системой распределенным пользователям (в том числе инструментов для интерактивного анализа спутниковой информации для выявления различных процессов, происходящих в лесах);

– обеспечение возможности анализа данных ДЗЗ и результатов их обработки совместно с различной информацией, используемой в регионе для решения задач управления лесами.

Основной задачей таких систем является создание технической и информационной основы для разработки и внедрения новых методов решения различных задач комплексного мониторинга и управления лесными ресурсами. При этом следует отметить, что современные технологии во многих случаях позволяют избежать необходимости создания для решения задач региона дорогостоящей технической инфраструктуры, необходимой для организации работы со спутниковыми данными, а дает возможность эффективно задействовать имеющиеся ресурсы крупных специализированных центров и организаций. Это позволяет избежать необходимости крупных финансовых вложений на этапе создания системы, сократить сроки создания и внедрения таких систем и оптимизировать затраты на этапе их эксплуатации.

Настоящий доклад посвящен представлению возможностей использования технологий, разработанных в последние годы в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) для создания информационных систем комплексного дистанционного мониторинга лесных ресурсов. Представление проводится на примере рассмотрения основных особенностей и возможностей системы комплексного дистанционного мониторинга лесов Приморского края (ИС «ВЕГА-Приморье»).

ИС «ВЕГА-Приморье» разработана ООО «ИКИЗ» и ИКИ РАН при поддержке Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ "Планета"» и АНО «Общество дикой природы». Разработка и опытная эксплуатация системы выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве между АНО «Общество дикой природы», ООО «ИКИЗ», ИКИ РАН и администрацией Приморского края, которое было подписано 22 декабря 2015 года, и направлено на внедрение современных технологий дистанционного зондирования Земли из космоса для комплексного мониторинга лесов Приморского края с целью обеспечения максимально полного использования их ресурсно-экологического потенциала, повышения эффективности их охраны, защиты и использования, сохранения уникального биологического разнообразия лесной флоры и фауны. Подробно возможности системы описаны в работе [9].

Основой для разработки системы стали методы и технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга, созданные в последние годы в ИКИ РАН [3–8], а также технологии, методы и сервисы, ориентированные на проведение работ по мониторингу лесов, созданные и поддерживаемые ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» [11; 13]. При построении системы «Вега-Приморье» также использован опыт и возможности Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [1; 2; 10]. При разработке системы «Вега-Приморье» также использованы возможности центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [12].

Новые методы построения сервисов работы со спутниковыми данными и результатами их обработки для решения задач мониторинга лесных ресурсов разработаны при поддержке Минобрнауки России (Государственный контракт 14.607.21.0122, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60715X0122). Разработка методов анализа оценки запасов стволовой древесины на основе спутниковых данных с разрешением 10–30 м и верификация их на территории Приморского края осуществлялась в рамках проекта РФФИ 17-05-41152 РГО\_а.

### Список литературы

1. Абушенко Н. А., Барталев С. А., Беляев А. И., Ершов Д. В., Захаров М. Ю., Лупян Е. А., Коровин Г. Н., Кошелев В. В., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Минько Н. П., Назиров Р. Р., Семенов С. М., Тащилин С. А., Флитман Е. В., Щетинский В. Е. Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исследование Земли из космоса. 1998. № 3. С. 89–95.
2. Барталев С. А., Ершов Д. В., Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Щетинский В. Е. Основные возможности и структура Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 2. С. 97–105.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН. 2017. 208 с.
4. Егоров В. А., Ильин В. О., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Флитман Е. В. Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV\_SAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 431–436.
5. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 156–170.
6. Кашницкий А. В., Лупян Е. А., Барталев С. А., Барталев С. С., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Стыценко Ф. В. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. Т. 12, № 4. С. 7–16.
7. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Кашницкий А. В., Бурцев М. А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 9–27.
8. Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Кобец Д. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 53–75.
9. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Барталев С. С., Бурцев М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Кашницкий А. В., Колбудаев П. А., Крамарева Л. С., Мазуров А. А., Оксюкевич А. Ю., Плотников Д. Е., Прошин А. А., Сенько К. С., Уваров И. А., Хвостиков С. А., Ховратович Т. С. Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13, № 5. С. 11–28.
10. Лупян Е. А., Барталев С. А., Ершов Д. В., Котельников Р. В., Балашов И. В., Бурцев М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Ковганко К. А., Колбудаев П. А., Крашенинникова Ю. С., Прошин А. А., Мазуров А. А., Уваров И. А., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Флитман Е. В., Хвостиков С. А., Шуляк П. П. М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Ковганко К. А., Колбудаев П. А., Крашенинникова Ю. С., Прошин А. А., Мазуров А. А., Уваров И. А., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Флитман Е. В., Хвостиков С. А., Шуляк П. П. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга

лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 222–250.

11. Лупян Е. А., Барталев С. А., Толпин В. А., Жарко В. О., Крашенинникова Ю. С., Оксюкевич А. Ю. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 215–232.

12. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263–284.

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

14. Толпин В. А., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Прошин А. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 93–108.

**Р. В. Брежнев, Ю. А. Маглинец**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск; e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНЕЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ С СИСТЕМОЙ АГРОМОНИТОРИНГА**

Работа посвящена проблеме взаимодействия конечных пользователей (КП) с системами мониторинга на примере системы агромониторинга. В работе предложена комплексная модель взаимодействия, учитывающая отсутствие знаний и навыков КП в специфике работы с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в специализированных программных пакетах и позволяющая формулировать задачу мониторинга пространственных объектов с использованием разработанной модели информационного процесса.

*Ключевые слова:* конечный пользователь, дистанционное зондирование Земли, агромониторинг, система агромониторинга; геоинформационная система, пространственный объект, диалоговые средства, структура диалога; информационный процесс.

### **Введение**

К настоящему времени различными научными коллективами и разработчиками коммерческого программного обеспечения создано большое количество программных систем (ENVI, Erdas Imagine, Scanex Image Processor, QGIS и др.) предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ, создания, публикации и визуализации тематических продуктов, полученных на их основе. Такие системы в основном ориентированы на использование специалистами в соответствующих методах работы с геопространственными данными.

Однако аспект взаимодействия конечных пользователей с функциональными возможностями рассматриваемого класса систем для оказания информационной поддержки решения тематических задач мониторинга пространственных объектов [1–4] раскрыт недостаточно, что определяет актуальность развития исследований в данном направлении.

В настоящей работе рассматривается модель взаимодействия конечных пользователей с системами дистанционного мониторинга на примере системы агромониторинга [5], предназначенной для наблюдения за изменениями пространственной структуры земель сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) в рамках сельскохозяйственного контура в течение вегетационного периода.

### **Модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта**

В сельскохозяйственной отрасли конечные пользователи – инженеры сельскохозяйственных предприятий, агрономы, представители контролирующих органов, агроэкологи, не являющиеся специалистами в области ДЗЗ и применении геоинформационных технологий. Конечные пользователи являются постановщиками задач мониторинга пространственных объектов, а также основными потребителями результатов мониторинга.

Под постановкой задачи мониторинга понимается информационный процесс задания признаков исходной и требуемой модели объекта. Задание признаков исходной модели объекта включает ряд свойств, позволяющих локализовать объект во времени

и пространстве, а также ряд свойств, идентифицирующих этот объект и начальные условия, описывающие его состояние. Задание признаков требуемой модели объекта включает свойства, которые необходимо измерить и актуализировать в процессе мониторинга для последующего анализа и сопоставления с нормативными значениями. Подобные информационные процессы должны учитывать использование конечными пользователями специализированных функциональных возможностей получения, обработки и анализа геопространственных данных [6].

Основным классом информационных систем, предоставляющих такие функциональные возможности, являются комплексные геоинформационные системы (ГИС). Особенность ГИС – возможность объединения по признаку локализации разнородной пространственной информации, возможность совместно обрабатывать и анализировать эту информацию при условии открытых баз данных, что подразумевает наличие диалоговых средств, позволяющих осуществлять коммуникативное взаимодействие пользователей и системы при решении тематических задач.

Анализ ряда типовых примеров настольных (QGIS, MapInfo, ArcGIS, ПанорамаАгро) и web-ГИС (Геоаналитика.Агро, Сканэкс.КосмосАгро, AstroDigital), ориентированных на использование в сельском хозяйстве на разных уровнях для хранения, структурирования и анализа ЗСХН показал, что существующие информационные процессы и диалоговые средства требуют привлечения специалистов для формулирования задачи и выстраивания процесса ее решения, а следовательно, слабо ориентированы на конечного пользователя.

Основными критериями, по которым анализировались перечисленные выше программные продукты, являются требования к диалоговым средствам и процессам взаимодействия для организации общения конечных пользователей и информационной системы, которые позволяют сформировать задачу мониторинга. К основным требованиям относятся:

1. Указание наименования (типа) объекта.
2. Географическая локализация объекта.
3. Временная локализация точки актуализации данных об объекте.
4. Указание дополнительных свойств объекта для его локализации.
5. Указание свойств объекта, которые необходимо определить.

Относительно задачи наблюдения за изменениями пространственной структуры объектов ЗСХН, рассматриваемой в данной работе, разработанная модель информационного процесса постановки задачи включает следующие основные этапы (рисунок):

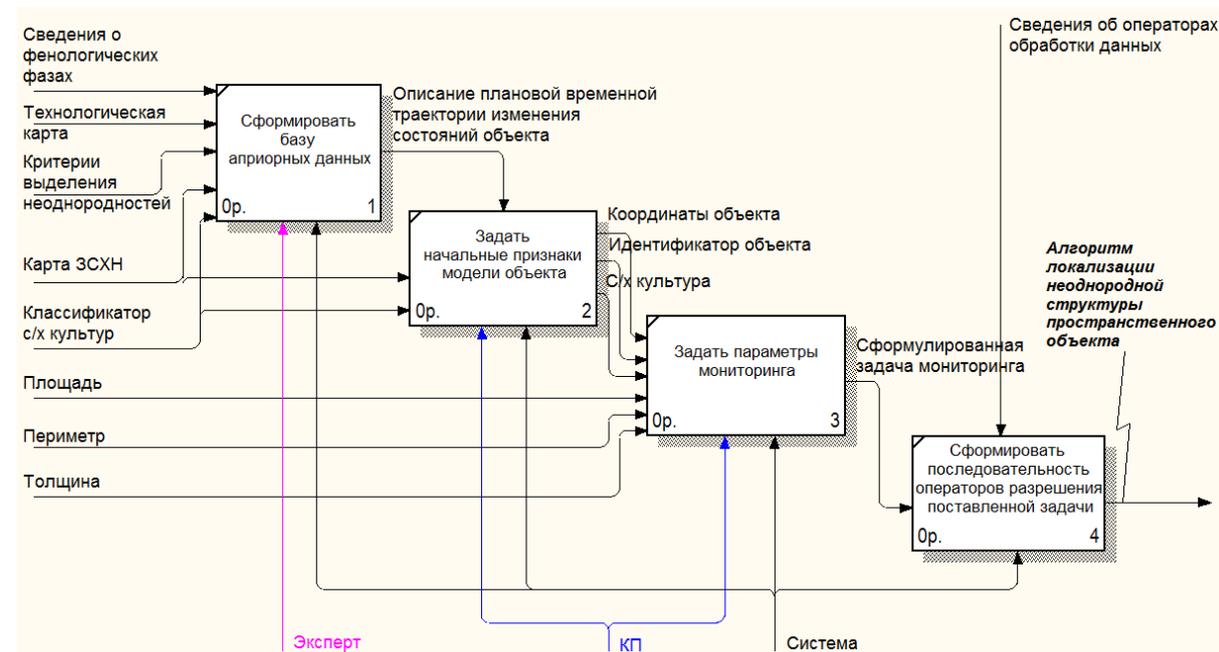
1. Формирование экспертом базы априорных данных. Этап включает внесение в базу данных системы агромониторинга сведений об объекте, позволяющих сформировать исходную модель объекта, к которым относятся: сведения о фенологических фазах развития сельскохозяйственной культуры, технологическая карта проведения агротехнических мероприятий, карта ЗСХН, классификатор сельскохозяйственных культур, критерии выделения и интерпретации неоднородностей.

2. Задание начальных признаков модели объекта. На данном этапе конечным пользователем выполняется пространственная локализация объекта путем визуального выделения контура его границ на карте ЗСХН, при этом за объектом закрепляется идентификатор, пространственные координаты и некоторая сельскохозяйственная культура, которая имеет эталонную траекторию развития во времени, основанную на смене фенологических фаз развития и технологической карте.

3. Задание параметров мониторинга. Данный этап относится к заданию конечным пользователем признаков, которые необходимо измерить и актуализировать. В данном случае к ним относятся значения площади, периметра, толщины и вегетационного

индекса нормированной разности (NDVI), на основе которых определяется актуальное состояние неоднородной структуры объекта ЗСХН.

4. Формирование последовательности операторов разрешения поставленной задачи. На основе заданных признаков система осуществляет подбор релевантных операторов, составляющих алгоритм разрешения поставленной конечным пользователем задачи мониторинга.



**Рисунок. Структура информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, ориентированная на конечного пользователя**

Основными структурами диалогов, относящихся к процессу постановки задачи мониторинга, являются:

- Диалог задания начальных признаков объекта.
- Диалог задания параметров мониторинга.
- Диалог по оценке результатов разрешения поставленной задачи, который должен визуализировать пользователю результат решения задачи.

Разработка структуры диалога основана на использовании средств общения второго поколения, описанных в работе [3; 7]. Суть подхода, основанного на средствах общения второго поколения, заключается в том, что данный подход предоставляет возможность взаимодействовать с информационной системой при постановке задачи мониторинга не на формальном языке, что потребовало бы от конечного пользователя определенных знаний, а на ограниченном подмножестве естественного языка. При этом применяемые диалоговые средства базируются на визуальной локализации объекта, таблицах, списках и графиках, в рамках терминологии предметной области пользователя. При таком подходе конечный пользователь имеет возможность корректировать результаты решения задачи в случае несогласия с полученным решением.

### Заключение

Особенность разработанной модели информационного процесса состоит в разработанной структуре диалога, ориентированного на использование конечными

пользователями специализированных средств получения, обработки и анализа данных ДЗЗ при решении задач агромониторинга.

Для использования предлагаемой модели необходимо выполнения следующих условий:

1. Наличие объектно-реляционной модели конкретного класса пространственных объектов, формируемой экспертом, релевантной решаемой задаче и учитывающей априори заданные и измеряемые признаки.

2. Наличие в базе данных системы сведений об операторах обработки данных, составляющих алгоритм разрешения поставленной задачи.

Модель реализована в рамках действующей системы агромониторинга, доступной в сети Интернет по адресу: <http://activemap.ikit.sfu-kras.ru>.

### Список литературы

1. Программно-технологическая инфраструктура представления и обработки геопро пространственной информации муниципального района / Ю. А. Маглинец, Е. А. Мальцев, Р. В. Брежнев, А. С. Соснин, Г. М. Цибульский, К. В. Шатрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва, 2012. Т. 9, № 3. С. 316–324.

2. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления / Р. В. Брежнев, Ю. А. Маглинец, Е. А. Мальцев, С. Е. Перфильев, А. Ю. Сидоров, Г. М. Цибульский, А. С. Шokol // Журн. Сиб. Федер. Ун-та. Серия: Техника и технологии. Красноярск, 2012. Т. 5, № 3. С. 340–352.

3. Утробина Е. С., Матерук А. Ю. Семантически дружественный интерфейс в инструментальной справочно-аналитической системе (ИСА ГИС) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апр. 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов: в 3 т. Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. С. 52–56.

4. Женибекова А. Б. Формализованное описание картографических процессов в среде геоинформационных систем для автоматизированного процесса создания карт неподготовленными пользователями // Вестн. СГУГиТ. 2016. Вып. 4 (36). С. 136–144.

5. Brezhnev R. V., Maltsev E. A. An Ontological Spatial Monitoring System for Agricultural Land Monitoring // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. V. 25, № 2. P. 201–208.

6. Маглинец Ю. А., Брежнев Р. В. Развитие средств автоматизации приёма и обработки спутниковой информации региональной системы ДЗЗ СФУ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 120–128.

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

**С. А. Бронов<sup>(1,2)</sup>, Н. А. Никулин<sup>(1)</sup>, Я. В. Тихонова<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>(2)</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск

e-mail: nulsapr@mail.ru

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СКВОЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ**

Рассмотрены общие принципы организации сквозного проектирования исполнительных электроприводов для космических аппаратов с использованием разнородного программного обеспечения, объединенного в единую проектную цепочку путем импорта в каждую следующую программу результатов предыдущего проектирования.

*Ключевые слова:* космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, индукторный двигатель двойного питания, электропривод, САПР, сквозное проектирование.

В космических аппаратах (КА) различного назначения, в том числе для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используются исполнительные электроприводы (ЭП) на базе различных электродвигателей – синхронных с постоянными магнитами, индукторных двигателей (двигателей с электромагнитной редукцией) и др. Они обеспечивают работу систем поворота антенн, систем поворота солнечных батарей, принудительную вентиляцию (в случае герметичных конструкций) и т. д. Как правило, КА производятся в единичном экземпляре или небольшой серией в несколько штук. При изготовлении нескольких однотипных аппаратов они никогда не повторяются полностью и могут модифицироваться в той или иной степени с учётом испытаний и опыта эксплуатации предыдущих экземпляров. В частности, могут изменяться встроенные в них ЭП. При этом тип электродвигателя обычно остаётся тем же, но меняются некоторые его параметры – мощность, момент, скорость, размеры. Это приводит к необходимости заново проектировать ЭП даже при небольших изменениях их характеристик.

В настоящее время разработка ЭП, включая электродвигатели, осуществляется с применением инструментальных средств систем автоматизированного проектирования (САПР).

Поскольку ЭП включает физически разнородные составляющие части (электротехнические, механические, электронные), то и средства САПР используются разнородные. Для расчётов могут использоваться математические программы общего назначения, например, MathCAD или Matlab, для проектирования электронных схем – программы MicroCAP, OrCAD и т. п., для конструкторского проектирования – программы КОМПАС, SolidWorks и др.

Каждая программа решает свои задачи и предусматривает комплекс соответствующих исходных данных и манипуляций с ними. В результате разработкой ЭП занимаются различные специалисты, обмениваясь результатами проектирования своей части ЭП. Поэтому автоматизированное проектирование разбивается на отдельные этапы, между которыми присутствует ручная работа по подготовке данных для каждого этапа на основе полученных результатов предыдущего этапа. В частности, при конструкторском проектировании двигателей приходится заново вычерчивать их детали при изменении некоторых размеров. Это усложняет внесение изменений и приводит к неоправданным задержкам в проектировании всего КА.

Таким образом, возникает проблема организации сквозного автоматизированного проектирования электроприводов с выстраиванием цепочки используемых программ и автоматической передачей результатов работы одних программ в другие программы.

Для решения этой проблемы далее рассматриваются особенности разработки ЭП для КА и предлагается методология и технология увязки различных этапов автоматизированного проектирования.

ЭП являются системами автоматического управления и традиционно разделяются на две больших части – неизменяемую и изменяемую.

Так называемая неизменяемая часть включает двигатель, электропитающее устройство и, возможно, механический редуктор. Эта часть рассчитывается, исходя из общих требований к ЭП в части развиваемой мощности при заданных моменте на валу и скорости, то есть определяется нагрузкой и режимами работы. В ходе проектирования неизменяемой части выбирается тип двигателя и тип электропитающего устройства для обеспечения требуемых силовых и функциональных характеристик ЭП.

Так называемая изменяемая часть ЭП содержит датчики и управляющее устройство (регулятор). Эта часть обеспечивает требуемые динамические характеристики ЭП – характер переходного процесса, время регулирования и другие показатели качества. При одной и той же неизменной части можно получать ЭП с различными динамическими характеристиками, изменяя устройства, относящиеся к изменяемой части, поэтому эта часть ЭП и называется изменяемой.

При модификации ЭП КА смысл понятий «неизменяемая» и «изменяемая» части изменяется, так как, как правило, перепроектируется неизменяемая часть, а изменяемая остается прежней. Это связано с тем, что в качестве управляющего устройства используют микропроцессор, поэтому перенастройка изменяемой части обычно сводится к изменению программы микропроцессора, что никак не влияет на конструкцию ЭП (в том числе его габариты).

Проектирование ЭП КА включает следующие укрупненные этапы:

- 1) электротехнические расчеты двигателя – его момента, скорости, мощности, моделирование установившихся и переходных процессов;
- 2) расчеты элементов электронной схемы электропитающего устройства;
- 3) конструкторские расчеты – определение размеров деталей двигателя и электронных блоков;
- 4) моделирование процессов в электронной части с целью определения работоспособности и характеристик электропитающего устройства;
- 5) конструкторское проектирование – создание чертежей для изготовления двигателя и электронных блоков.

В рамках выполняемой работы выбраны следующие программные продукты:

- 1) для расчетов – программа MathCAD;
- 2) для конструкторского проектирования – программа КОМПАС.

Отработка методологии и технологии сквозного проектирования с использованием этих программ позволит при необходимости заменять их на другие.

В качестве двигателя выбран индукторный двигатель двойного питания (ИДДП), так как в научно-учебной лаборатории САПР ведутся исследования перспективных ЭП на его основе [1].

В данном случае рассматривается автоматизированное проектирование только так называемой неизменяемой части, так как проектирование изменяемой части (расчет законов регулирования) представляет собой отдельную задачу в рамках теории автоматического управления, которая должна решаться в рамках других проектных процедур. В перспективе эти расчеты могут дополнить рассматриваемые в данной работе методологию и технологию сквозного проектирования ЭП.

Электротехнические расчеты ИДДП выполняются по специальным методикам, созданным специалистами по проектированию двигателей. В результате определяются напряжения питания и токи обмоток, активные и индуктивные сопротивления обмоток. В соответствии с этими расчетами можно выполнить моделирование процессов в ИДДП и определить необходимые параметры электронной схемы электропитающего устройства. При необходимости выполняются перерасчёты электрических параметров, например, выбираются другие значения параметров питающих напряжений (амплитуды и частоты). Поэтому необходимым этапом расчётов является моделирование процессов в ИДДП в соответствии с предполагаемыми значениями нагрузки и режимами работы.

Моделирование может выполняться как при идеализации питающих напряжений (их синусоидальной аппроксимации), так и с учетом реального импульсного характера напряжения, например, с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Тогда появляется возможность выбрать обобщённые параметры ШИМ электронной схемы. Но для этого должна быть создана математическая функциональная модель электропитающего устройства, в данном случае – электронного коммутатора (инвертора).

В настоящее время для реализации инвертора применительно к маломощным ЭП используют, как правило, готовые микросхемы, поэтому моделирование электронной схемы с помощью программ типа OrCAD не требуется.

После выполнения расчетов ИДДП выполняется его конструкторское проектирование, для чего используется программа КОМПАС. При этом создаются все детали ИДДП, но используется принцип параметрической разработки чертежей. Это означает, что фиксируется только форма деталей, а их размеры задаются в виде таблицы параметров, которые передаются в КОМПАС тем или иным способом. В данном случае эти параметры рассчитываются в программе MathCAD и передаются в КОМПАС с помощью специально сформированного файла данных.

Цепочка автоматизированного проектирования выглядит следующим образом:

1) электротехнический расчет ИДДП (исходные данные – момент, скорость, амплитуды напряжений питания; результаты расчетов – токи обмоток, активные сопротивления, индуктивные сопротивления, частота питания);

2) моделирование процессов в ИДДП (исходные данные – амплитуды и частоты синусоидальных напряжений питания, активные сопротивления и индуктивности обмоток; результаты расчетов – характер изменения скорости, угла поворота и момента двигателя, токов в обмотках);

3) моделирование процессов в ИДДП с учетом импульсного характера питающих напряжений (исходные данные – амплитуды и частоты синусоидальных напряжений питания, активные сопротивления и индуктивности обмоток; результаты расчетов – характер изменения скорости, угла поворота и момента двигателя, токов в обмотках);

4) расчет размеров ИДДП в зависимости от результатов электротехнического расчета и формирование исходных данных для конструкторского проектирования;

5) разработка 3d-модели ИДДП и чертежей для его изготовления в соответствии с расчетами.

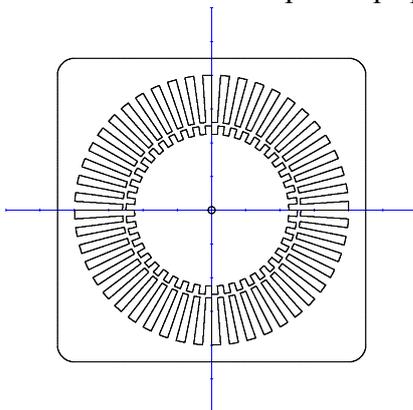
Моделирование ИДДП осуществляется с использованием универсальной математической модели машины переменного тока [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{\psi}}{dt} &= -\mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{i}} + \bar{\mathbf{u}}; \\ \bar{\mathbf{i}} &= \mathbf{L}^{-1}(\theta_r) \cdot \bar{\psi}; \\ M &= \frac{1}{2} \cdot \bar{\mathbf{i}}^T \cdot \left\{ \frac{d\mathbf{L}(\theta_r)}{d\theta_r} \right\}^T \cdot \bar{\mathbf{i}}; \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{(M + M_s)}{J}; \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r; \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \omega_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \omega_2, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\bar{\psi}$ ,  $\bar{i}$ ,  $\bar{u}$  – векторы потокосцеплений, токов и питающих напряжений;  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$  – матрицы сопротивлений и индуктивностей обмоток;  $\omega_r$ ,  $\theta_r$  – скорость и угол поворота ротора;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – текущие фазовые сдвиги и частоты питающих напряжений первой и второй обмоток;  $M$ ,  $M_s$ ,  $J$  – электромагнитный момент, момент сопротивления и момент инерции.

В зависимости от того, какова схема подключения обмоток к электротехническому устройству (звезда, треугольник), осуществляются соответствующие преобразования уравнений в модели (1).

В процессе конструкторских расчётов определяется число зубцов статора и ротора, диаметры соответствующих пластин, глубина пазов (высота зубцов). Для наглядности пластины и некоторые другие ответственные детали вычерчиваются первоначально после расчётов непосредственно в программе MathCAD с применением специально разработанной библиотеки компьютерной графики (рисунок).



**Рисунок. Пластины статора (снаружи) и ротора (внутри) при числе зубцов статора 48 ротора 42 для одного из реальных экземпляров ИДДП**

Параметры пластин, как и других деталей ИДДП, после расчета и визуализации в программе MathCAD передаются в программу КОМПАС, где трансформируются в соответствующие детали для последующего изготовления.

### **Заключение**

Разработанная методология сквозного проектирования неизменяемой части ЭП реализована на примере ЭП с ИДДП и обеспечивает существенное упрощение модификации ЭП при индивидуальном проектировании.

### **Список литературы**

1. Исполнительные электроприводы космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Марарескул, П. В. Авласко, Д. Д. Мищенко, Р. М. Никитин, А. А. Бисов, Р. В. Есин, М. Н. Ульяновченко // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.) / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 62–65.
2. Математические модели электромеханических устройств для космических аппаратов / С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Марарескул, П. В. Авласко, Д. Д. Мищенко, Р. М. Никитин, А. А. Бисов, Р. В. Есин, М. Н. Ульяновченко, М. И. Доровская, В. С. Тимошук, К. С. Протасов, О. В. Осипенко // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.) / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 70–73.

## **О. В. Волкова**

Научный центр оперативного мониторинга Земли  
АО «Российские космические системы», Москва; e-mail: volkova\_ov@ntsomz.ru

### **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТУПНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ И УСЛУГ НА ОСНОВЕ РОССИЙСКИХ ДАННЫХ ДЗЗ ШИРОКОМУ КРУГУ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Данные ДЗЗ давно стали необходимым элементом информационного общества, что стимулирует развитие новых технологий в съемке и обработке информации, расширение областей применения космической информации.

Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» (НЦ ОМЗ) является Оператором российских космических средств (КС) ДЗЗ и реализует полный технологический цикл работ от планирования съемки до обработки полученных данных. Одной из приоритетных задач НЦ ОМЗ в настоящее время является обеспечение оперативного доступа потребителей к данным ДЗЗ и продуктам на их основе.

Материалы космической съемки, получаемые с российских космических аппаратов (КА), служат для решения широкого круга задач в различных областях: сельское хозяйство, лесопользование, природные ресурсы, строительство, мониторинг ЧС, картография, экология, мониторинг ледовой обстановки и др. Потребителями данных ДЗЗ выступают как государственные, так и коммерческие пользователи. Доступность практического использования космических систем и технологий ДЗЗ для всех уровней пользователей является одной из важнейших задач. Эффективность использования систем ДЗЗ зависит от системы предоставления данных. Современный мировой рынок ДЗЗ ориентируется на поставку продуктов, изготовленных на основе материалов космической съемки. Это обеспечивается за счет создания полноценных ГИС-сервисов, позволяющих осуществлять хранение, сбор, и доступ к разнородным данным, их обработку, пространственный анализ, графическую визуализацию.

Российская орбитальная группировка КА ДЗЗ обеспечивает информационную поддержку решения вышеназванных задач в различных сферах государственной деятельности.

В настоящее время в состав отечественной орбитальной группировки входит 8 КА.

КА, имеющие комплекс целевой аппаратуры высокого разрешения: «Ресурс-П» (аппаратура «Геотон», КШМСА-ВР); «Канопус-В».

КА высокого разрешения обеспечивают потребителей высокодетальными данными ДЗЗ в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра для осуществления экологического мониторинга, решения проблем сельского и лесного хозяйства, картографирования, оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, мониторинга социально-экономической инфраструктуры. За 2016 год КА типа «Ресурс-П» (аппаратура «Геотон») отснято более 80 млн. кв. км и более 57 млн. кв. км КА «Канопус-В».

КА, имеющие комплекс целевой аппаратуры среднего и низкого разрешения: «Ресурс-П» (аппаратура КШМСА-СР, ГСА); «Метеор-М»; «Электро-Л».

На основе данных среднего и низкого разрешений проводится анализ состояния облачного покрова и подстилающей поверхности Земли, гелиогеофизические исследования, экологический мониторинг и мониторинг ледовой обстановки.

За последние годы Госкорпорацией «Роскосмос» совместно с Оператором КС ДЗЗ проведена большая работа в направлении повышения эффективности целевого использования российских средств ДЗЗ, что выражается в определении и юридическом закреплении механизма предоставления данных на коммерческой основе и усовершенствовании технологий доступа к банку накопленных пространственных данных.

Одним из таких шагов стала разработка и принятие в эксплуатацию Единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ).

В соответствии с «Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» с целью существенного повышения эффективности предоставления информации ДЗЗ и продуктов на ее основе широкому кругу потребителей была разработана ЕТРИС ДЗЗ. Система объединяет наземные центры приема, обработки и распространения космической информации, интегрируя их информационные ресурсы в единое геоинформационное пространство.

Система включает 12 крупных центров, расположенных по всей территории России – от Калининграда до Хабаровска. В рамках ЕТРИС ДЗЗ создан генеральный каталог архивных данных ДЗЗ, который объединил все существующие российские архивы космической съемки, что значительно упрощает систему поиска данных ДЗЗ для потребителей.

ЕТРИС ДЗЗ решает следующие задачи:

- повышение оперативности выполнения заявок на космические съемки и обеспечение требуемой надежности выполнения заказов на космическую информацию;
- обеспечение оперативного доступа широкого круга потребителей к архивным данным посредством системы геопорталов (в соответствии с их правами на ее использование);
- обеспечение использования центрами и пунктами приема космической информации максимальной производительности КА ДЗЗ по приему информации в различных режимах съемки;
- организация телекоммуникационного взаимодействия между приемными центрами ЕТРИС ДЗЗ с использованием существующих сетей различного назначения и ведомственной принадлежности;
- поэтапный переход на преимущественное использование российских данных ДЗЗ с целью уменьшения зависимости отечественных потребителей от поставщиков КИ ДЗЗ, получаемой с зарубежных КА.

### **Геопортал Роскосмоса**

В целях обеспечения быстрого доступа к данным ДЗЗ широкого круга потребителей разработан Геопортал Роскосмоса (доступен для пользователей с 2010 года). Эксплуатирующей организацией является Оператор КС ДЗЗ.

Геопортал Роскосмоса – это геоинформационный ресурс для доступа к единому банку данных ДЗЗ. Он сочетает в себе средства поиска и просмотра космических снимков земной поверхности с российских космических аппаратов по наиболее полному в России каталогу. С его помощью пользователь может не только оформить заявку на отобранные им по каталогу архивные данные, но и заказать новую съёмку, задав требуемые параметры.

Отличительной особенностью Геопортала Роскосмоса является оперативная публикация данных (для просмотра в полном пространственном разрешении), поступающих с космических аппаратов. Ежедневно в Геопортале размещается

до 50 маршрутов оперативной и архивной съёмки с российских КА типа «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Метеор-М».

Геопортал Роскосмоса обеспечивает: поиск снимков по дате, территории, типу КА и прочим параметрам; отображение покрытий, результатов поиска и метаданных снимков; заказ снимков; получение снимков через FTP (стандартный протокол, предназначенный для передачи файлов по ТСП-сетям).

В настоящее время разработан сервис онлайн-оформления заказа и получения космических снимков. Возможность заказа архивных данных ДЗЗ и выполнения новой съёмки через Геопортал Роскосмоса доступен только для пользователей из группы «Потребители». Такими пользователями могут быть представители федеральных и региональных органов государственной власти и подведомственных им организаций, обратившихся в Госкорпорацию «Роскосмос». В перспективе такую форму аккредитации могут получить и другие заказчики.

В настоящее время ведется непрерывная работа по совершенствованию данного сервиса. Новые разработки выполняются с учетом замечаний пользователей сервиса и эксплуатирующих организаций. В перспективе планируется расширить функциональность системы поиска, разработать англоязычную версию сервиса, обеспечить возможность доступа к метаданным по средствам предоставления программного доступа (API) для определенного круга пользователей, обеспечить интеграцию геопортала с порталом открытых данных.

Портал открытых данных ДЗЗ Роскосмоса обеспечивает открытый доступ к российским данным ДЗЗ с линейным разрешением на местности более 30 м. Портал позволяет пользователям осуществлять поиск данных по единому каталогу ЕТРИС ДЗЗ, просматривать результаты поиска, скачивать отобранные данные.

На портале в открытом доступе размещаются данные с КА типа «Ресурс-П» (аппаратура КШМСА-СР), «Метеор-М» № 2 и «Электро-Л».

### **Единый каталог банка базовых продуктов ДЗЗ**

Системно рассматривая тенденции развития мирового рынка ДЗЗ, можно говорить о нацеленности зарубежных операторов ДЗЗ не столько на распространение данных ДЗЗ, сколько на формирование и распространение продуктов высоких уровней обработки. Пользователям необходимы результаты тематической обработки, получение которых позволяет, на их основе, значительно ускорить и упростить процесс подготовки управленческого решения.

Это обуславливает актуальность развития сервиса «Банк базовых продуктов» (ЕК ББП), предназначенного для создания и распространения базовых продуктов (БП), формируемых по данным отечественных КА ДЗЗ.

Под базовым продуктом понимаются наборы данных, на основе которых могут быть получены различные характеристики наблюдаемых территорий, явлений и/или объектов, позволяющие следить за временной изменчивостью контролируемых объектов, строить карты восстанавливаемых по дистанционным данным геофизических параметров, сопоставлять данные, получаемые из различных источников спутниковых наблюдений, проводить валидацию восстановленных по дистанционным наблюдениям геофизических параметров, получать исходную устойчивую информацию для моделей развития различных явлений и процессов.

С помощью геоинформационного сервиса Роскосмоса ЕК ББП широкий круг пользователей получает простой и быстрый доступ ко всему перечню информационных продуктов с использованием сети Интернет.

БП подразделяются на следующие группы: первичный базовый продукт; узкополосные вегетационные индексы; широкополосные вегетационные индексы; индексы экологического состояния поверхности вод; мультивременные композиты.

ЕК ББП обеспечивает доступ к каталогам данных и БП только для авторизованных пользователей посредством предоставления программного доступа (API). Пользовательский веб-интерфейс каталога обладает следующим функционалом:

- задание области интереса с использованием картографической основы;
- задание критериев поиска, таких как диапазон дат, процент облачности, углы съемки КА для центра кадра, углы Солнца для центра кадра и другие;
- просмотр обзорных изображений;
- выбор вторичных БП для отображенных кадров;
- выбор пар кадров для формирования композитных БП;
- мониторинг состояния заказа в «личном кабинете»;
- скачивание выполненного заказа в течение регламентированного промежутка времени (не более 7 дней) с использованием HTTP (протокол прикладного уровня передачи данных).

При создании БП используются данные следующих сенсоров: МСУ-101/МСУ-102/МСУ-МР КА «Метеор-М» №2; ШМСА-СР/ШМСА-ВР/ГСА/ОЭА КА «Ресурс-П» №1; ШМСА-СР/ШМСА-ВР/ГСА/ОЭА КА «Ресурс-П» №2; МСС КА «Канопус-В» №1. OLI/TIRS КА Landsat-8; ETM+ КА Landsat-7; Hyperion КА EO-1; MODIS КА Terra/Aqua.

### **Проект «Цифровая Земля»**

Государственная корпорация «Роскосмос» наращивает возможности группировки спутников ДЗЗ и начала создание обновляемой цифровой модели всей поверхности нашей планеты. Реализация этого масштабного проекта, в основу которого лягут разработки АО «Российские космические системы», стимулирует развитие национальной экономики. Ядром проекта станет создание базового сплошного покрытия территории всего земного шара.

Параметры планируемого бесшовного покрытия: пространственное разрешение около 1 м, актуальность данных до 2 лет, точность привязки от 1 до 15 м в зависимости от категории потребителя. Проект будет реализован поэтапно в зависимости от приоритетности районов.

Проект станет основой для решения приоритетных государственных задач: ведение кадастров, картография, планирование развития регионов, мониторинг земле и лесопользования, мониторинг ЧС.

На основе базового сплошного покрытия в 2017–2020 годах будут созданы сервисы и продукты для государственных и коммерческих пользователей.

Данные будут предоставляться государственным и частным потребителям. Доступ к бесшовному покрытию и сервисам будет осуществляться с использованием всех современных автоматизированных способов (облачное хранилище, онлайн и офлайн сервис, мобильные приложения).

### **Предоставление данных ДЗЗ коммерческим потребителям**

В конце 2016 года между Госкорпорацией «Роскосмос» и Оператором КС ДЗЗ подписан лицензионный договор о предоставлении права использования данных ДЗЗ, полученных с космических аппаратов «Канопус-В» и «Ресурс-П», что дает возможность распространять данные в интересах коммерческих потребителей.

Установленные договорные отношения реализуют механизм предоставления данных ДЗЗ на коммерческой основе и обеспечивают перечисление в полном объеме в доход федерального бюджета денежных средств, получаемых от использования прав РФ на данные ДЗЗ – результаты интеллектуальной деятельности.

На данном этапе Оператор КС ДЗЗ осуществляет поставку данных ДЗЗ с российских КА через сеть компаний-сублицензиатов.

Любой пользователь, заинтересованный в получении данных ДЗЗ или продуктов на их основе, может обратиться к Оператору или официальному дистрибьютору и в короткие сроки получить данные ДЗЗ и продукты их обработки для реализации намеченных проектов.

Технические возможности по поиску и заказу данных ДЗЗ с российских КА значительно расширились за последние несколько лет, однако стремительно развивающийся рынок геоинформационных сервисов требует постоянного совершенствования и разработку новых сервисов, не уступающих по своей функциональности мировым аналогам. Средствами АО «Российские космические системы» ведется разработка геоинформационного сервиса предоставления архивных данных ДЗЗ полученных с КА типа «Ресурс-П» и «Канопус-В» коммерческим заказчикам, а также создаются тематические сервисы по сельскому хозяйству и лесопользованию.

### **Список литературы**

1. Заичко В. А., Селин В. А. Мероприятия Федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных // Вестн. СибГАУ. № 5 (51). 2013.

2. Федоркова Ю. В. Геоинформационные сервисы Оператора космических систем ДЗЗ // Материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». 1–3 октября 2013 г., г. Рязань.

3. Федоркова Ю. В. Информационный ресурс российской группировки КА ДЗЗ в интересах государственных и коммерческих потребителей // Материалы междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». 23–26 сентября 2014 г., Сиб. федер. ун-т, г. Красноярск.

4. Носенко Ю. И., Лошкарев П. А. ЕТРИС ДЗЗ – проблемы, решения, перспективы (часть 1) // Журн. «Геоматика». 2010. № 3 (8).

5. Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» / А. Н. Марков, А. И. Васильев, Н. А. Ольшевский, А. П. Коршунов, Р. А. Михаленков, Б. Б. Салимонов, А. С. Стрёмов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5.

6. Геопортал ГК «Роскосмос»: сайта. URL: <http://gptl.ru/>.

7. Единый комплекс автоматизированных программно-аппаратных средств формирования и ведения банка базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования Регламент создания базовых продуктов. Банк базовых продуктов межведомственного использования. URL: <https://bbp.ntsomz.ru/>.

8. Геоинформационный конвейер: в России создана Единая информационная система дистанционного зондирования Земли из космоса. Российские космические системы // Новости 21.09.2016 г. URL: <http://russianspacesystems.ru/2016/09/21/geoinformacionnyy-konveyer-v-rossii/>.

**Д. А. Кобец, А. М. Матвеев, А. А. Прошин, А. А. Мазуров**

Институт космических исследований РАН, Москва

e-mail: kobets@d902.iki.rssi.ru

## **КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**

В докладе представлено описание возможностей блоков системы автоматизированной обработки спутниковых данных (в том числе VI-технологий, на основе которых организован уровень контроля), созданной в ИКИ РАН [3].

*Ключевые слова:* обработка данных, параллельные вычисления, автоматическая обработка данных, обработка данных дистанционного зондирования, VI-технологии, OLAP, интерактивная отчетность, отчетные формы.

Система обработки спутниковых данных, используемая в ИКИ РАН, имеет блочную архитектуру, так как подобная архитектура является более удобной для поддержки и дальнейшего масштабирования. Блок, проектируемый под решение определенного спектра задач, имеет детерминированный интерфейс, по средствам которого осуществляется взаимодействие с другими блоками системы. Система обработки спутниковых данных имеет в своем составе следующие уровни блоков:

1. Уровень подготовки данных. К этому уровню относятся блоки формирования комплектов файлов для обработки, которые являются уникальными для каждой тематической обработки. Они отслеживают полноту и комплектность необходимых данных и формируют очередь готовых заданий.

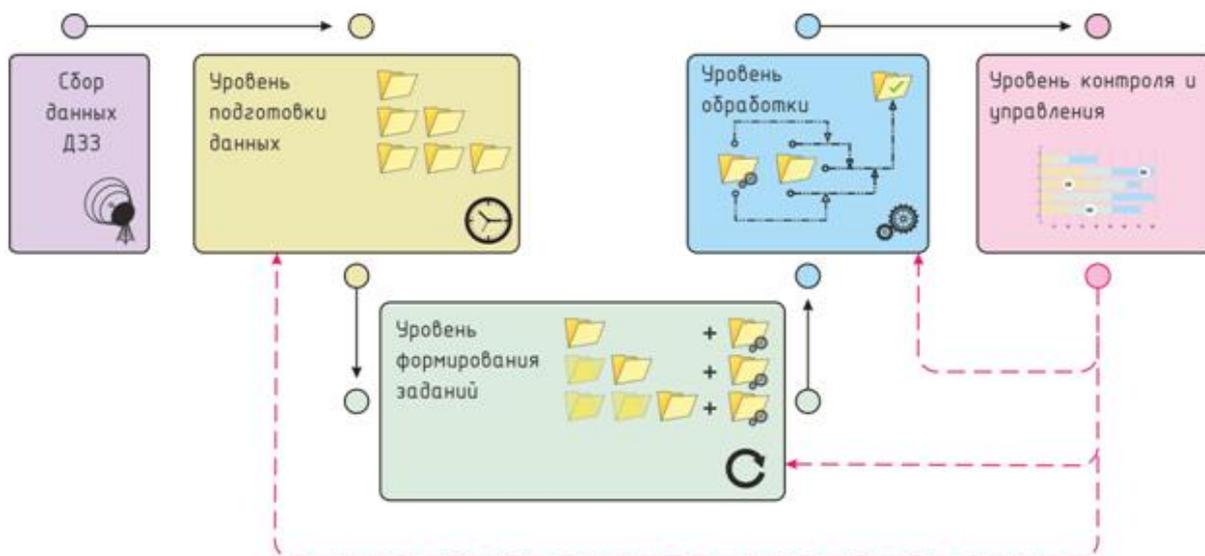
2. Уровень формирования заданий. На нем для сформированных комплектов данных определяются задания для их обработки, которые уже передаются на вычислительные комплексы, проводящие обработку. На этом уровне, в том числе:

- отслеживается максимально допустимое одновременное количество выполнений комплектов, относящихся к заданию одного типа;
- наличие свободных вычислительных ресурсов;
- производится мониторинг количества комплектов, переданных на обработку данных (в том числе для того, чтобы предотвратить загрузку всех мощностей выполнением одного типа заданий в ущерб выполнению других заданий);
- определяются приоритеты заданий;
- и т. д.

3. Уровень выполнения заданий (обработки). Работа этого уровня обеспечивается распределенными кластерами вычислительных машин («обработчиков»). Следует отметить, что из-за постоянного увеличения объемов обрабатываемых данных и формируемых на их основе тематических продуктов возникает необходимость постоянного наращивания используемых вычислительных ресурсов, в том числе и увеличения числа используемых «обработчиков». Поэтому задача контроля используемых вычислительных ресурсов на данном уровне стоит особенно остро [5]. Каждая вычислительная машина, задействованная в кластерах обработки, обычно находится под управлением унифицированного комплекта программ, что позволяет легко расширять парк обрабатывающих компьютеров. Каждый «обработчик» может

выполнять несколько комплектов одного задания, которые он берет вместе с заданиями (сценариями) на обработку с серверов-диспетчеров заданий. Ход обработки каждого комплекта документируется в базе данных уровня контроля.

4. Уровень контроля и управления. На этом уровне агрегируется информация о ходе процессов обработки со всех блоков системы, что позволяет операторам, используя в том числе и инструменты VI-аналитики, оперативно выявлять и устранять неполадки, обеспечивая работоспособность системы в реальном времени.



**Рисунок. Схема автоматизированной обработки спутниковых данных**

Таким образом, получается логически разграниченная на уровни схема (рисунок) с удобным и достаточно понятным управлением потоками обработки. В рамках системы управления легко и единообразно добавляются новые процедуры, наращиваются мощности для обработки и обновляется программное обеспечение. Система контроля позволяет в реальном времени через web-интерфейс производить анализ хода обработки за выбранный промежуток времени (на каких обработчиках производилась обработка, количество удачных и ошибочных обработок и т. п.).

### **Заключение**

После внедрения блоков контроля генерируемая ими интерактивная отчетность, позволяющая анализировать статистическую информацию, передаваемую контурами документирования процессов, предоставляет исчерпывающие сведения о ходе обработки спутниковых данных, следовательно, выявляются в цепях автоматической обработки ошибки более высокого уровня, обнаружение которых до внедрения системы не представлялось возможным.

*Работа выполнена при поддержке РАН и ФАНО (программа Мониторинг госрегистрация № 01.20.0.2.00164).*

### **Список литературы**

1. Организация автоматизированной многопоточной обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга / Д. А. Кобец, А. М. Матвеев, А. А. Мазуров, А. А. Прошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 145–155.

2. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, И. В. Балашов, М. А. Бурцев, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий, Д. А. Кобец, Ю. С. Крашенинникова, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров, А. А. Прошин, И. Г. Сычугов, В. А. Толпин, И. А. Уваров, Е. В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 53–75.
3. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев, И. В. Балашов, С. А. Барталев, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий, А. А. Мазуров, А. М. Матвеев, О. А. Суднева, И. Г. Сычугов, В. А. Толпин, И. А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263–284.
4. Паклин Н., Орешков В. Бизнес-аналитика. От данных к знаниям // OLAP-анализ. СПб., 2013. С. 184–192.
5. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters // Communications of the ACM. 2008. V. 51, №. 1. P. 107–113.
6. Moss L. T., Atre S. Business Intelligence Roadmap: The complete project lifecycle for decision-support applications. Addison-Wesley, 2003. 576 p.

**В. А. Морозов<sup>(1, 2)</sup>, А. В. Паршин<sup>(1, 2)</sup>**

<sup>(1)</sup>ООО «Геоинформационные технологии – Сибирь», Иркутская область, р. п. Маркова

<sup>(2)</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск  
e-mail: raulett@gmail.com

## **О ВЫСШИХ СЕКРЕТАХ ЛЕТНОГО МАСТЕРСТВА ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ БПЛА В СЛОЖНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ**

Рассматривается проблема организации низковысотных дистанционных зондирований Земли с помощью БПЛА. Ряд методов геологической разведки требует выполнения измерений беспилотными комплексами на минимальных высотах и с точным обтеканием рельефа даже в условиях сильно пересеченной местности, в то время как ни ручное управление БПЛА, ни стандартное программное обеспечение распространенных полетных контроллеров не обеспечивает эффективного решения этой задачи. В данной работе описан подход, который авторы разработали для выполнения таких съемок.

*Ключевые слова:* БПЛА, аэрогеофизика, полетная миссия, ГИС, навигация, цифровая модель рельефа.

Одним из перспективных направлений промышленных применений БПЛА в настоящее время является геологическая разведка. На протяжении последних лет появляются реализации на БПЛА геофизических и других методов, ранее существовавших в пешеходном или традиционном аэроварианте [4; 6; 7 и др.]. Известно, что контрастность геофизических полей с высотой снижается, причем аномалии от мелких объектов затухают быстрее, чем от крупных. Для получения максимально детальных данных необходимо выполнять съемку как можно ближе к Земле [1], причем для получения правильной картины поля измерения необходимо вести на постоянной высоте над рельефом. В этом случае в условиях сложных ландшафтных условий возможно получение данных, не уступающих и даже – превосходящих по качеству результаты наземных съемок [5]. Ряд других методов дистанционного зондирования Земли, таких как лидарное сканирование, также наиболее эффективно выполнять на сверхнизких высотах.

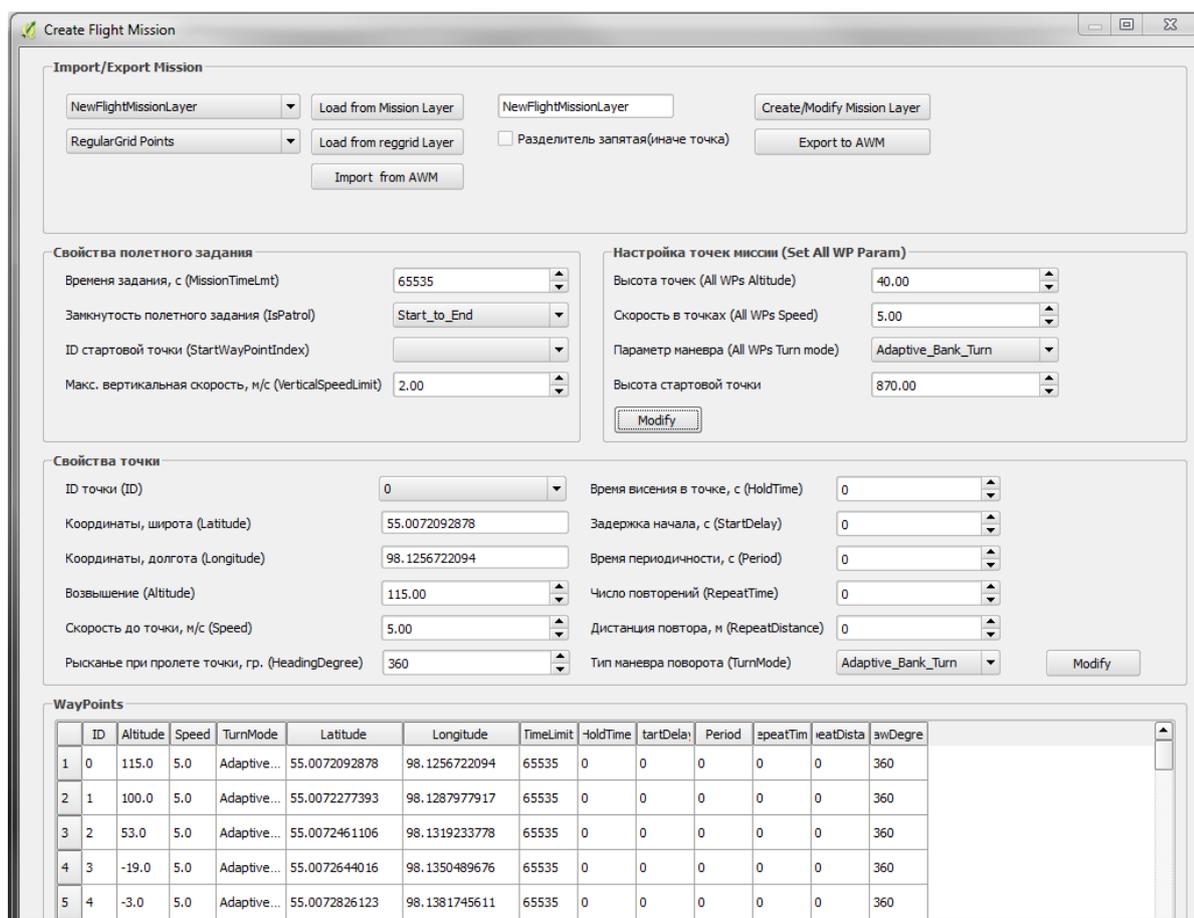
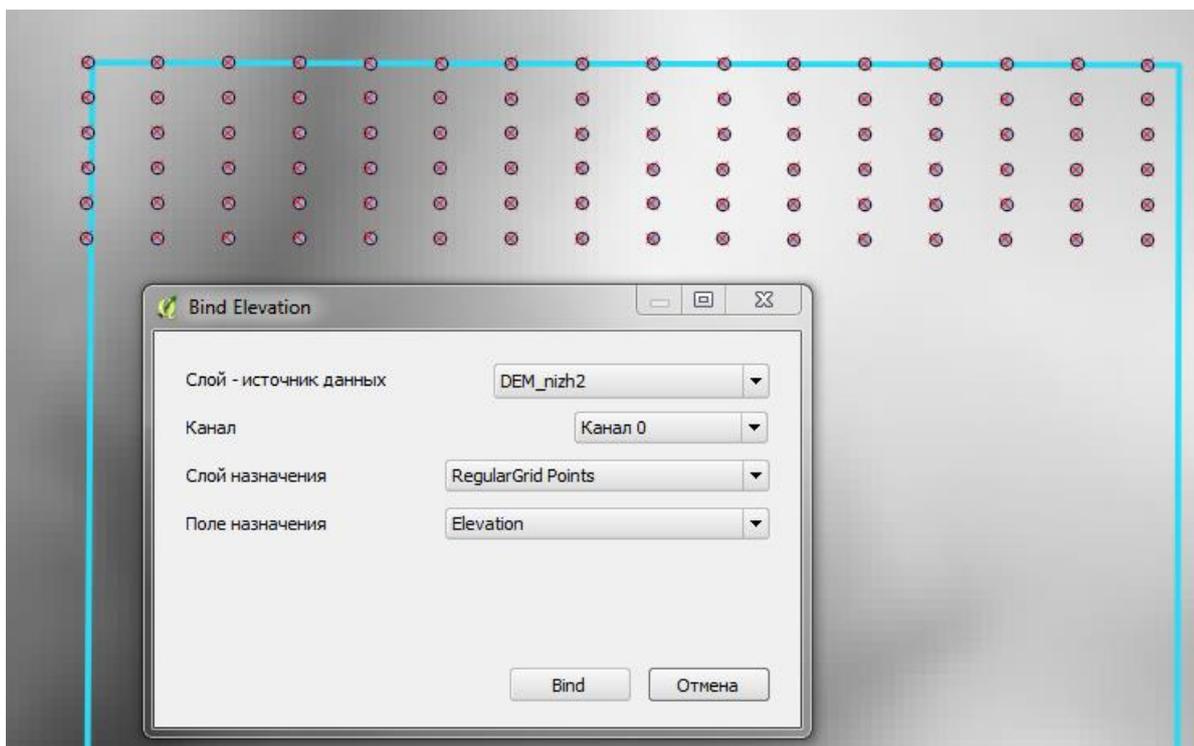
Съемка значительных площадей в режиме обтекания рельефа требует применения систем автопилотирования, поскольку оператор-человек не сможет выдерживать постоянную высоту в сложных ландшафтных условиях. Однако несмотря на стремительное развитие рынка беспилотных технологий, наиболее широкие рыночные применения БПЛА на данный момент ограничиваются задачами, которые не требуют детального следования рельефу местности, в первую очередь это фото-, видеосъемки и обеспечение «точного земледелия». Выполнение аэрофотосъемок обычно выполняется на постоянной барометрической высоте, а сельхозугодия, являющиеся объектом мониторинга и удобрения с БПЛА, и вовсе представляют собой плоские участки рельефа (по крайней мере, в представлении западных и восточных коллег, разрабатывающих такие технологии). В связи с этим обеспечение этих задач в распространенных программах управления БПЛА – «наземных станциях» – сводится к наличию инструмента генерации полетной миссии, закрывающей всю исследуемую площадь с необходимым шагом между профилями, и выполняемой на постоянной высоте над точкой взлета БПЛА. Некоторые нестандартные программные решения [2]

позволяют использовать в качестве цифровой модели местности глобальные цифровые модели рельефа, такие как SRTM 3-arcsecond, которые, однако, недостаточно точны для низковысотных съемок в условиях сложного рельефа, в особенности горных районов. Что произойдет в случае ошибки в полетном задании, например, в результате пропуска в глобальной цифровой модели относительно небольшого возвышения, очевидно даже для неспециалиста, но какова цена такой ошибки при выполнении работ в удаленном от инфраструктуры и связи районе – отчетливо понимают только профессионалы, представляющие риски срыва геологической экспедиции. «За скобками» остаются системы машинного зрения, которые теоретически могут позволить БПЛА избежать столкновения с преградами, однако необходимо учитывать, что полезные нагрузки зачастую имеют выносные сенсоры на подвесе [5], и столкновение с препятствием в первую очередь произойдет не корпусом БПЛА, а с низковисящим датчиком, от чего системы машинного зрения не спасут.

Наряду с точным учетом модели рельефа для следования по нему БПЛА важной позицией разработки правильного полетного задания является возможность ориентироваться при подготовке миссии и на другие пространственные данные. При выполнении геофизических и иных съемок часто необходимо не просто закрыть определенный участок недр съемкой, но и выполнить ее по четко определенным профилям (поскольку наряду с беспилотной съемкой может быть выполнен комплекс наземных исследований – по тем же профилям). Это означает, что при формировании полетного задания необходимо ориентироваться не только на цифровую модель рельефа, но и на комплекс разнородной геоинформации, которая может внести коррективы в методику работ, например, расположение техники на площади, геологическую структуру, результаты других методов исследования Земли. Даже наиболее продвинутые рыночные решения не обладают возможностью загружать и отображать данные в форматах геоинформационных систем. Обычно в качестве картографической подложки в распространенных наземных станциях используются карты Google, которые совершенно необязательно предоставляют свежую и детальную информацию об объектах работ и естественно не содержат проектных решений.

Таким образом, для выполнения низковысотных съемок в сложных условиях необходимо решение, которое обеспечило бы возможность полета БПЛА по сети точно географически привязанных профилей с постоянной высотой над Землей. Авторы разработали следующий подход: нет необходимости в дублировании программного обеспечения наземных станций полетных контроллеров, с помощью которого ведется просмотр телеметрии. Достаточно создать решение, которое позволит оперативно генерировать полетные задания с учетом цифровой модели местности и при необходимости – других источников пространственной информации. Поскольку обработка геопро пространственных данных, в том числе получаемых с БПЛА, осуществляется средствами геоинформационных систем, наиболее разумно создать программный модуль, который обеспечит разбиение и подготовку полетных миссий, а затем выгрузку их в форматы различных полетных контроллеров. Таким образом, достаточно будет импортировать созданные с помощью ГИС-модуля файлы средствами ПО наземной станции и с ее же использованием запустить выполнение полетного задания.

В результате было создано программное решение, получившее название SibGIS Flight Planner. Разработанный модуль позволяет выполнять следующие операции: выбор направления профиля; разбиение сети пикетов с установленным шагом между профилями и пикетами; извлечение высот из ЦМР; конфигурация полетной миссии. Последнее интерфейсное окно приведено на рис. 1, в нем имеется возможность задания широкого набора параметров – от высоты и скорости в каждой точке до режима прохождения поворотов.



**Рис. 1. SibGIS Flight Planner Создание полетной миссии**

Аналогично обычно применяемому авторами подходу к созданию специализированного программного обеспечения геологического назначения, в том

числе навигационных систем [3], модуль реализован как plugin для открытой геоинформационной системы QuantumGIS. Таким образом, подготовка ЦМР любой сложности выполняется стандартными средствами ГИС, существует возможность редактировать точки полетного задания на любом этапе, учитывая при этом всю совокупность геологических, топографических и иных данных, имеющихся на объект работ.

В настоящий момент поддерживаются контроллеры DJI, Pixhawk, TopXGun, SmartAP. Примеры полетных миссий для разных контроллеров приведены на рис. 2.

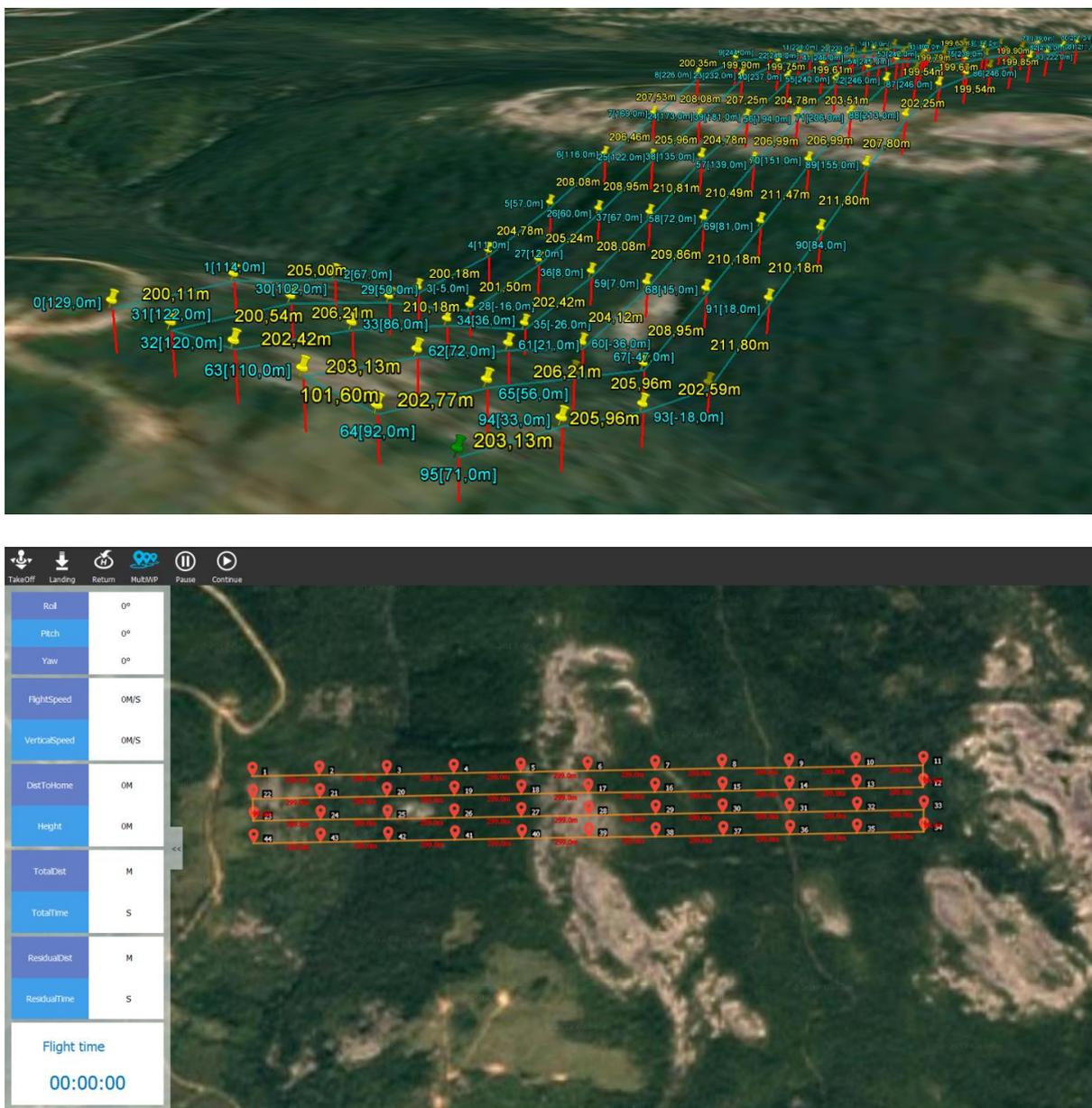


Рис. 2. Созданные миссии, представленные средствами dji GS и filgh planner

### Заключение

В настоящее время нет никаких сомнений в том, что данная технология является одной из важнейших компонент разрабатываемого авторами беспилотного комплекса. Работы в природно-ландшафтных условиях любой степени сложности без нее были бы невозможны. За последние три года с использованием данного подхода были

обеспечены работы более чем на 10 объектах, находящихся в горных районах Прибайкалья, Бурятии, Забайкалья и севера Иркутской области. Высокая плотность точек обеспечивает возможность точного следования модели рельефа и, соответственно, получения правильных данных.

Представляется, что описанный подход является наиболее рациональным для обеспечения точного пилотирования БПЛА в условиях сложного рельефа.

#### **Список литературы**

1. Перспективы использования аэрогеофизических методов для детальных исследований / В. П. Воробьев, В. А. Глаголев, В. Н. Кирсанов, А. С. Нахабцев, В. В. Филимонов, В. С. Цирель // Геофизическая аппаратура. 1995. н. 100. С. 8–15.
2. Наземная станция. URL: UGSC // <https://www.ugcs.com/>.
3. ГИС как судовая электронно-картографическая система / А. В. Паршин, В. А. Мельников, О. И. Демина, Е. А. Руш // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2012. № 1. С. 40–46.
4. Паршин А. В. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки // Патент РФ. № приоритет от 19.07.2016.
5. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Ч. 2 / А. В. Паршин, А. Е. Будяк, А. В. Блинов, А. Н. Костерев, В. А. Морозов, А. О. Михалев, С. Н. Просекин, Ю. И. Тарасова, А. М. Спиридонов // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155.
6. Experimental aeromagnetic survey using an unmanned air system / A. Wood, I. Cook, B. Doyle, M. Cunningham, & C. Samson // The Leading Edge. 2016. № 35 (3). P. 270–273.
7. Aeromagnetic surveying using a simulated unmanned aircraft system / R. M. Caron, C. Samson, P. Straznicky, S. Ferguson and L. Sander // Geophysical Prospecting. 2014. V. 62, № 2. P. 352–363. 075

**А. В. Паршин<sup>(1, 2, 3)</sup>, А. В. Блинов<sup>(1, 3)</sup>, А. О. Михалев<sup>(1, 3)</sup>,  
В. А. Матыцин<sup>(3)</sup>, С. Н. Просекин<sup>(1, 3)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск

<sup>(2)</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

<sup>(3)</sup>ООО «Геоинформационные технологии – Сибирь», Иркутская область, р. п. Маркова  
e-mail: sarhin@geo.istu.edu

## **НИЗКОВЫСОТНЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С БПЛА КОМПЛЕКСОМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ – НОВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Анализируются актуальные проблемы геологической отрасли. Делается вывод о целесообразности разработки новых подходов к геологическим работам, лучше соответствующим новым условиям ведения работ: снижению объема государственного заказа, сокращению сроков и стадий ГРП, переходу на исследование слабоизученных площадей с неясными перспективами по пионерским лицензиям. Предлагается новая методология и комплекс технологий дистанционных исследований, которые позволят повысить эффективность поисков и разведки рудных месторождений в сложных природных условиях.

*Ключевые слова:* БПЛА, аэрогеофизика, мультиспектральная съемка, поиски и разведка полезных ископаемых, ГИС.

Фонд легкооткрываемых месторождений России в основном исчерпан и перспективы расширения минерально-сырьевой базы связаны с поисково-оценочными и разведочными работами на удаленных и часто труднодоступных объектах Восточной Сибири, Якутии, Дальнего и Северо-Востока, характеризующихся сложными природно-ландшафтными условиями: заболоченностями, курумами, сильно пересеченным рельефом. Эти природные факторы затрудняют и удорожают постановку традиционных наземных вариантов геологических поисков, а также и классической аэрогеофизической съемки, которая к тому же не обеспечивает высокой детальности в условиях сложного рельефа. При этом современная ситуация в геологической отрасли характеризуется снижением бюджетных затрат на геологическое изучение территорий, вектор развития направлен на замещение объемов государственной геологоразведки частными инвестициями за счет предоставления возможности получения организациями реального сектора экономики «зеленых» лицензий на слабоизученные лицензионные участки [3]. Традиционно геологическое изучение недр за государственные средства предполагало многостадийные исследования – от мелкомасштабных региональных работ до оценки ресурсов или запасов, после чего производился конкурс на лицензионный участок с уже очевидными промышленными перспективами. Однако «зеленые» лицензии не гарантируют наличие на участке рентабельных объемов полезных ископаемых, в связи с чем современная ситуация требует разработки принципиально нового подхода к геологопоисковым и разведочным работам – крупные инвестиции в участки с неясными перспективами нецелесообразны. Кроме того, частные инвесторы, в отличие от государства, не ориентированы на многолетние полистадийные работы.

В основе нового подхода должны лежать методы и технологии, позволяющие исследовать сложно проходимые и удаленные районы не только быстро и дешево, но и

с высокой детальностью уже на первых стадиях ГРР, причем само понятие «стадийности» в таких случаях в некоторой степени исчезает. При этом слабоизученные территории должны быть исследованы таким комплексом методов, который позволил бы обоснованно и с различных сторон охарактеризовать геологическую обстановку и выделить в пределах всей площади отдельные перспективные участки, на которых в дальнейшем будут сосредоточены дорогостоящие работы, такие как бурение. По мнению авторов, в такой постановке проблемы наиболее универсальными методами геофизической разведки можно считать магниторазведку и гамма-спектрометрию, которые целесообразно дополнить технологиями получения точной цифровой модели рельефа (что позволит более обоснованно решать обратные задачи) и мульти- или гиперспектральной съемкой, аналогичной спутниковой.

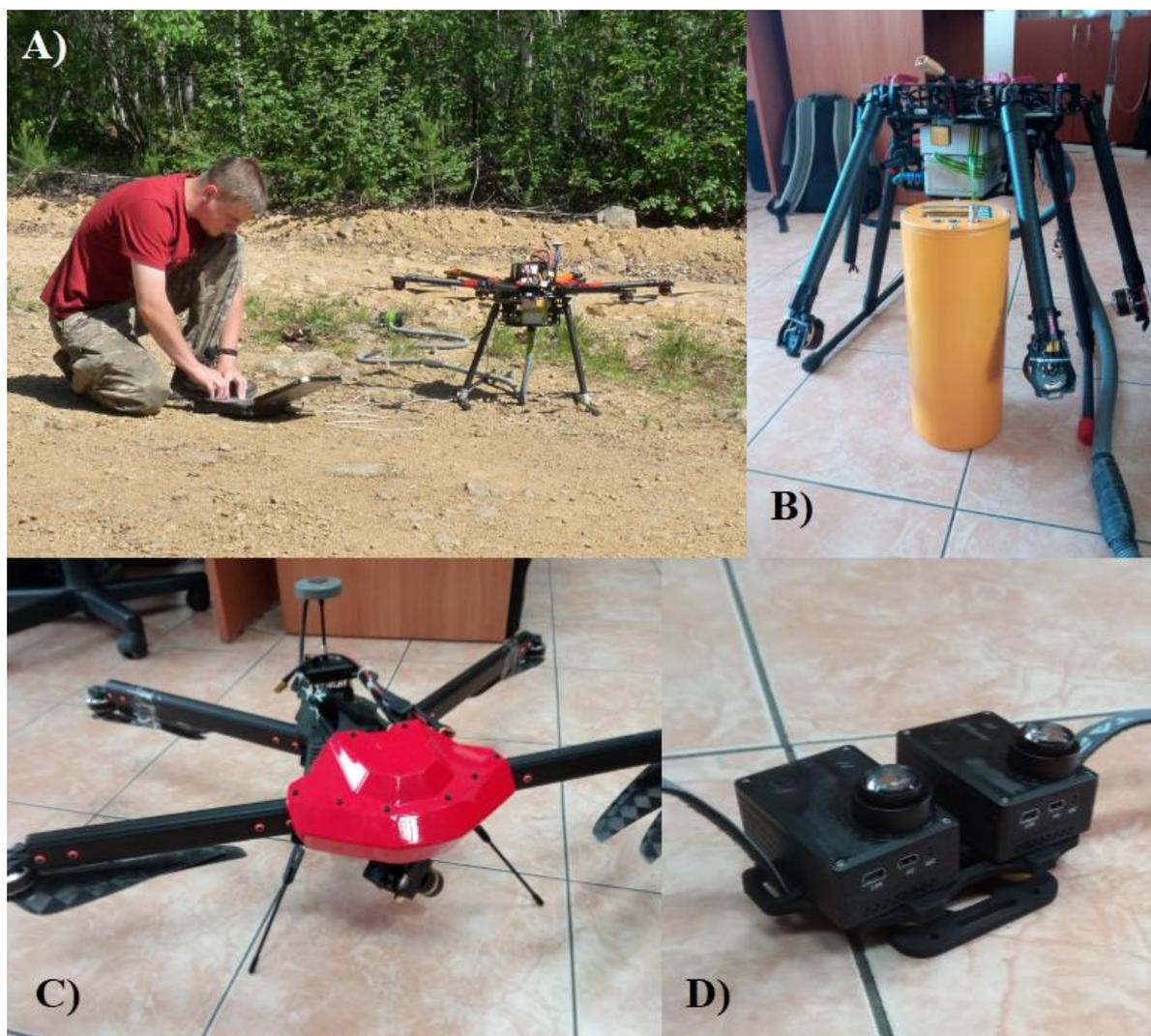
Избежать проблем с постановкой наземных съемок в сложных ландшафтных условиях можно только с помощью переноса геофизических сенсоров с плеч операторов – в воздух. При этом, как известно, геофизические аномалии с высотой теряют контрастность, причем аномалии от небольших объектов затухают быстрее, чем от крупных, в связи с чем традиционные аэрогеофизические технологии на базе легких вертолетов и самолетов (АН-2, МИ-8 и т. п.) не обеспечивают высокой детальности данных. Это означает, что для получения геофизических данных более высокой детальности необходимо выполнять съемку как можно ближе к земле и на постоянной высоте с высокоточным обтеканием рельефа. Реализовать такой режим съемки без риска для экипажа воздушного судна возможно с помощью беспилотных технологий, которые в последние годы развиваются в очень быстром темпе. Однако с позиций решения геологических задач на настоящий момент известны только единичные примеры создания беспилотных технологий магниторазведки [2, 4, 5 и др.], первые из которых были реализованы на больших бензиновых самолетах [5] и как по методике съемки (без точного обтекания рельефа), так и по ее детальности соответствовали традиционным аэрометодам, обеспечивая при этом более высокую экономическую эффективность за счет снижения затрат на летные часы «большой» авиации.

На протяжении последних нескольких лет авторы разрабатывали комплекс взаимодополняющих технологий, которые бы позволили более обоснованно судить о геологической обстановке на слабоизученных площадях, при этом позволяя выполнять исследования с высокой детальностью, сравнимой с наиболее высокоточными наземными съемками, и при этом с кратным повышением производительности и экономической эффективности. На данный момент разработаны следующие технологии: магниторазведка, гамма-спектрометрия, мультиспектральная фотограмметрия (рис. 1). Созданы специализированные конструкции тяжелых мультироторных беспилотных летательных аппаратов, характеризующиеся сниженными электромагнитными и вибрационными помехами на сенсоры. Мультикоптеры обеспечивают наиболее точное пилотирование в условиях сложного рельефа, низкую себестоимость аэромобильной части комплекса и высокую надежность. Сенсоры также разработаны специально, с учетом условий и методик съемки. Разработано программное обеспечение для подготовки полетных миссий и обработки данных. Комплекс получил название SibGIS UAS.

Для выполнения наиболее прецизионных съемок разработанным комплексом разработана следующая методика работ:

1. Выполняется построение цифровой модели местности по топографическим данным, например, ЦМР SRTM 1-arcsecond.
2. Выполняются фотограмметрические работы с помощью технологии мультиспектральной фотограмметрии. В результате можно получить достаточно точную для навигации геофизических БПЛА цифровую модель местности.
3. С помощью созданного программного обеспечения [1] выполняется подготовка полетных заданий для БПЛА с геофизическими сенсорами таким образом, чтобы

обеспечить исследование территории по регулярной сети профилей и пикетов с обтеканием рельефа и постоянной скоростью полета. Выполняется экспорт полетных заданий в форматы, поддерживаемые используемыми системами автопилота.



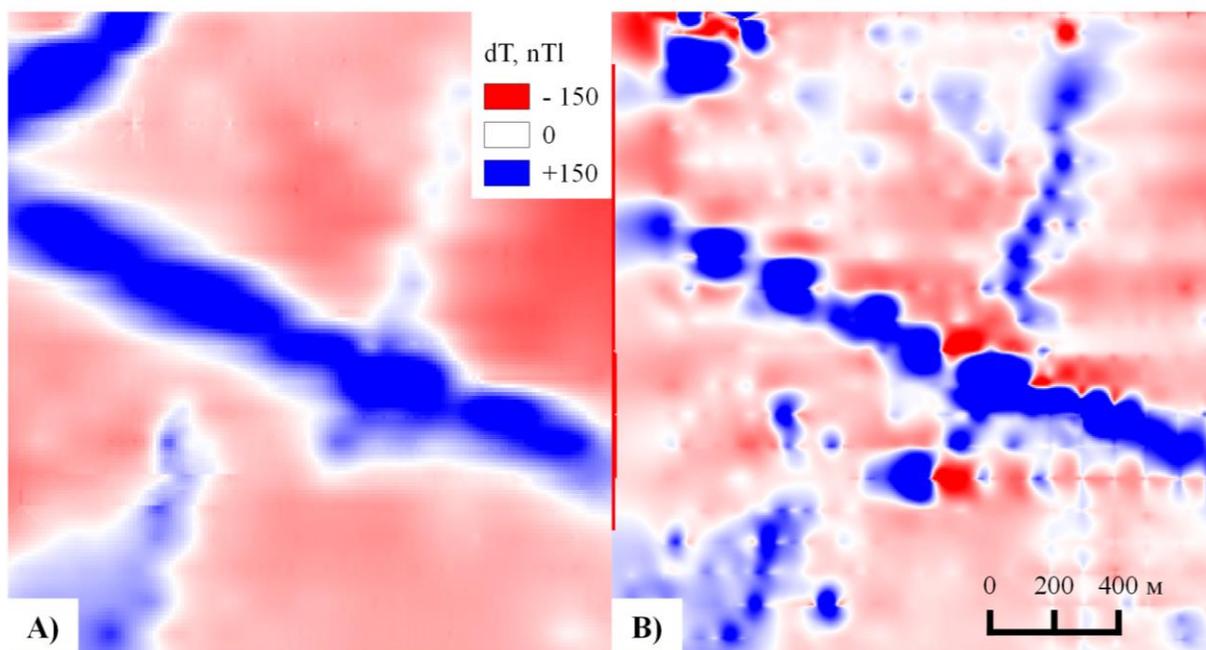
**Рис. 1. А) «тяжелый» БПЛА с протонным магнитометром; В) гамма-спектрометр рядом с тем же БПЛА; С) «легкий» БПЛА; D) мультиспектральные камеры**

4. Выполняются измерения мультикоптерами с установленными сенсорами – одним (феррозондовый магнитометр + гамма-спектрометр) или двумя (в этом случае для магниторазведки используется более точный протонный оверхаузерский магнитометр [2]). Использование оверхаузерского магнитометра является необходимым для площадей с низкой контрастностью значимых аномалий магнитного поля (2–4 нТл), которая чрезвычайно затруднит обработку и интерпретацию данных, полученных любым «относительным» (в данном случае феррозондовым) магнитометром, усложнит съемку, в то время как абсолютный протонный магнитометр позволит получать кондиционные данные *in situ*. Однако на многих участках контрастность значимых аномалий магнитного поля существенно выше, в связи с чем для получения кондиционной съемки достаточно укладываться в стандартные погрешности, предписываемые действующей инструкцией для магнитной съемки ( $\pm 5$  нТл), что феррозондовый прибор вполне обеспечивает при существенно большей (за счет меньшей массы прибора) производительности съемки. При отсутствии

необходимости в гамма-съемке в связи с геологическими особенностями площади, магниторазведка выполняется протонным магнитометром.

5. Выполняется стандартная предобработка данных: учет вариаций и фона, картографирование данных, внесение поправок в гамма-съемку, построение цифровых моделей поля, оценка точности съемки.

На протяжении последних двух лет с помощью разработанного комплекса выполнен значительный объем съемок преимущественно в горных районах Иркутской области, Бурятии и Забайкалья. На рис. 2 представлено сравнение результатов беспилотных и наземных съемок на одной из площадей в Восточном Саяне (Иркутская область). Данный пример хорошо показывает, что при реальном выполнении съемок в сложных ландшафтных условиях (крутые склоны, большие перепады высот, курумы, густые заросли), результаты съемки беспилотным комплексом существенно лучше, чем наземные измерения, в которые проявлена профильность и точки с некорректными измерениями.



**Рис. 2. Результаты БПЛА-съемки (А) в сопоставлении с наземной (В) на примере магниторазведки. Данные БПЛА-съемки – in situ с учетом вариаций – получены авторами, данные наземной съемки – работа предшественников из отчета по объекту N, прошедшего апробацию в установленном порядке. Метод интерполяции universal kriging, параметры одинаковые**

Безусловно, в теории наземную съемку возможно выполнить с более высоким качеством, произведя предварительные детальные топографические работы, вырубив профили для легкого прохождения операторами, поручив измерения высококвалифицированным операторам и не требуя высокой производительности работ. Однако такой подход полностью противоречит смыслу применения легких геофизических методов как средства недорогого и оперативного исследования площадей в целом.

Для сравнения производительности можно сказать, что беспилотным комплексом (требуется два специалиста) можно выполнять не менее 50 погонных километров магнитометрической, или 30 километров АГСМ-съемки, в день, в то время как маршрутная пара в таких ландшафтных условиях выполнит не более 5 погонных километров съемки в день теми же методами.

## **Заключение**

Авторы считают, что в ближайшей перспективе низковысотные съемки с мультикоптеров могут в значительной степени заменить традиционные подходы к выполнению легких геофизических методов, существенно превосходя их по производительности и экономической эффективности и не уступая по качеству.

В настоящее время производится разработка технологии беспилотной электроразведки, которая еще более расширит арсенал применения комплекса SibGIS UAS.

## **Список литературы**

1. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Ч. 1 / А. В. Паршин, А. Е. Будяк, А. В. Блинов, А. Н. Костерев, В. А. Морозов, А. О. Михалев, С. Н. Просекин, Ю. И. Тарасова, А. М. Спиридонов // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 144–149.
2. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Ч. 2 / А. В. Паршин, А. Е. Будяк, А. В. Блинов, А. Н. Костерев, В. А. Морозов, А. О. Михалев, С. Н. Просекин, Ю. И. Тарасова, А. М. Спиридонов // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155.
3. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2030 года: проект. М., 2016. 27 с.
4. Применение высокочастотного магнитометра для легких БПЛА при геолого-геофизическом изучении трубок взрыва / А. П. Фирсов, И. Н. Злыгостев, П. Г. Дядьков и др. // Материалы конф. Интерэкспо-ГеоСибирь, 2015, Новосибирск. С. 299–304.
5. Cunningham M. Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems // A thesis of Master of Science Diss., Carleton University, Canada, Ontario, 2016. 144 p.

**Д. С. Тряпкин, Н. О. Дмитренко**

ОАО «НПК «РЕКОД», Москва

e-mail: tds@rekod.ru; ndmitrenko@rekod.ru

## **ГЕОВІ – ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ**

В статье представлена инструментальная программная среда, предназначенная для создания систем, обеспечивающих на основе ДДЗЗ поддержку принятия решений на различных уровнях регионального управления в целях мониторинга, анализа и прогнозирования развития процессов природного и антропогенного характера, информационного обеспечения деятельности ситуационных центров. Рассмотрены вопросы информационного взаимодействия таких систем в рамках ИПД РФ.

*Ключевые слова:* ДДЗЗ, ПСППР, ИПД РФ, BI (Business intelligence), SOLAP (Spatial online analytical processing).

### **Роль данных ДЗЗ в решении задач регионального управления**

В настоящее время приоритетным направлением применения ДДЗЗ является поддержка принятия обоснованных управленческих решений на всех уровнях государственного управления.

Системы, использующие ДДЗЗ при решении задач мониторинга, анализа и прогнозирования развития ситуаций, обеспечивающие деятельность руководства территориальных образований (регионов, муниципальных образований) и отраслевых предприятий, относятся к классу систем поддержки принятия решений, основанных на пространственных данных (ПСППР) и предназначены для поддержки принятия решений в интересах:

- развития инфраструктуры территориального образования и эффективного управления системами социального обеспечения, здравоохранения, образования, жилищно-коммунального хозяйства, транспорта и т. п.;
- эффективного использования природных ресурсов, решения проблем экологии;
- прогнозирования и предотвращения экстремальных ситуаций, создания сценариев их возникновения и развития, непрерывного мониторинга характеристик и показателей потенциально опасных природных и техногенных факторов и осуществления управления в экстремальных условиях;
- привлечения инвестиций, поддержки наиболее значимых инновационных проектов и др.

В существующих федеральных, муниципальных и отраслевых информационных системах накоплены огромные массивы данных, которые зачастую содержат устаревшую и/или недостоверную информацию. Использование оперативно получаемых ДДЗЗ и продуктов их тематической обработки обеспечивает тот уровень актуальности и достоверности информации о территории, который необходим при создании систем, ориентированных на поддержку принятия решений.

Таким образом, для выработки эффективных решений при управлении регионом необходима консолидация информации из различных источников – хранилищ данных

ДЗЗ, федеральных, муниципальных, отраслевых и ведомственных учетных и информационно-аналитических систем, открытых информационных ресурсов.

### **Вопросы создания информационной и программно-технологической инфраструктуры управления регионом**

Поскольку для эффективного решения задач управления территорией региона необходима достоверная и юридически значимая информация из различных источников, основой информационной и программно-технологической инфраструктуры управления территориями субъекта РФ является создание единого информационного пространства региона – постоянно актуализируемого участниками информационного взаимодействия информационного ресурса.

Базовыми геоинформационными ресурсами для формирования единого информационного пространства являются:

- отраслевые данные (первичные отраслевые информационные ресурсы, создаваемые при управлении лесами, сельским хозяйством и т. д.);

- данные муниципальных образований (первичные информационные ресурсы муниципальных образований, входящих в состав региона).

Для актуализации базовых геоинформационных ресурсов используются:

- данные ДЗЗ – космо- и аэрофотоснимки (растровый формат) и продукты на основе ДДЗЗ, представляющие собой результаты тематической их интерпретации (векторный формат);

- информация о базовых пространственных объектах территории, представляющая собой топографо-геодезическую основу и являющаяся каркасной векторной моделью территории.

Процессы получения и доведения до потребителей ДДЗЗ реализованы в Единой территориально-распределенной информационной системе дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ), а принципы ведения информации о базовых пространственных объектах и создания единого геоинформационного пространства в интересах информационного обеспечения различных уровней власти изложены в Концепции Инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации (ИПД РФ) [1] и предусматривают:

- ориентацию на государственные и международные стандарты в области создания, хранения и распространения пространственных данных;

- ответственность за актуализацию, корректность и распространение некоторого набора пространственных данных, описывающих тот или иной объект местности, того субъекта ИПД, в чьем хозяйственном ведении или оперативном управлении находится соответствующий объект;

- обязательную идентификацию набора пространственных данных описывающими их метаданными в целях унификации доступа к ним.

В связи с этим каждому участнику информационного взаимодействия в рамках единого информационного пространства региона необходимо:

- иметь доступ к информационным ресурсам других субъектов информационного взаимодействия, являющихся для него источниками данных (иметь возможность воспользоваться предоставляемыми информационными сервисами);

- иметь возможность создать/актуализировать/проверить свой информационный ресурс;

- иметь возможность предоставить (опубликовать) созданный им информационный ресурс другим участникам информационного взаимодействия.

Информационные ресурсы, создаваемые участниками информационного взаимодействия, могут быть транзакционными – публикуемыми из федеральных,

отраслевых, муниципальных и других учетных (OLTP) систем, а могут быть информационно-аналитическими, то есть содержащими агрегированную аналитическую информацию по какому-либо направлению деятельности.

На основе базовых геоинформационных ресурсов и формируется обобщенный аналитический ресурс региона, используемый при принятии управленческих решений.

С учетом вышеизложенных принципов и требований, с целью создания, ведения и публикации аналитических геоинформационных ресурсов различной тематики для различных уровней территориального управления ОАО «НПК «РЕКОД» разработана программная платформа, представленная в настоящей статье.

### **Технологии создания ПСППР**

ПСППР относятся к классу BI (Business intelligence) систем с поддержкой пространственных данных.

Традиционно BI инструменты предназначены для консолидации в едином хранилище данных, необходимых для решения задачи анализа, и предоставления информации пользователю в удобном для восприятия и многомерного OLAP-анализа виде. Классические BI-системы [2] не поддерживают возможность создания геопространственных измерений и оперирования с ними.

В свою очередь географические информационные системы (ГИС), предназначенные для пространственного анализа явлений и процессов не поддерживают функций многомерного OLAP-анализа.

Для оперативного мониторинга территориально распределенных явлений и процессов, и всестороннего многомерного анализа пространственной информации в реальном режиме времени, который необходим в задачах территориального управления, требуются BI системы с встроенным в многомерную модель географическим типом данных – геопространственные BI (GeoBI).

Ниже представлена GeoBI-платформа, разработанная ОАО «НПК «РЕКОД» и применяемая при построении ПСППР, основанных на ДДЗЗ.

### **GeoBI – платформа для создания ПСППР на основе данных ДЗЗ**

GeoBI – платформа для создания ПСППР различного назначения, разработанная в рамках работ ОАО НПК «РЕКОД», проводимых по НИР «Мониторинг-СГ».

Платформа апробировалась на задаче контроля вырубki лесных массивов с помощью данных космического мониторинга при управлении лесным хозяйством региона. На основе разновременной статистической и пространственной информации, интегрированной в аналитическом хранилище лесопользования, создавались интерактивные аналитические отчеты, отражающие различные аспекты управления лесным хозяйством с помощью карт, таблиц, графиков, диаграмм.

Компоненты GeoBI-платформы в интерактивном режиме позволяют:

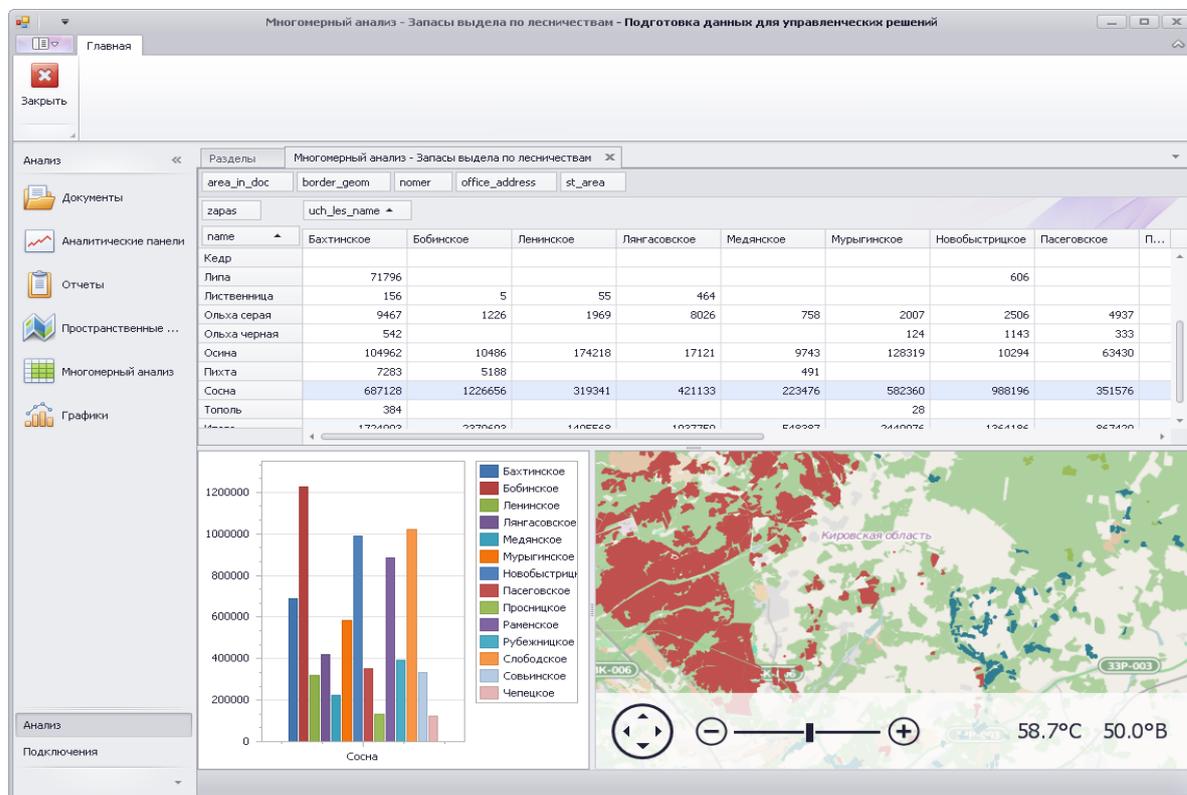
- проектировать и создавать аналитические хранилища SDWH (spatial data warehouse) для любой предметной области анализа только визуальными средствами (без программирования);

- консолидировать разновременную и разнородную пространственную информацию из различных источников в едином хранилище с обеспечением целостности, полноты, и достоверности данных. Для использования ДДЗЗ реализован специальный интерфейс доступа к данным ЕТРИС ДЗЗ;

- создавать интерактивные аналитические отчеты, позволяющие осуществлять многомерный OLAP-анализ пространственных данных – SOLAP (spatial online analytical processing). Для примера на рисунке ниже представлен интерактивный аналитический отчет для анализа запасов древесины по породам и лесничествам;

– публиковать интерактивные аналитические отчеты на специализированном геопортале в виде оперативных (ситуационных) и стратегических информационных панелей для обеспечения доступа заинтересованных пользователей и принятия на их основе управленческих решений;

– предоставлять пространственную аналитическую информацию в виде web-сервиса для обеспечения взаимодействия в рамках ИПД РФ.



**Рисунок. Интерактивный аналитический отчет для SOLAP-анализа**

### **Заключение**

Разработанные программные средства GeoVI-платформы позволяют создавать высокоэффективные ПСППР, обеспечивающие поддержку принятия управленческих решений на основе данных ДЗЗ и других источников пространственной информации в различных отраслях экономики и управления.

Разработанная GeoVI-платформа объединяет огромный потенциал пространственного анализа и визуализации на карте с мощными функциями бизнес-анализа. Отличительной особенностью платформы является обеспечение технологического процесса верификации информации на основе ДДЗЗ.

Реализация требований ИПД РФ позволяет обеспечить взаимодействие в рамках единого информационного пространства региона и создание обобщенного аналитического ресурса для принятия решений на уровне субъекта РФ. В настоящее время других подобных отечественных разработок пока не отмечено.

### **Список литературы**

1. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21.06.2006 № 1157-р.
2. Паклин Н. Б. Орешков В. И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Питер, 2013. 704 с.: ил.

**С. В. Цаплин, С. А. Болычев**

Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С. П. Королева, Самара; e-mail: tsaplin@samsu.ru

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МИКРОСПУТНИКА**

Для создания отечественной группировки спутников дистанционного зондирования Земли с малым временем получения снимка по запросу предложен микроспутник с оптико-электронным телескопическим комплексом линзового типа. На основе трехмерной модели проведен расчет теплового режима объектива с учетом реальных условий эксплуатации микроспутника. Показано, что система обеспечения теплового режима поддерживает заданный диапазон температур оптических элементов при умеренном энергопотреблении.

*Ключевые слова:* микроспутник, дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный телескопический комплекс, система обеспечения теплового режима, температурное поле, тепловой поток.

### **Введение**

Оптико-электронные телескопические комплексы (ОЭТК) предназначены для получения высокодетальных космических снимков земной поверхности. У современных космических аппаратов с ОЭТК сверхвысокого разрешения с габаритами до 10 м и массой более 5 т разрешение на местности составляет 0,5 м и менее.

Однако реалии сегодняшнего дня диктуют новые требования к ОЭТК: наряду с качеством изображения важное значение приобретает такой фактор, как время получения снимка заданной территории по запросу. Военные тактические операции, природные и техногенные катастрофы, – это те ситуации, в которых актуальность полученной информации составляет от нескольких минут до нескольких часов. У традиционных ОЭТК время получения снимка по требованию составляет сутки и более, кроме того, ввиду малого количества таких спутников на орбите обработать все чрезвычайные ситуации в реальном времени не представляется возможным.

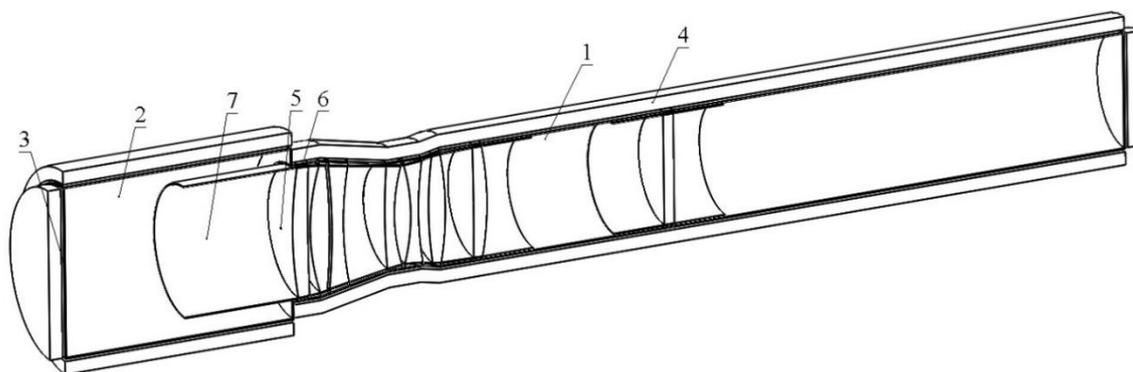
Выходом из данной ситуации является группировка микроспутников (космических аппаратов с габаритами не более 1 м и весом не более 50 кг) с ОЭТК. Численность такой группировки может составлять до 25 микроспутников со сроком активного существования 60–90 суток на низкой околоземной орбите до 200 км. Группировка сможет обслуживать территории местного и регионального значения с разрешением на местности до 1,5 м, при этом время получения снимка по запросу составит не более 90 минут.

В США уже приступили к реализации этой идеи – программа SeeMe фирмы DARPA [1]. Для недопущения технического отставания и сохранения конкурентоспособности в космической отрасли необходима реализация аналогичного проекта в России.

Цель исследований данной работы связана с обеспечением теплового режима с минимизацией термоаббераций в соответствии с условиями эксплуатации ОЭТК микроспутника для получения качественного изображения при решении задач дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

### ОЭТК микроспутника на основе линзового объектива

Важной составной частью микроспутника является ОЭТК. Рассмотрим ОЭТК, оптическая часть которого представляет собой линзовый объектив с коррекционной пластиной, светозащитной блендой и крышкой светозащитного устройства. Общий вид геометрической 3D-модели ОЭТК приведен на рис. 1.



**Рис. 1. Модель линзового объектива микроспутника: 1 – корпус; 2 – бленда; 3 – крышка СЗУ; 4 – ЭВТИ; 5 – линза; 6 – оправа линзы; 7 – тепловой экран**

Объектив обладает следующими массогабаритными характеристиками:

- общая длина 840 мм;
- диаметр бленды 130 мм;
- диаметр первой линзы 100 мм;
- фокусное расстояние 600 мм;
- масса оптических элементов – 1,75 кг.

Объектив обладает следующими рабочими характеристиками:

- разрешение на местности – 1,5 м (теоретическая оценка для  $\lambda = 0,55$  мкм);
- угол поля зрения объектива –  $2^\circ$ ;
- ширина полосы захвата – 7 км (для высоты орбиты 200 км).

Известно [2], что при эксплуатации ОЭТК космического аппарата необходимо поддерживать стабильный температурный режим оптических элементов телескопа, поскольку деформации оптических элементов, вызванные градиентами температур, приводят к изменению геометрических, оптических характеристик элементов ОЭТК, снижению разрешающей способности оптической системы и, как следствие, к ухудшению качества получаемых снимков.

Космический аппарат находится в специфических условиях космического пространства под действием переменных во времени лучистых потоков, зависящих от его ориентации относительно Солнца и Земли. В этих условиях для обеспечения требований к стабилизации температуры необходима специальная система обеспечения теплового режима (СОТР). В [3] показано, что для получения снимков высокого качества необходимо обеспечить температурные перепады на оптических элементах на уровне  $0,1\text{--}0,5$  °С.

Основной задачей СОТР является поддержание температур оптических элементов объектива с заданной точностью относительно номинальной температуры при различных режимах эксплуатации микроспутника. Основными компонентами СОТР микроспутника являются внешняя экранно-вакуумная тепловая изоляция, тепловые экраны с плуночными электронагревателями, датчики температуры оптических элементов и тепловых экранов. В соответствии с результатами исследований [4] было показана эффективность использования СОТР. Предполагается, что корпусная часть объектива изготовлена из углепластика, бленда и крышка СЗУ из алюминия.

Для расчета теплового режима объектива микроспутника на основе 3D-модели разработана тепловая физико-математическая модель объектива, представляющая собой систему дифференциальных уравнений теплопроводности [2].

Для расчета температурных полей объектива применялся метод конечных элементов с использованием программного пакета ANSYS.

Для исследования теплового режима микроспутника в экстремальных условиях в качестве условий эксплуатации микроспутника выбраны следующие параметры орбиты:

- круговая орбита высотой 200 км (продолжительность витка составляет 89 минут),

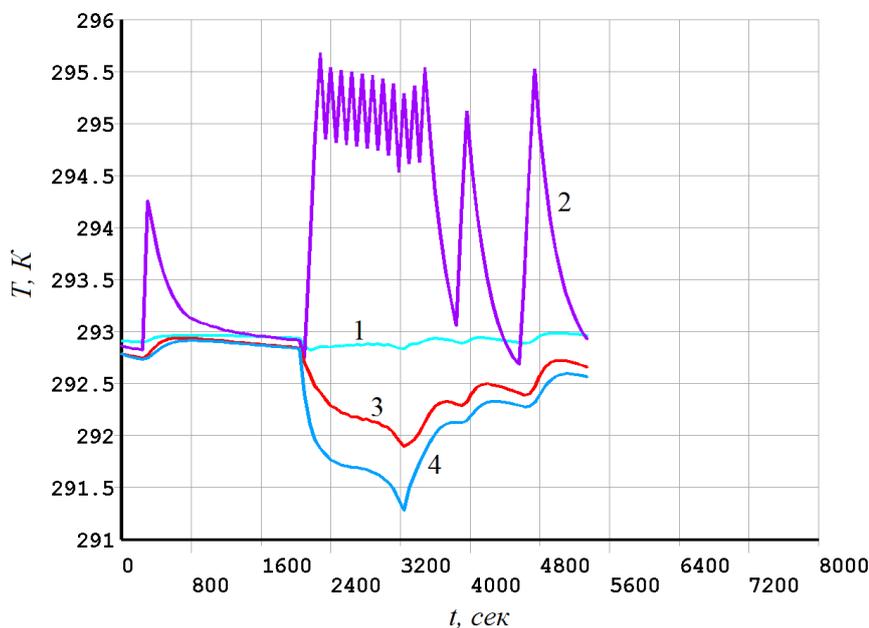
- угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце составляет  $0^\circ$  (в этом случае время нахождения микроспутника в тени Земли максимально),

- углы тангажа и крена микроспутника равны нулю на всем протяжении витка.

Тепловые потоки на крышку СЗУ, боковую часть корпуса и торцевую часть корпуса, соответствующие этим условиям, рассчитывались в соответствии с [5].

### Результаты расчетов температурных полей объектива

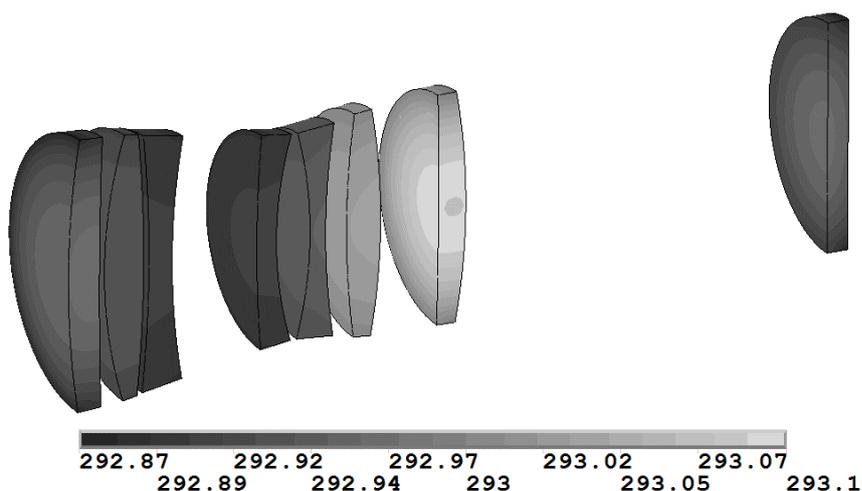
Расчет температурных полей объектива проводился в два этапа. Сначала был выполнен расчет выхода объектива на установившийся тепловой режим из состояния с начальной температурой  $10^\circ\text{C}$ . Затем был выполнен расчет для одного витка в режиме съемки поверхности Земли, крышка открывается один раз на 20 минут, открытие крышки происходит на 35 минуте от начала витка. Для сравнения был проведен расчет для одного витка в режиме съемки поверхности Земли при аварийном отказе нагревателя первой линзы. Результаты расчетов режима съемки поверхности Земли представлены на рис. 2, 3.



**Рис. 2. Изменение во времени температур элементов ОЭТК в режиме съемки поверхности Земли: 1 – линза; 2 – нагреватель линзы 1; 3 – корпус; 4 – бленда**

Как видно из полученных результатов, в режиме съемки земной поверхности открытие крышки один раз за виток на 20 минут вызывает локальное снижение температуры корпуса до 292 К, температуры бленды до 291,3 К (рис. 2), при этом

температура первой линзы не выходит за заданный диапазон (рис. 3). Средняя мощность всех нагревателей в режиме съемки поверхности Земли составила 0,45 Вт.



**Рис. 3. Распределение температур оптических элементов ОЭТК в конце витка в режиме съемки поверхности Земли**

### **Заключение**

Проведены исследования тепловых режимов линзового объектива ОЭТК с системой обеспечения теплового режима микроспутника в соответствии с условиями эксплуатации на орбите на основе трехмерной модели. На основе анализа результатов физико-математического моделирования показано, что СОТР обеспечивает поддержание температур оптических элементов в диапазоне  $293 \pm 0,2$  К в различных режимах эксплуатации микроспутника.

Получено, что при пиковой мощности СОТР в 7 Вт, средняя мощность СОТР при выходе ОЭТК на установившийся режим из состояния с начальной температурой 283 К составила 0,7 Вт, в установившемся режиме с закрытой крышкой – 0,15 Вт, в режиме съемки поверхности Земли – 0,45 Вт.

### **Список литературы**

1. Space enabled effects for military engagements (SeeMe). URL: <http://www.darpa.mil/program/space-enabled-effects-for-military-engagements>.
2. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
3. Цаплин С. В., Болычев С. А. Моделирование влияния тепловых факторов космического пространства на оптические характеристики линзового телескопа космического аппарата // Вестн. Самар. гос. ун-та. Естественная серия. 2013. № 3 (104). С. 97–106.
4. Цаплин С. В., Болычев С. А. Система обеспечения теплового режима экспериментальной модели оптико-телескопического комплекса космического аппарата. Вестн. Самар. гос. ун-та. Естественная серия. 2013. № 9-2 (110). С. 236–243.
5. Прецизионная система обеспечения теплового режима для перспективных оптико-электронных телескопических комплексов дистанционного зондирования Земли. Отчет о НИР. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.1833. Самар. гос. ун-т / руководитель С.В. Цаплин. Самара. 2013. 258 с.

**И. В. Бычков, А. Е. Хмельнов, Г. М. Ружников,  
Р. К. Федоров, А. С. Гаченко**

Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН,  
Иркутск; e-mail: gachenko@icc.ru

**ГИС «АДРЕСНЫЙ ПЛАН ГОРОДА ИРКУТСКА»**

Эффективное управление развитием территории муниципального образования невозможно без создания и внедрения геоинформационных систем, которые позволяют органам управления, физическим и юридическим лицам использовать достоверные документированные сведения и данные для осуществления градостроительной, инвестиционной и хозяйственной деятельности, а также проведение землеустройства. В статье изложен опыт создания и ведения муниципальной геоинформационной системы «Адресный план».

*Ключевые слова: ГИС, адрес, информационная система, пространственные данные.*

Использование современных геоинформационных систем (ГИС) – одно из актуальных направлений повышения эффективности муниципального управления, что обусловлено адекватностью программного обеспечения ГИС характеру задач территориального развития, возможностью использования тематических пространственных данных (ПД) и цифровой модели территории для принятия решений, их фиксации, отображения последствий [1; 6–7].

Пространственные данные (*geospatial data*), геопространственные данные – цифровые данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении и свойствах, пространственных и непространственных атрибутах. Полное описание пространственных данных складывается из двух взаимосвязанных частей: позиционных данных и непозиционных данных – описания пространственного положения и тематического содержания данных, тополого-геометрических и атрибутивных данных (геометрии и семантики) [2].

На множестве ПД определены операции: ввода, экспорта, импорта, обмена, предобработки, анализа, вывода, визуализации и т. п., включенные в состав функциональных возможностей ГИС.

Будучи системообразующим фактором, цифровая модель территории интегрирует ПД и формирует инфраструктуру единых информационных ресурсов [2; 3].

Муниципальная геоинформационная система (МГИС) – программно-аппаратный комплекс, решающий совокупность задач по хранению, отображению, обновлению и анализу пространственной (местоположение в пространстве) и атрибутивной (адрес, кадастровый номер, этажность и прочие характеристики здания) информации по объектам городской территории [3]. Внедрение МГИС позволяет сформировать единую топографически корректную карту городской территории на основе всего многообразия имеющегося материала.

Основные цели создания муниципальной геоинформационной системы:

– формирование единого информационного пространства города, содержащего достоверные сведения о территории, регламентах ее использования, объектах городской среды, недвижимости, транспортной и инженерной инфраструктуре;

– автоматизация текущей деятельности и типовых процессов обработки информации в организациях и структурных подразделениях органов городского управления, а также информационное обеспечение и поддержка процессов в области территориального управления, анализа и прогнозирования развития городской территории;

– обеспечение доступа населения к открытым информационным ресурсам города.

### **Геоинформационная система «Адресный план города Иркутска»**

Несмотря на то, что для Иркутска уже несколько лет назад был подготовлен векторный цифровой топографический план (ЦТП) в масштабе 1:2000, а для некоторых слоев и в масштабе 1:500, существует ряд обстоятельств, которые препятствуют полномасштабному использованию ЦТП в составе МГИС. Во-первых, невозможно непосредственно использовать ЦТП в открытой части муниципальной информационной сети (не говоря уже о его публикации в Интернет), поскольку эта карта содержит информацию, распространение которой не допускается. Во-вторых, адресная информация, содержащаяся в семантических характеристиках объектов карты, является в значительной степени неполной и неточной. В-третьих, для большинства задач, которые могут решаться с использованием электронной карты города, ЦТП является избыточным: большинство содержащихся на нем объектов не используется при решении этих задач, а лишь затрудняет чтение карты.

С юридической точки зрения адрес присваивается объекту после его регистрации в адресном реестре (АР). В Иркутске за содержание АР отвечает МУП БТИ г. Иркутска. Таким образом, оказывается невозможным использование информации ЦТП, находящейся в закрытой сети для ведения АР.

В результате анализа сложившейся ситуации была поставлена задача создания информационного ресурса ГИС «Адресный план» (АП), который в основном должен содержать пространственную информацию лишь по тем объектам ЦТП, которые имеют отношение к адресации. При этом пространственная информация в АП должна быть представлена в агрегированном виде, и из нее должны быть исключены объекты и семантические характеристики объектов ЦТП, наличие которых препятствует использованию АП в открытой сети. Предполагается, что наличие АП, наряду с использованием специализированных слоев электронных карт, будет достаточно для работы большинства информационных систем, входящих в состав МГИС.

АП строится на основе единой ЦТП города с привлечением других цифровых карт, например, карт зонирования территории, а также адресного, градостроительного, земельного и других городских реестров и баз данных. АП поддерживает инвентаризацию и учет (паспортизацию) объектов территории города (объектов недвижимости, земельных участков, в том числе инженерных коммуникаций, временных сооружения и т. д.). Система обеспечивает централизованное хранение, анализ, поддержку в актуальном состоянии и предоставление информации об адресном хозяйстве пространственных данных и семантических (атрибутивных) данных.

Адресный план неразрывно связан с существующим дежурным цифровым топографическим планом (ЦТП). В адресный план семантическая и метрическая информация поступает из ЦТП. Семантическая информация, касающаяся адресов, поступает из АП в ЦТП. Взаимодействие происходит следующим образом. ЦТП на основе набора правил формирования объектов для АП из ЦТП в закрытой сети конвертируется в промежуточное представление, которое сравнивается с текущим АП. Данная подсистема (конвертор АП) производит контроль идентификационных номеров и состояний объектов АП, получение информации об изменениях адресов. В результате работы подсистемы получается новая актуализированная версия АП. Информация об изменениях адресов вносится в ЦТП также конвертором.

Поступление метрической информации в ЦТП производится из исполнительных съемок в электронном виде из программного обеспечения изыскательских и проектных организаций с соответствующим электронным классификатором для внесения изменений в дежурный ЦТП. Исполнительские съемки поступают в форматах Credo, AutoCad, ArcView, ГИС «Карта 2005», в универсальном текстовом обменном формате дежурного ЦТП. Конвертация из этих форматов в формат ГИС «Карта 2005» производится с помощью ряда конверторов. Далее метрическая информация переносится в ЦТП с помощью ГИС «Карта 2005».

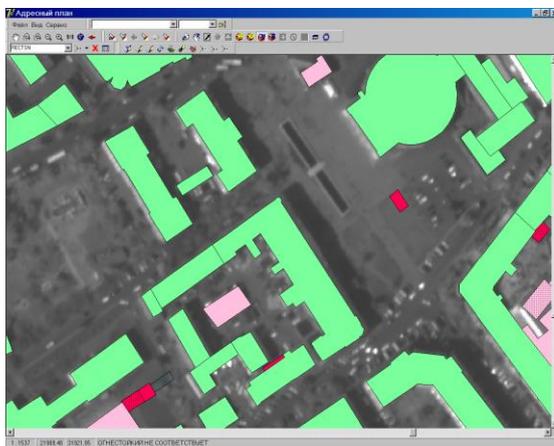
Объекты адресного плана постоянно изменяются, и необходимо хранить информацию о снесенных объектах: как метрику, так и семантику. Обработку такой информации осуществляет подсистема формирования историй. Оператор в этой системе может занести информацию об объекте в историю, то есть сохранить ее в СУБД и удалить из текущего АП. По запросу данная система может сформировать слой снесенных домов на определенную дату оператором.

### Сверка адресов

Для того чтобы решить проблему с неполнотой и неточностью содержащейся на ЦТП адресной информации, была выполнена сверка этой информации с другими источниками.

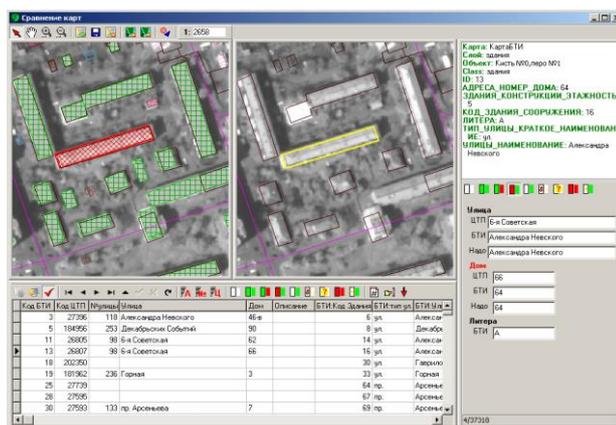
Для подготовки информации ГИС АП были использованы:

- дежурная цифровая топографическая основа (карта) города, актуализируемая «Департаментом архитектуры и градостроительства комитета по градостроительной политике г. Иркутска»;
- Адресный реестр (АР) МУП «Бюро технической инвентаризации г. Иркутска»;
- карта объектов адресации, которая независимо ведётся в МУП БТИ с использованием ГИС «Кредо»;
- космический снимок территории города (рис. 1).



**Рис. 1. Обработка космического снимка (цветом отображается степень соответствия космоснимку объекта векторной карты)**

Для выполнения сопоставления карты адресуемых объектов ЦТП и карты БТИ была подготовлена таблица пересекающихся объектов двух этих карт и разработано приложение, позволяющее проанализировать правильность указания адреса при расхождении информации сопоставляемых карт. Помимо обрабатываемых карт, важным источником информации для оператора является отображаемый в приложении космоснимок. Результатом работы приложения является таблица соответствий объектов с указанием уточненного адреса. Сопоставление карт позволило обнаружить ошибки на каждой из них. В результате выполненной работы были уточнены адреса более 10 000 объектов ЦТП.



**Рис. 2. Сравнение карты адресуемых объектов ЦТП с картой БТИ**

Результатом работы по сверке адресов является актуализированная информация (карты, выборки данных, отчеты и т. д.) о состоянии адресного хозяйства.

В ходе подготовки ГИС АП созданы карты (в векторном формате данных ГИС «Карта 2005») и перечни объектов АП: отсутствующих в АР; расположенных вне структуры адресации; имеющих несколько адресов; имеющих одинаковый адрес; отсутствующих на космоснимке; имеющих на космоснимке, но отсутствующих на АП. В частности, по космоснимку было обнаружено порядка 9 000 объектов, которые не были представлены на ЦТП.

### **Заключение**

В ходе подготовки адресного плана было выполнено существенное уточнение адресной составляющей ЦТП. Использование космоснимка позволило в сжатые сроки выявить большое количество новых (не обозначенных на векторной карте) и измененных (перестроенных) объектов. Внедрение ГИС «Адресный план города Иркутска» открывает путь к интеграции ЦТП в инфраструктуру информационных ресурсов города. Разработанное программное обеспечение позволяет организовать работу пользователей различных подсистем МГИС с информацией АП, обеспечивая при этом защиту информации АП.

### **Список литературы**

1. Томилин В. В., Нориевская Г. М. Использование ГИС в муниципальном управлении // Практика муниципального управления. 2007. № 7.
2. Иванникова А. Д., Калугина В. П., Тихонова А. Н., Цветкова В. Я. Геоинформатика. М.: МАКС Пресс, 2001. 349 с.
3. Берлянт А. В., Кошкарева С. К. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. М.: ГИС-Ассоциация, 1999. 203 с.
4. Об упорядочении адресов объектов недвижимости на территории г. Иркутска: пост. мэра г. Иркутска от 14.01.2002 № 031-06-26/2.
5. Бычков И. В., Фереферов Е. С., Хмельнов А. Е. Применение ГИС- и ВЕБ-технологий для создания интегрированных информационно-аналитических систем // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 5–20.
6. Гаченко А. С., Ружников Г. М., Фереферов Е. С., Хмельнов А. Е. Муниципальная информационная система обеспечения градостроительной деятельности // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, № 1. С. 11–16.
7. Бычков И. В., Ружников Г. М., Хмельнов А. Е. Современные информационные технологии в IT-проектах органов государственной власти и местного самоуправления // Открытое образование. 2008. Т. 4 (69). С. 39–47.

# Секция «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ»

---

УДК 550.8.053

**О. И. Андросенко, К. А. Пантелеев, Н. В. Молокова**

Институт космических и информационных технологий Сибирского  
федерального университета, Красноярск; e-mail: oksana.androsenko@mail.ru  
costen.panteleew2011@yandex.ru; nat\_molokova@mail.ru

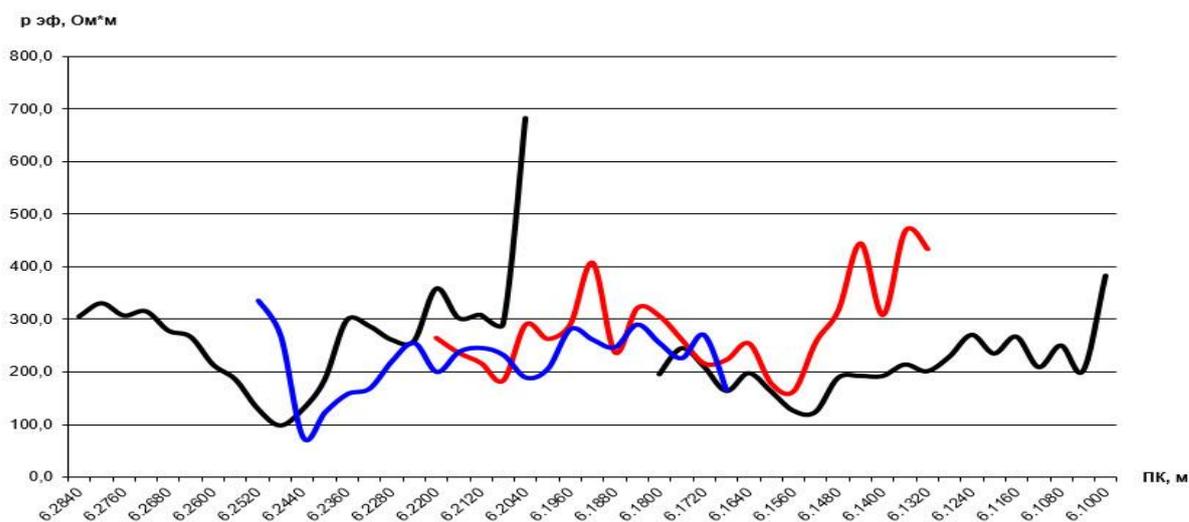
## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БЕСКОНЕЧНО ДЛИННОГО КАБЕЛЯ**

Повышение эффективности проведения анализа полевых данных и сокращения временных затрат на их интерпретацию является актуальным в настоящее время для геофизики и геологии. В данной работе была поставлена цель автоматизировать процесс обработки электроразведочных данных, снятых по методу бесконечно длинного кабеля (БДК) [1], с получением информации о геологическом разрезе на глубину до 300 метров. Для достижения данной цели были сформулированы задачи:

- 1) анализ предметной области;
- 2) выбор и обоснование алгоритма решения задачи;
- 3) разработка структуры программного модуля;
- 4) тестирование программы и анализ полученных результатов.

Съемка методом БДК проводится при условии расположения кабеля как источника электромагнитного поля (ЭМП) по оси  $X$  и измерения его составляющих по ортогональному профилю (ось  $Y$ ). Вниз от поверхности земли направлена ось отсчетов глубины  $Z$ .

На рис. 1 отображены результаты полевой съемки в виде графиков эффективного сопротивления  $\rho_{эф}$ , рассчитанного по горизонтальной и вертикальной составляющим ЭМП для каждого пикета с учетом его удаления от кабеля. По горизонтальной оси отложены пикеты по профилю, расположенные через 40 метров с их оцифровкой, – номер профиля и метраж пикета и отмечены положения кабеля (точки пересечения кабеля и профиля). По вертикальной оси отложены значения эффективного сопротивления  $\rho_{эф}$ , Ом·м, вычисленное по полевым данным и зафиксированное в таблице Excel. На рис. 1 приведено три графика  $\rho_{эф}$ , каждый из которых соответствует своему положению кабеля: черный – центральному положению, от которого проводилась съемка в обе стороны; красный – со съемкой в сторону увеличения метража и синий – в сторону уменьшения метража. Значение  $\rho_{эф}$  в каждой точке наблюдения, отображенное на графике, обозначает обобщенное сопротивление того объема горных пород, который вносит наибольший вклад в ее суммарное магнитное поле, в котором наибольшее влияние оказывают мелкие приповерхностные неоднородности, создающие узкие интенсивные аномалии  $\rho_{эф}$  на фоне широких аномалий глубинного происхождения.



**Рис. 1. Результат полевой съемки**

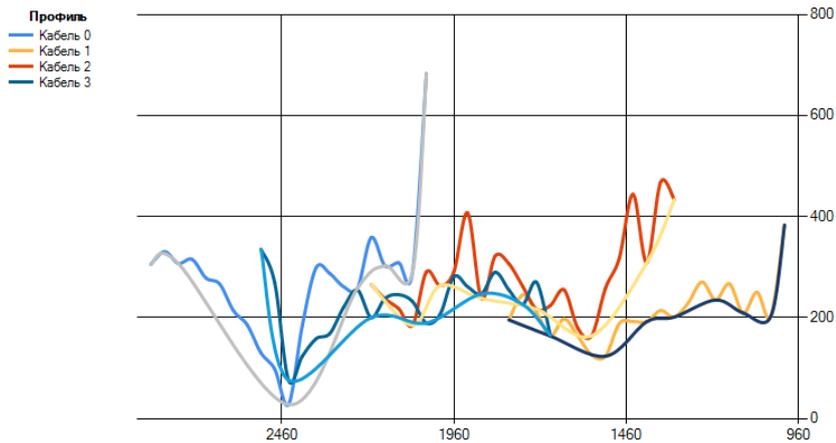
По условиям задачи наиболее предпочтительно получить информацию о приближенном строении геологического разреза на глубине, поэтому для ее решения применен упрощенный способ обработки геофизической информации. Из суммарного значения  $\rho_{эф}$  удаляется влияние приповерхностных неоднородностей и определяется его оставшаяся доля как вклад глубинных геологических объектов. Полученная информация переносится в глубину разреза с использованием осредненного принципа привязки полученного результата к середине разноса источник – приемник поля и погружением его на глубину, равную  $1/3$  разноса, рекомендуемую в геофизической литературе [2] для высокоомного разреза. При таких геометрических условиях точки привязки информации образуют наклонную линию, исходящую от источника электромагнитного поля (кабеля) и направленную вглубь разреза под углом  $56^\circ$  к вертикали. Точки всех линий образуют поле значений  $\rho_{эф}$  по разрезу, по которым наводятся изолинии этого параметра.

Алгоритм обработки графиков БДК:

1. Определяется огибающая по минимальным значениям  $\rho_{эф}$ .
2. Полученная кривая  $\rho_{эф}$  обрабатывается методом скользящего окна.
3. С помощью программы БДК с полученной кривой на каждом пикете снимаются значения  $\rho_{эф}$  и заносятся в дополнительную графу таблицы Excel.
4. Определяются координаты  $y$  и  $z$  каждого пикета, которые заносятся в дополнительные графы таблицы Excel.
5. Точки с новыми координатами  $y$  и  $z$  расставляются в разрезе с обозначением значений  $\rho_{эф}$ .
6. С помощью программы Surfer наводятся в разрезе изолинии одинаковых значений  $\rho_{эф}$ .

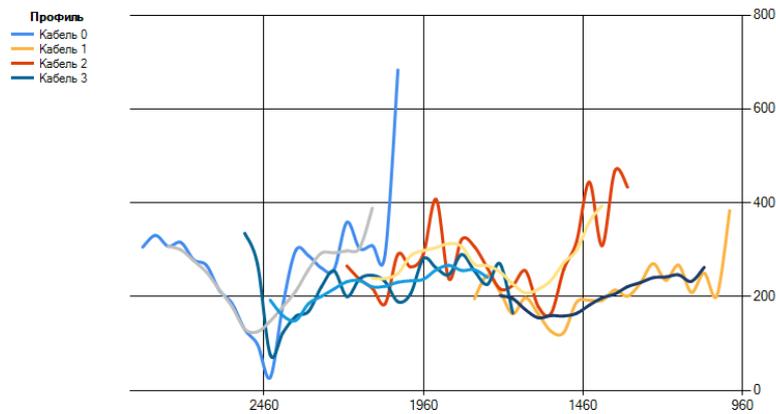
### **Разработка**

Разработка программного модуля велась средствами языка C#. Полученная программа позволяет определить огибающую и построить линии в разрезе двумя методами: методом линейной интерполяции и методом скользящего окна. Метод линейной интерполяции позволяет вычислить промежуточное значение функции по двум точкам, проведя между ними прямую линию. Для этого находим минимумы функций, а для каждой остальной точки среди минимумов функций ищем ближайшую к ней левую точку и ближайшую к ней правую точку, затем по формуле линейной интерполяции вычисляется значение  $\rho_{эф}$  для каждой точки. По окончании обработки имеем новый график огибающей, у которой количество точек совпадает с исходным количеством точек. На рис. 2 показаны найденные огибающие.

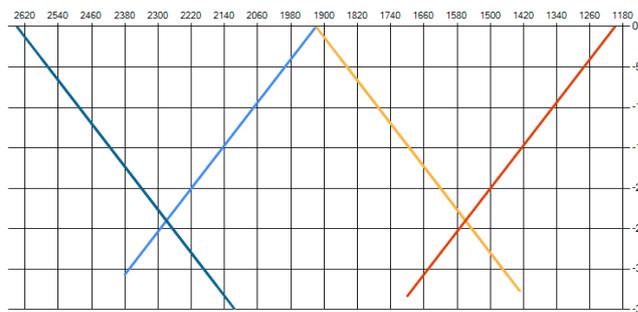


**Рис. 2. Полученные огибающие низких частот**

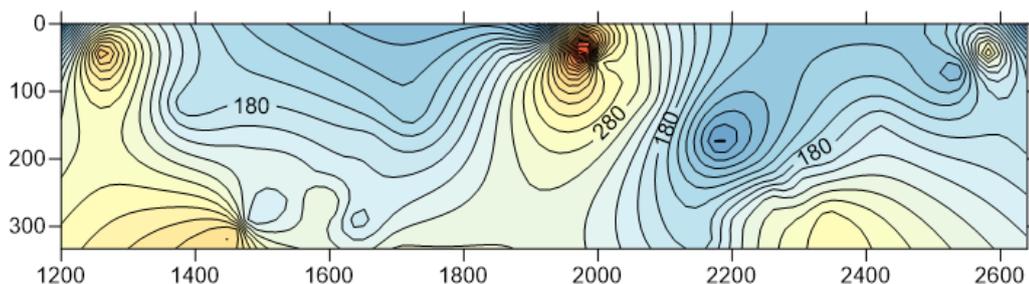
Метод скользящего окна позволяет сделать огибающие более плавными и точными. Для этого берем значения по  $r_{эф}$  пяти точек графика функции, находим среднее арифметическое этих значений и относим его к значению  $r_{эф}$  средней точки среди этих пяти. Процедура повторяется, пока не будет достигнуты последние пять точек графика функции. По окончании обработки имеем новый график огибающей, укороченный по краям на два пикета с каждой стороны. На рис. 3 изображены огибающие, обработанные методом скользящего окна. Метод скользящего окна является более точным, потому что дает более точные результаты и является более рациональным при дальнейшей работе, чем метод линейной интерполяции. На рис. 4 изображены линии в разрезе. На рис. 5–6 изображены изолинии по огибающим, полученным методом линейной интерполяции, и изолинии после обработки методом скользящего окна.



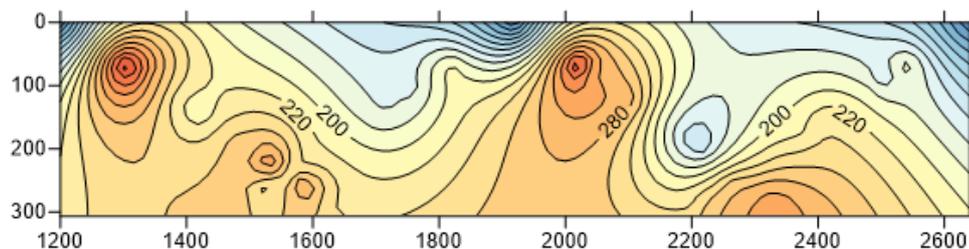
**Рис. 3. Огибающие, обработанные методом скользящего окна**



**Рис. 4. Линии в разрезе**



**Рис. 5. Изолинии  $\rho_{эф}$  по огибающим**



**Рис. 6. Изолинии  $\rho_{эф}$  после обработки скользящим окном**

По изолиниям  $\rho_{эф}$  определяется положение проводящих и высокоомных зон и последующая их увязка с геологическими образованиями с привлечением сведений о геологии района и данных других геофизических методов. В частности, на исследуемом участке Центрального Казахстана, в пределах которого предыдущими геологоразведочными работами (опробование по канавам и керну буровых скважин) установлено наличие в приповерхностной области медно-порфирового оруденения в результате геофизических исследований методом БДК с применением разработанной программы сделан прогноз по повышенной проводимости рудных включений на его распространение на глубину до 300 и более метров. На другом участке (Северный Казахстан), по данным метода БДК, с аналогичной обработкой материалов разведочной скважиной вскрыты высокопроводящие горные породы с присутствием золота. Значительные размеры аномалий повышенной проводимости создают предпосылки для обнаружения последующими разведочными работами золоторудного месторождения.

### **Заключение**

Данная работа имеет большое значение для работников геолого-геофизической службы, так как она позволяет значительно сократить время на обработку данных, выполнять более точные расчеты, исключить ошибки при расчетах. Дальнейшее исследование позволит расширить область автоматизации работы с электроразведочными данными метода БДК и других электромагнитных методов.

### **Список литературы**

1. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе: науч. изд. / В. И. Иголкин; под ред. Г. Я. Шайдуров; Сиб. федер. ун-т, Воен.-инж. ин-т. Красноярск: СФУ, 2016. 270 с.
2. Матвеев Б. К. Электроразведка: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 368 с.

**О. Е. Бандеев**

Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, Красноярск; e-mail: olegbandeev@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ  
ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАМЕНИ НА ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ  
ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ**

**O. E. Bandeev**

Scientific supervisor – A. V. Pyataeva  
Siberian Federal University, Institute of Space and Informatics Technologies  
e-mail: olegbandeev@yandex.ru

**RESEARCHING METHODS AND DEVELOPMENT OF FLAME  
DETECTION ALGORITHMS IN THE OPEN SPACES BY VIDEO  
SEQUENCES**

Традиционные способы обнаружения пламени не всегда позволяют обеспечить своевременную реакцию на опасность, что может привести к экономическим потерям и человеческим жертвам. В настоящее время одним из наиболее эффективных способов избежать потери является обнаружение пламени по видеопоследовательностям.

*Ключевые слова: видеопоследовательность, пламя, пожар.*

В настоящее время камеры видеонаблюдения получили широкое применение как на городских территориях при наблюдении за сложными техногенными объектами, так и в системах экологического мониторинга за территориями лесных массивов, природных парков и др., вследствие чего использование видеопоследовательностей для обнаружения пламени – одна из самых действенных и актуальных задач. Это позволяет предотвратить возможные потери и существенно уменьшить ущерб от возгорания. До недавнего времени на практике в основном применяли технологии обнаружения пламени, основанные на ультрафиолетовых или инфракрасных мультиспектральных принципах обнаружения. Однако такие технологии, как правило, ненадежны и в половине случаев дают ложные срабатывания. С развитием систем видеонаблюдения и технологий анализа изображений стало возможным использование видеоданных для обнаружения пламени как объективного признака пожара.

Пламя имеет достаточно много различных характерных особенностей, таких как цвет, движение, форма, поведение и т. д. Различные процессы в пламени очень быстротечны, поэтому часто их невозможно разглядеть невооруженным глазом.

Цвет пламени зависит от многих факторов. Во-первых, это может быть химический состав горящего объекта, при горении которого могут меняться оттенки пламени. Во-вторых, большое влияние оказывает насыщенность воздуха различными газами, например кислородом. Также на цвет пламени может влиять температура [1].

Второй, не менее важной, характеристикой для распознавания пламени по видеопоследовательностям является его динамика, движение. Как известно, горение огня – это весьма динамичный процесс. Языки пламени регулярно меняют свою форму и направление, поэтому такие процессы легко можно обнаружить. На видеоизображении

пламя и дым представлены в виде динамической 2D-текстуры [2]. Подобные динамические текстуры могут иметь стохастическую и регулярную составляющую [3].

Горение представляет собой сложный физико-химический процесс, в результате которого исходные вещества превращаются в продукты сгорания вследствие экзотермических реакций с интенсивным выделением тепла. Химическая энергия, запасенная в компонентах исходной смеси, при этом выделяется в виде теплового излучения, которое и называют пламенем.

Особенности горения, отличающие его от других физико-химических процессов с участием окислительно-восстановительных реакций, – это большой тепловой эффект реакции и большая энергия активации, приводящая к сильной зависимости скорости реакции от температуры [4].

Так как пламя является комплексным визуальным феноменом, то при построении алгоритма следует использовать различные особенности и свойства пламени как физического явления [5]. Каждый алгоритм обнаружения пламени по видеопоследовательностям строится в первую очередь на комбинации наиболее оптимальных и эффективных подходов, каждый из которых позволяет с максимальной точностью выявить определенный признак пламени.

Задачей детектирования пламени является нахождение некой функции, осуществляющей распознавание областей-кандидатов с наименьшим числом ошибок. При распознавании образов может получиться два различных варианта: либо наличие пламени, либо его отсутствие. Для определения областей с наличием пламени можно использовать такие признаки, как значение цветового порога, размеры блока, наличие движения и прочие характерные особенности пламени. Иными словами, задача детектирования пламени по видеоизображению сводится к выделению объектов похожих на пламя и их последующую классификацию (областей-кандидатов). Также для повышения точности к выделенным областям-кандидатам часто применяют дополнительные верификационные методы, например, математическое моделирование.

Для того чтобы лучше понимать работу алгоритма обнаружения пламени, построим его структурную схему (рис. 1). Она будет представлена следующими шагами:

1. Выделение областей с повышенной динамикой, то есть области, где присутствует движение.
2. Сравнение цветов пикселей областей-кандидатов с пикселями цвета пламени.
3. Верификация полученных областей на наличие пламени.



Рис. 1. Структурная схема алгоритма обнаружения пламени

Для описания характерного движения границ областей дыма и пламени во времени может быть использована стохастическая модель. В работе [6] для моделирования пространственно-временных характеристик областей применяются скрытые марковские модели, которые обучаются по тестовому набору изображений, содержащих дым и пламя. При этом обучение проводят также по изображениям, не содержащим дым и пламя. В противном случае невозможно будет отличить действительное изображение пламени и дыма от изображений объектов, имеющих подобный цвет. Преимуществом данного подхода является то, что он позволяет учитывать пространственно-временные характеристики пламени. К недостаткам следует отнести зависимость качества классификации от обучающего набора, что накладывает ограничения на качественные характеристики обрабатываемых видеоизображений.

Для областей дыма и пламени на видеоизображении характерно наличие мерцания [7], которое заключается в изменении границ от кадра к кадру случайным образом. В работе [8] показано, что значение частоты мерцания для дыма составляет 1–3 Гц, для пламени частота мерцания – 10 Гц. Поэтому для оценки составляющих энергии изображения на границе областей-кандидатов используют частотные методы анализа изображений. Так, в работе [9] используется двухступенчатая система фильтрации, которая состоит из высокочастотного фильтра и низкочастотного фильтра.

Для тестирования работы программы был использован ряд видеопоследовательностей, где присутствует пламя (рис. 2).



**Рис. 2. Тестовые видеопоследовательности**

Сначала мы сегментируем входное изображение на регионы-кандидаты путем распознавания цвета пикселей и обнаружения их движения. Для определения движения пикселей используется модель гауссовых смесей. Для определения цвета пикселей применяются цветовые пространства RGB и HSV. Так как цвет огня, как правило, сильно насыщен в красном диапазоне, красные компоненты каждого пикселя огня больше, чем другие в цветовом пространстве RGB. Но из-за сходства в цвете пламя огня и огнеподобные объекты демонстрируют схожие черты с точки зрения распределения, но с различными средними значениями по оси коэффициента цветности [10]. Для устранения шумов и лишних объектов применяются несколько алгоритмов шумоподавления и оптимизации для регионов-кандидатов. Также регионы-кандидаты делятся на цели, после чего используется алгоритм многоцелевого отслеживания для идентификации одной и той же цели в разных кадрах.

Далее на полученных областях определяются характерные особенности пламени, такие как цвет, текстура, движение. После чего происходит верификация на наличие пламени на изображении либо его отсутствия. Для верификации применяется метод опорных векторов. Особым свойством метода опорных векторов является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки классификации и увеличение зазора.

Результатом работы является подтверждение или опровержение факта наличия пламени на видеопоследовательности (рис. 3). Точность распознавания строится в зависимости от количества обнаруженных кадров с присутствием пламени, в сравнении с общим количеством проверенных кадров (таблица).



**Рис. 3. Сегментирование областей-кандидатов**

**Таблица**

**Точность распознавания**

<b>Видео</b>	<b>Кол-во кадров</b>	<b>Обнаружено</b>	<b>Точность</b>
1	1 251	1 127	0,900879
2	516	507	0,982558

Таким образом, задача обнаружения пламени по видеопоследовательности является актуальной, применение систем обнаружения пламени по видеоизображениям позволяет избежать возможных человеческих и экономических потерь. Среди методов обнаружения пламени по видеопоследовательностям можно выделить подходы на основе стохастических моделей и других математических методов, методы на основе выделения движения и хроматических характеристик.

#### **Список литературы**

1. Тидеман Б. Г., Сциборский Д. Б. Химия горения: учебник для пожарных техникумов. 3-е изд. Л.: ОГИЗ. Гострансиздат, Ленингр. отд., 1935. 356 с.
2. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests // *Procedia Computer Science*. 2016. V. 96. P. 762–771.
3. Goncalves W. N., Machado B. B., Bruno O. M. A complex network approach for dynamic texture recognition // *Neurocomputing*. 2015. V. 153. P. 211–220.
4. Щёлкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. 254 с.
5. Denisov M., Donetz S., Kalach A. Detection Algorithm Ignition Source With Video // *Civil Security Technology*. 2015. V. 12, № 4 (46).
6. Toreyi B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Contour based smoke detection in video using wavelets // *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO – 2006)*. Florence, Italy. 2006. P. 1–5.
7. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // *Pattern Recognition Letters*. 2006. V. 27, № 1. P. 49–58.
8. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Wavelet based real-time smoke detection in video // *Signal Processing: Image Communication, EURASIP*. Antalya. 2005. V. 20. P. 255–260.
9. Бровко Н. В., Богущ Р. П. Анализ методов обработки последовательностей видеоизображений в приложении к задаче раннего обнаружения пожаров // *Вестн. Полоц. государственного университета*. 2011. № 12. С. 42–50.
10. Fast flame detection in surveillance video using logistic regression and temporal smoothing / Seong G.Kong, Donglin Jin, Shengzhe Li, Hakil Kim // *Fire Safety Journal*. V. 79. January 2016. P. 37–43.

**С. Ю. Белов**

Физический факультет Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова, Москва; e-mail: Belov\_Sergej@mail.Ru

## **АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН**

В работе представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный.

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

### **Введение**

В работе рассматривается дистанционная диагностика «шероховатой» земной поверхности и диэлектрических подповерхностных структур в коротковолновом диапазоне радиоволн [1]. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум  $\beta$ . Конкретизация осуществлена для ионосферного случая. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли, поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур. Данным методом при организации мониторингового зондирования, возможно выявлять области изменения этих сред, например, для оценки сейсмической опасности, опасных природных явлений, изменения экосистем, а также некоторых экстремальных событий техногенного характера. Также эти методики могут использоваться для развития системы мониторинга, контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций [2].

Идея метода определения этого параметра заключается в том, что располагая синхронной информацией [3] о волне, отраженной от ионосферы, и о волне, отраженной от земли и ионосферы (или прошедшей ионосферу дважды при зондировании со спутника), возможно извлекать информацию о параметре рассеяния [4]. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный. Анализ аналитических погрешностей оценки этого параметра позволил рекомендовать новый метод вместо стандартного [5].

### **Методы расчета (когерентный и некогерентный)**

В фиксированной точке приема на поверхности земли (в скалярном приближении) ионосферный сигнал, узкополосный случайный процесс  $\mathcal{E}(t)$  представляет собой суперпозицию «зеркальной»  $\mathcal{E}_0(t)$  и рассеянной  $\mathcal{E}_P(t)$  по нормальному закону компонент:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}(t) &= \mathcal{E}_0(t) + \mathcal{E}_p(t) = E_{00} \cdot e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} + \mathcal{E}_p(t) = \\ &= R(t) \cdot e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} = [E_C(t) + i \cdot E_S(t)] \cdot e^{i\omega_0 t},\end{aligned}\quad (1)$$

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

$$\beta_k^2 = \frac{\text{мощность зеркальной компоненты}}{\text{мощность рассеянной компоненты}} = \frac{E_{00}^2}{2 \cdot \mathcal{E}_p^2}. \quad (2)$$

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 ионосферного сигнала;  $R(t)$  – 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  $\beta_k$  (2) стандартный некогерентный R2-метод, основанный на соотношении [1]:

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

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

Используя когерентный E4-метод,  $\beta_{E4}$  оценивается по эксцессу  $\gamma_{E4}$  квадратур:

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

Следует заметить, что измеряемыми первичными параметрами являются отношения моментов  $\overline{R^2}/(\overline{R})^2$ ,  $\overline{E_m^4}/(\overline{E_m^2})^2$  соответственно. Соотношения (3), (4)

получены с учетом определенных моделей структуры ионосферного сигнала. Исследования показали, что вероятностные свойства ионосферного сигнала (1) отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещенным спектром (РС-модель), на основе которой получены выражения (3), (4) [6].

В настоящей работе предлагается новый некогерентный R4-метод определения  $\beta_{R4}$  по эксцессу  $\gamma_{R4}$  огибающей для РС-модели:

$$\gamma_{R4}(\beta_{R4}) = \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2} - 3 = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{(1 + \beta_{R4}^2)^2}. \quad (5)$$

Для сопоставления приведенных методов в смысле относительных погрешностей, допускаемых при вычислении  $\beta_k$ , обусловленных видом функциональных зависимостей  $f(\beta)$ ,  $\gamma_{E4}(\beta)$  и  $\gamma_{R4}(\beta)$ , получим выражения (6) [7]:

$$\mathcal{E}_k = \left| \frac{\Delta \beta_k}{\beta_k} \right| = \left| \frac{1}{\beta_k} \cdot \frac{dG_k}{dZ_k} \cdot \Delta(Z_k) \right|, \quad Z_k = \frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2}, \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2}, \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2} \quad (6)$$

где  $G_k = f$ ,  $\gamma_{E4}$ ,  $\gamma_{R4}$ ;  $\Delta(Z_k)$  – абсолютные статистические ошибки измеряемых величин.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения  $\beta_k$  [8]:

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

$$\varepsilon_{E4}(\beta) = \frac{(1+\beta^2)^3}{6 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{E4}); \quad \varepsilon_{R4}(\beta) = \frac{(1+\beta^2)^3}{4 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{R4}). \quad (7)$$

Статистическая ошибка  $\Delta(Z_K)$  зависит от объема выборки  $N$  и при одинаковых объемах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание на погрешностях за счет различия функциональных зависимостей (3)–(5), нормируем (7) на  $\Delta(Z_K)$  [9].

Графики зависимостей  $\varepsilon_K^* = \frac{\varepsilon_K}{\Delta(Z_K)}$  для  $\beta_{R2}$ ,  $\beta_{E4}$  и  $\beta_{R4}$  приведены на рис. 1.  $\varepsilon_K^*$  будем ниже называть аналитической (относительной) погрешностью метода.

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

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.

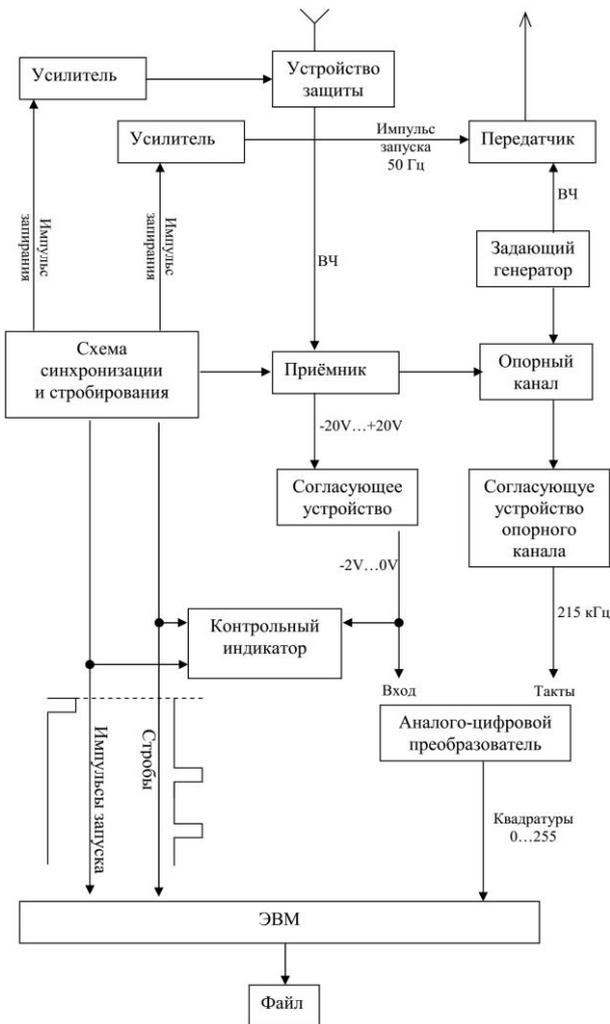


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки Наземного Измерительного Комплекса

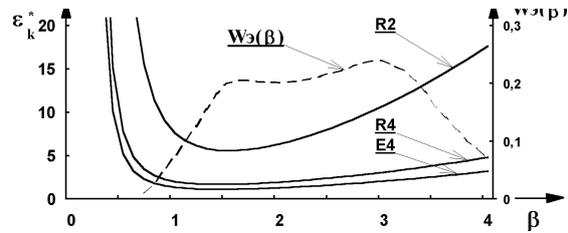


Рис. 1. Зависимости  $\varepsilon_K^*$  (сплошные линии) и распределение  $W_{\beta}(\beta)$  (пунктир)

В итоге анализ аналитических погрешностей оценки параметра  $\beta_K$  позволил рекомендовать метод R4 вместо стандартного R2. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра  $\beta_K$  может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя выражение (5) метода R4.

### Экспериментальная установка Наземного Измерительного Комплекса

Для получения необходимых экспериментальных данных используется импульсный метод когерентного приема [10]. Этот метод позволяет регистрировать низкочастотные квадратурные составляющие ионосферного сигнала  $E_c(t)$ ,  $E_s(t)$ . По ним возможно

определение огибающей  $R(t)$  и фазы  $\Phi(t)$ , то есть функции модуляции сигнала. Для того чтобы применить аппаратуру когерентного приема к исследованию кратных ионосферных отражений, необходимо было обеспечить возможность выделения и одновременной регистрации параметров, относящихся к сигналам разной кратности.

В установке используется схема регистрации низкочастотных квадратурных компонент ионосферного сигнала  $E_c(t)$ ,  $E_s(t)$ . Модернизация обеспечила регистрацию на ЭВМ упомянутых параметров сигнала одновременно для сигналов различной кратности [3]. Это достигнуто применением специальной многоканальной системы стробирования и регистрации. На рис. 2 представлена структурная схема установки со схемой регистрации и стробирования. Установка позволяет осуществлять одновременную регистрацию параметров кратных ионосферных отражений, причем даже с использованием ЭВМ с не очень высоким быстродействием за счет применения оригинальных алгоритмов оптимизации: патент [2].

### **Заключение**

В работе представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный.

### **Список литературы**

1. Белов С. Ю. Экспериментальное исследование характеристик когерентной и некогерентной обработки информации при дистанционном зондировании атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Изв. вуз. Физика. 2016. Т. 59, № 12–3. С. 121–124.
2. Белов С. Ю. Программа регистрации квадратурных компонент  $n$ -кратного отраженного от земной поверхности радиосигнала. Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016.
3. Белов С. Ю., Белова И. Н. Функциональная схема экспериментальной аппаратуры когерентного приема в задачах мониторинга поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии. Майкоп, 2015. С. 53–58.
4. Белов С. Ю. Космический мониторинг характеристик прибрежных территорий для обеспечения экологической безопасности зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология. Экономика. Информатика. Ростов н/Д: ЮФУ, 2016. С. 27–41.
5. Belov S. Yu. Monitoring of parameters of coastal Arctic ecosystems for sustainability control by remote sensing in the short-wave range of radio waves // The Arctic Science Summit Week. 2017. Prague. 2017. P. 161.
6. Belov S. Yu., Belova I. N. Environmental aspects of the use of remote sensing of the earth's surface in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 Third Plenary Conference and Field Trip. Moscow, MSU. 2015. P. 29–31.
7. Belov S. Yu., Belova I. N. The analysis of methods of determination the scattering parameter of the inhomogeneous fluctuating ionospheric screen // Atmosphere, ionosphere, safety. Kaliningrad, 2016. P. 435–440.
8. Belov S. Yu., Belova I. N. Methods of obtaining data on the characteristics of superficial and subsurface structures of the earth by remote sensing in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 project, GNAS Tbilisi, Georgia, 2016. P. 26–29.
9. Belov S. Yu. The analysis of monitoring data of the parameter scattering power the earth's surface in the short-wave range of radio waves // Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies, Geoinformatics research papers. Sochi. V. 4, № 2, BS4002, 2016. P. 50.
10. Belov S. Yu., Belova I. N., Falomeev S. D. Monitoring of coastal ecosystems by method of remote sensing in the short-wave range of radio waves // Managing Risks to Coastal Regions. 2016. St. Petersburg.

**В. В. Буряченко**

Институт информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск  
e-mail: buryachenko@sibsau.ru

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАНИЦ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ РАЗДЕЛЕНИЯ КАДРА  
НА ФОН И ПЕРЕДНИЙ ПЛАН**

При применении алгоритмов стабилизации видеопоследовательностей возникает проблема ухудшения качества изображения и потери части информации на границах кадра. В работе проведен обзор существующих подходов к восстановлению границ, а также предложен алгоритм для восстановления границ кадра с учетом информации с предыдущих кадров видеопоследовательности. Разработанный алгоритм позволяет уменьшить потери информации до 3–5 % от размеров кадра.

*Ключевые слова:* стабилизация видеопоследовательности, реконструкция изображения, оценка заметности объектов, модель фона, оценка движения.

**Введение**

Стабилизация видеопоследовательности является одним из важнейших способов видеообработки и используется для устранения нежелательных вибраций камеры на видеопоследовательности. Современные алгоритмы стабилизации имеют ряд недостатков, которые часто не позволяют применять их в домашних условиях или при профессиональной обработке изображений и видеопоследовательностей. В результате смещения положения кадра при стабилизации видеопоследовательности возникают участки, которые отсутствуют на оригинальном изображении. Последним этапом большинства известных алгоритмов стабилизации является устранение подобных участков и преобразование кадра к стандартному виду с целью устранения отсутствующих областей на изображении.

В литературе предложено три основных подхода к восстановлению изображения при стабилизации. Первый из них основан на заполнении граничных участков известными текстурными элементами, присутствующими на соседних областях кадра [1–3]. При таком подходе также применяются алгоритмы восстановления текстур, позволяющие заполнить неизвестные области при наличии текстуры на соседних областях изображения [4; 5; 9]. Второй подход основан на применении размытия границ изображения в области, которая является промежуточной между стабилизированным кадром и восстановленными регионами [6]. Подобный метод применяется в нескольких современных видеоредакторах при стабилизации, таких как Dshaker, Adobe After Effects. В работе [7] предложено сегментировать видеопоследовательность на два слоя, содержащих передний план и фон изображения, после чего восстанавливать каждый слой индивидуально. Такой метод требует наличия длительной видеопоследовательности либо, по крайней мере, наличия отдельного движущегося объекта на большом количестве кадров. Matsushita и др. в [1; 6] предложили распространять локальное движение из известных областей на отсутствующие, при этом заполняя такие области даже в случае, если эти регионы являются неплоскими и динамическими. Этот метод не имел недостатков предыдущих методов, таких как размытие границ и

разрывы регионов между известными и неизвестными областями, однако давал значительные негативные эффекты в случаях наличия быстро движущихся объектов и низкую частоту кадров при стабилизации. Известны методы, использующие информацию с нескольких предыдущих кадров для выполнения интерполяции и совмещения известных областей с отсутствующими участками на текущем кадре [8]. На рис. 1 показаны основные подходы к заполнению границ изображения при стабилизации видеопоследовательностей.



**Рис. 1. Методы восстановления границ: а – оригинальное изображение; б – стабилизированное изображение без восстановления границ; в – применение мозаики для заполнения отсутствующих регионов; г – заполнение пустых областей и применение размытия границ; д – переориентация изображения к объекту интереса; е – масштабирование изображения**

При этом несмотря на разнообразие и достаточно хорошие результаты рассмотренных методов, в современных коммерческих алгоритмах стабилизации для восстановления границ изображения применяется масштабирование кадра. Это связано с наличием артефактов стабилизации, которые возникают в сложных случаях динамических видеопоследовательностей, при наличии быстро движущихся объектов в сцене, а также вычислительными затратами на применение сложных алгоритмов. Масштабирование изображения приводит к ухудшению качества видеопоследовательности, а также потерям 20–30 % кадра, в том числе и содержащего полезную информацию.

#### **Алгоритм восстановления границ кадра при стабилизации**

В работе предложен алгоритм восстановления границ изображения, основанный на разделении кадра на несколько областей, и использования информации из соседних кадров видеопоследовательности. Первым этапом алгоритма является оценка заметности (*saliency*) объектов. В дальнейшем объекты, которые имеют высокий уровень заметности, исключаются из обработки для восстановления границ, потому что они могут принадлежать объектам переднего плана, которые имеют другой уровень смещения между кадрами, либо движущимся с небольшой скоростью относительно фона изображения объектам. Тем не менее заметные объекты могут быть использованы для стабилизации изображения, потому что они являются хорошим ориентиром для выбора ключевых кадров и компенсации движения на основании привлечения к ним внимания.

Следующим этапом алгоритма является оценка наличия движущихся объектов на граничных участках кадра. Это осуществляется путем расчета глобального движения кадра, которое необходимо знать для стабилизации изображения. Отдельные блоки изображения на границах кадра принадлежат движущимся объектам, если их направление и модуль вектора движения отличаются от глобального движения кадра. Такие области также исключаются из используемых для восстановления границ.

### Экспериментальные исследования

В результате деления кадра на области, принадлежащие движущимся объектам, заметным объектам и фону изображения становится возможным заполнить отсутствующие участки кадра при стабилизации достоверными фрагментами кадра, где будут отсутствовать объекты переднего плана и движущиеся мелкие объекты. Оставшиеся области кадра заполняются путем восстановления текстуры на основании уже заполненных участков кадра, восстановленных на изображении. Пример результата стабилизации изображения и восстановления границ для сложной сцены, содержащей движущийся объект, а также неплоскую структуру кадра представлен на рис. 2.



**Рис. 2. Этапы алгоритма восстановления границ изображения для видеопоследовательности Sam\_1.avi: а – оригинальный кадр; б – стабилизированное положение кадра с отсутствующими участками; в – нахождение заметности объектов; г – выделение движущихся объектов; д – области, используемые для восстановления границ; е – восстановление границ кадра; ж – увеличенные участки изображения с дефектами**

### Заключение

Разработанный алгоритм позволяет выполнять восстановление границ кадра при стабилизации с учетом сложной структуры сцены, наличия движущихся объектов в кадре, при этом учитывая изменение положения объектов на нескольких кадрах видеопоследовательности. Оценка заметности объектов и деление сцены на фон и движущиеся объекты также может быть использовано для повышения качества

стабилизации изображения или применения алгоритмов видеоаналитики. Проведенное сравнение алгоритма с другими известными методами восстановления границ показало отсутствие артефактов, возникающих в сложных сценах. Обработка одного кадра размером 1280×720 пикселей с учетом алгоритма стабилизации занимает около 200 мс. Время работы алгоритма можно уменьшить путем одновременной обработки нескольких кадров на стадиях оценки движения и заметности объектов.

#### **Список литературы**

1. Matsushita Y., Ofek X. T. E., Shum H.-Y. Full-frame video stabilization // Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005. V. 1. P. 50–57/
2. Davis J. Mosaics of scenes with moving objects // Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society. 1998. P. 354–360.
3. Litvin A., Konrad J., Karl W. Probabilistic video stabilization using kalman filtering and mosaicking // Proc. of IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, Image and Video Communications. 2003. V. 1. P. 663–674.
4. Favorskaya M., Damov M., Zotin A. Accurate spatio-temporal reconstruction of missing data in dynamic scenes // Pattern Recognition Letters. 2013. V. 34(14). P. 1694–1700.
5. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. V. 60(2). P. 91–110.
6. Full-frame video stabilization with motion inpainting / Y. Matsushita, E. Ofek, W. Ge, X. Tang, and H.-Y. Shum // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI). 2006. V. 7. P. 1150–1163.
7. Video repairing: Inference of foreground and background under severe occlusion / J. Jia, T. Wu, Y. Tai, and C. Tang // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 2004. P. 364–371.
8. Favorskaya M., Jain L., Buryachenko V. Digital Video Stabilization in Static and Dynamic Scenes // Computer Vision in Control Systems-1, ISRL. V. 73. Springer International Publishing Switzerland. 2015. P. 261–309.
9. Video Stabilization Using Scale-Invariant Features / R. Hu, R. Shi, I. Shen, W. Chen // 11th International Conference Information Visualization. 2007. P. 871–877.

**А. П. Гук, М. М. Шляхова**

СГУГиТ, Новосибирск; e-mail: plazma\_space@mail.ru

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ДЕШИФРИРОВАНИЮ СНИМКОВ**

В статье рассмотрен метод непараметрического дешифрирования снимков. Выполнен анализ влияния высоты фотографирования на вид функции плотности вероятностей. Показано, что функция плотности вероятностей является достаточно устойчивым дешифровочным признаком для однородных объектах в определенных пределах изменения высот. Также рассмотрена возможность использования применения метода главных компонент. Показано, что применения метода главных компонент не повышает качество дешифрирования снимков.

*Ключевые слова: непараметрическое дешифрирование, главные компоненты, высота фотографирования, функция плотности изображения плотности вероятностей, сравнительный анализ признаков дешифрирования для разных высот*

Многоспектральное цифровое изображение можно рассматривать как совокупность измерений в пространстве объекта, записанных в плоской системе координат многоспектрального снимка,  $P' \{p_1 p_2 p_k\}$  – вектор измерений, содержащий измерения в двух направлениях и содержащих  $p_{ij}$  измерений яркости в соответствии с количеством каналов  $K$ .

Если рассматривать все измерения, выполненные матрицей  $p$  как случайный векторный процесс сформированный последовательно из векторов измерения каждой точки измерения  $P'_{ij}$ , то можно обрабатывать измерения, используя известные статистические подходы. В этом случае каждая точка  $P'_{ij}$  случайного процесса  $P$  будет рассматриваться как отдельное измерение в соответствующем канале [1]. Учитывая, что каждый вектор измерений несет  $k$  измеренных яркостей, то в общем случае имеем многомерный случайный процесс размерности  $Nk$  где  $N$  – количество точек измеряемых на снимке (то есть точек взятых из матрицы  $P$ ).

Как известно, случайный процесс полностью характеризуется функцией плотности распределения вероятностей [1], которая в общем случае не известна. Определение функции плотности распределения – сложная задача, которая решается в настоящее время по анализу обучающих выборок, то есть части реализованного процесса. Для этого разработан ряд методов. Однако для многомерного случая практически не существует надежных решений. Поэтому в настоящее время задачи дешифрирования снимков с использованием не параметрического метода решаются для одномерного случая, то есть для отдельных каналов многоспектрального изображения.

### **Постановка задачи**

Непараметрический метод дешифрирования основан на сравнении функций плотности вероятностей, полученных для объектов эталона (обучающую функцию), и функцию плотности вероятностей, полученную по измерениям дешифрируемого

объекта, путем сравнения с порогом функции правдоподобия, полученную как отношение этих выборок [2].

### Исследования

Исследования, выполненные по большой совокупности многоспектральных космических снимков, показали, что функция плотности вероятностей для различных типов травянистой растительности имеют устойчивую форму для различных вариантов съемки [2; 3].

В работе приведены результаты сравнения различных функций плотности вероятностей по всему набору эталонов показали возможность дешифрирования с использованием предложенного метода. Вероятность распознавания выше 95 %. Подробно результаты описаны в [2–4].

На первом этапе была исследована возможность применения метода главных компонент на качество дешифрирования путем использования функции плотности вероятностей в качестве дешифровочного признака. Было установлено, что применение главных компонент не улучшает качество дешифрирования, если при преобразовании главных компонент используются снимки с небольшим количеством спектральных каналов (например, 4–5 каналов). Однако использование первых или вторых компонент преобразованных изображений дает более устойчивые дешифровочные признаки, чем использование функции плотности вероятностей определенной только по одному, например, красному каналу, как это показано в трудах [2; 3].

В работе показано влияние изменения высоты полета на функцию плотности вероятностей объектов при изменении высоты съемки.

Объектом съемки была небольшая территория района, расположенного на западе Новосибирской области (Барабинский район). Съемка была выполнена с различных высот фотографирования ( $H = 50, 70, 100$  м) цифровой камерой с фокусным расстоянием, равным 3,61 мм и разрешением 12 Мп (размер пикселя 1,5 мкм).

На рис. 1–3 представлены результаты измерений идентичных участков лесного покрова на снимках, полученных с разной высоты фотографирования.

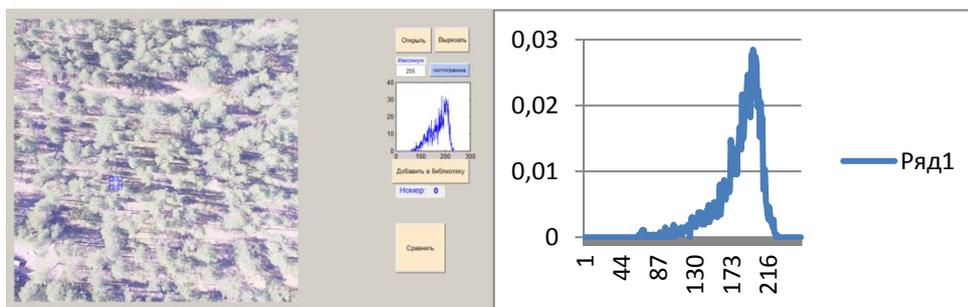


Рис. 1. Высота фотографирования 50 м

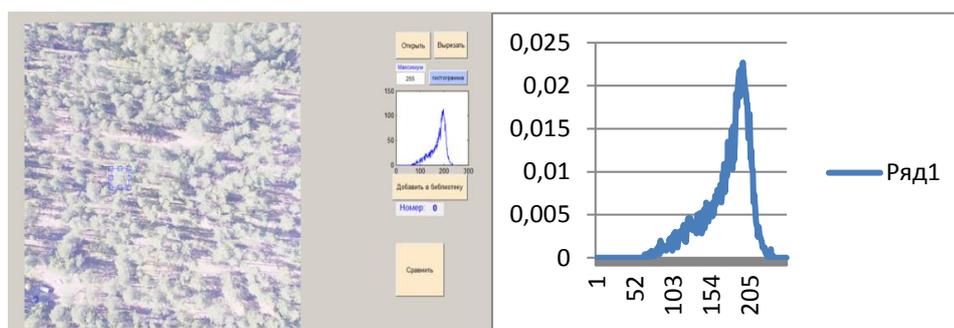
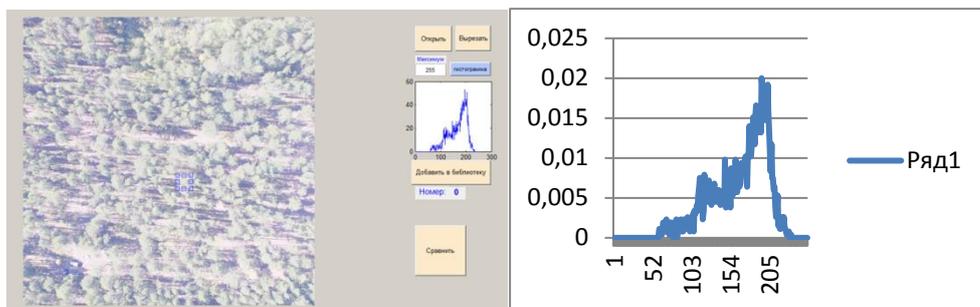
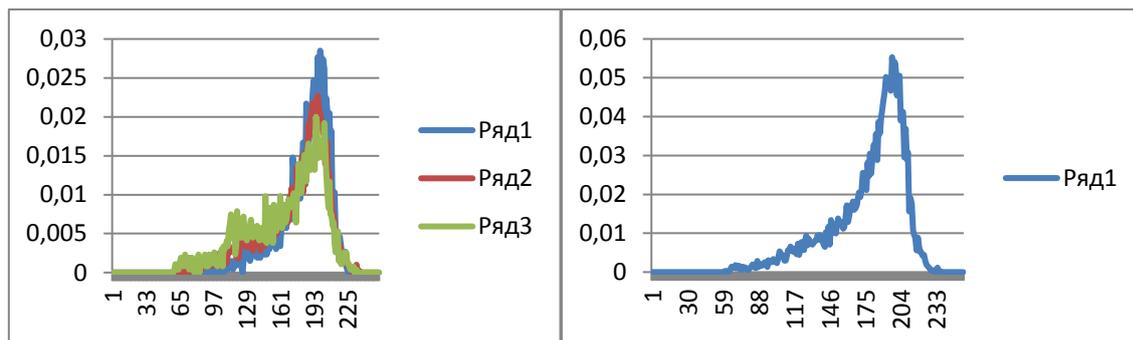


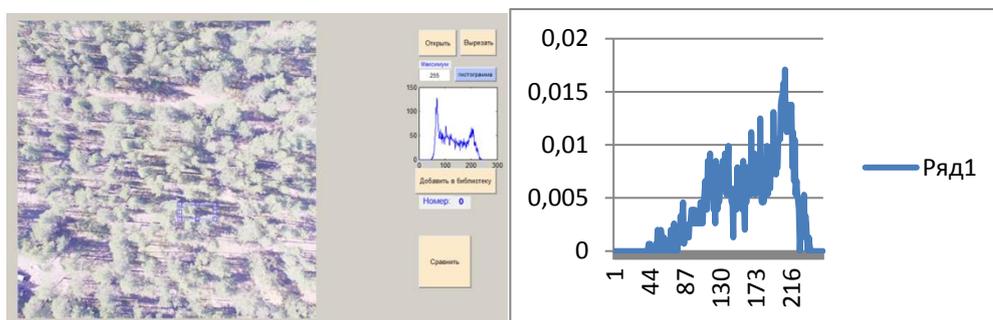
Рис. 2. Высота фотографирования 70 м



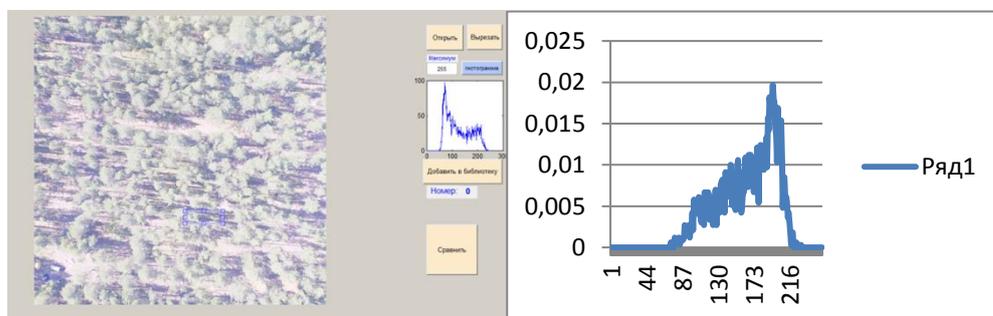
**Рис. 3. Высота фотографирования 100 м**



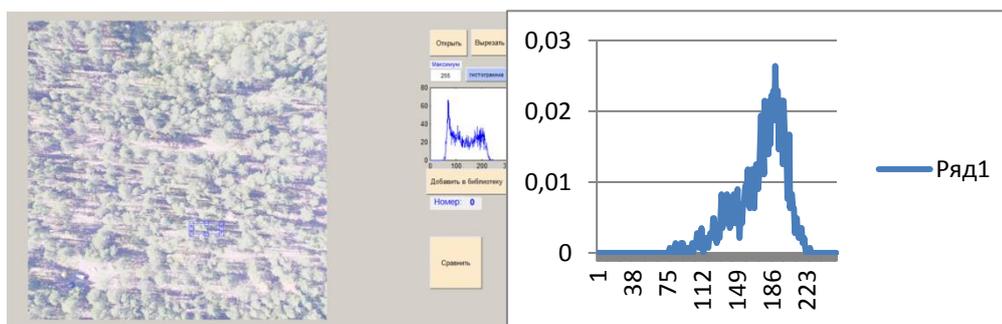
**Рис. 4. Совмещенный и график средних значений распределения функции плотности вероятности**



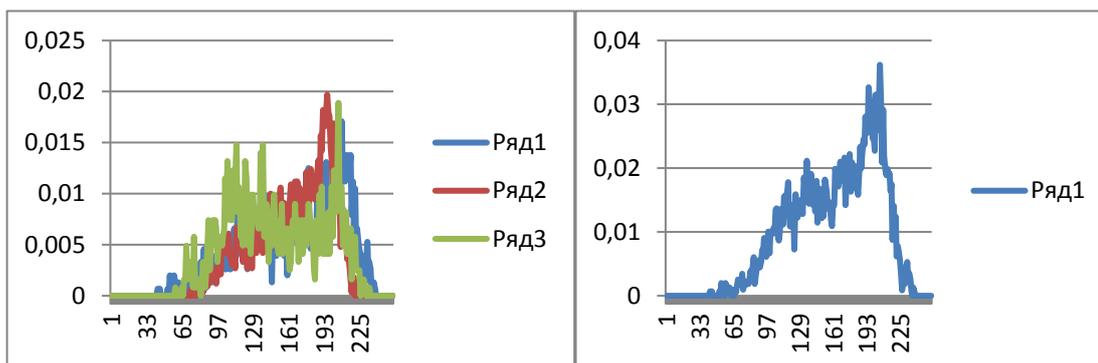
**Рис. 5. Высота фотографирования 50 м**



**Рис. 6. Высота фотографирования 70 м**



**Рис. 7. Высота фотографирования 100 м**



**Рис. 8. Совмещенный и график средних значений распределения функции плотности вероятности**

### **Заключение**

Непараметрический метод дешифрирования является эффективным методом и позволяет выполнять распознавание с высокой точностью. Выполненные эксперименты показали, что при изменении высоты фотографирования определенных пределов вид функции плотности вероятностей практически не изменяется. Это свойство можно использовать при дешифрировании снимков различного масштаба, например при выявлении изменений, при мониторинге территорий. Исследования применения метода главных компонент показали, что повышения качества не происходит, однако при дешифрировании по не параметрическому методу вместо одиночных каналов изображения можно использовать первую или вторую компоненты изображений, преобразованных по методу главных компонент, что в некоторых случаях повышает эффективность алгоритма.

### **Список литературы**

1. Фомин А. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
2. Гук А. П. Автоматизация дешифрирования снимков. Теоретические аспекты статистического распознавания образов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 55. С. 166–169.
3. Симонов Д. П. Метрический подход к дешифрированию снимков на основе использования статистических эталонов // Геодезия и картография. 2014. С. 54–58.
4. Разработка методик автоматизированного дешифрирования космических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, А. С. Хлебникова, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов, А. С. Гордиенко, А. А. Гук // Геодезия и картография. 2013. № 7. С. 31–40.

**Т. Н. Демьяненко, В. В. Чупрова**

ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ», Красноярск; e-mail: t-demyanen@mail.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМОСНИМКОВ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ**

Рассматривается структура почвенного покрова сельскохозяйственных угодий учхоза «Миндерлинское». Предпринята попытка детализации крупномасштабной почвенной карты с помощью дешифрирования космических снимков высокого разрешения на водораздельную территорию междуречья Бузим – Миндерла. Выявлена неоднородность почвенного покрова, представленная сочетаниями черноземов криггенно-мицеллярных мелких и глинисто-иллювиальных мало- и среднемощных.

*Ключевые слова:* почвенная картография, структура почвенного покрова, дешифровочные ключи, катена.

Одним из обязательных условий проектирования высокоинтенсивных (точных) агротехнологий является наличие детальных почвенно-ландшафтных карт с отображением структуры почвенного покрова (СПП) [1]. При данном масштабе почвенный покров дискретизируется на 1-м и 2-м уровнях организации [2], то есть единицами деления являются элементарные почвенные ареалы (ЭПА) и элементарные почвенные структуры (ЭПС). Изучение СПП на основе концепций ее уровневой организации и структурно-функциональных исследований позволяет вскрыть новые закономерности в типологии агроландшафтов красноярской лесостепи, обусловленные сложностью рельефа и пространственной неоднородностью агроэкологических условий. Это касается и обязательного картографирования факторов, лимитирующих земледелие, которые используются в качестве важнейших критериев агроэкологической оценки пахотных массивов на внутривладельческом уровне. Сложившиеся подходы к агроэкологической группировке и картографированию типов сельскохозяйственных земель базируются на методологии структуры почвенного покрова [3].

Основными материалами для подготовки картографической основы при крупномасштабном картографировании являются топографические карты и данные дистанционного зондирования (ДДЗ) [4].

Объект исследования – сельскохозяйственные угодья учхоза «Миндерлинское» Сухобузимского района. Цель исследования – выявление неоднородностей почвенного покрова и типизация элементарных почвенных структур на данной территории. Площадь землепользования составляет 9 500 га и находится в пределах Чулымо-Енисейского денудационного плато и центральной части красноярской лесостепи.

В качестве основы нами использована почвенная карта территории учхоза, составленная в 1989 году Росземпроектотом института Востсибгипрозем г. Красноярск в масштабе 1 : 25000. Карта оцифрована средствами ГИС MapInfo (версия 10.5) в проекции WGS 84. Координатное пространство задано с помощью навигационной программы Sas.Planet. В электронной версии сохранена авторская систематика почв согласно Классификации 1977 года [5].

Холмисто-увалистый рельеф территории учхоза обуславливает значительную комплексность почвенного покрова (рис. 1). Суммарная площадь однородных контуров составляет 28,9 % территории, на долю автоморфных почв приходится 14,6 % (в основном темно-серые и серые почвы). Полугидроморфными лугово-черноземными почвами, представленными обычными, оподзоленными и карбонатными родами, занято 10,2 % площади. По днищам рек и ручьев формируются болотные и пойменные почвы (4,1 %).

Анализ карты показал, что в структуре почвенного покрова землепользования учхоза «Миндерлинское» значительную долю (21 %) составляют мощные темно-серые оподзоленные почвы, образующие самостоятельные ареалы и сочетания с лугово-черноземными оподзоленными. Наибольшие абсолютные отметки являются территорией распространения серых оподзоленных почв, доля которых составляет около 19 % от общей площади хозяйства.

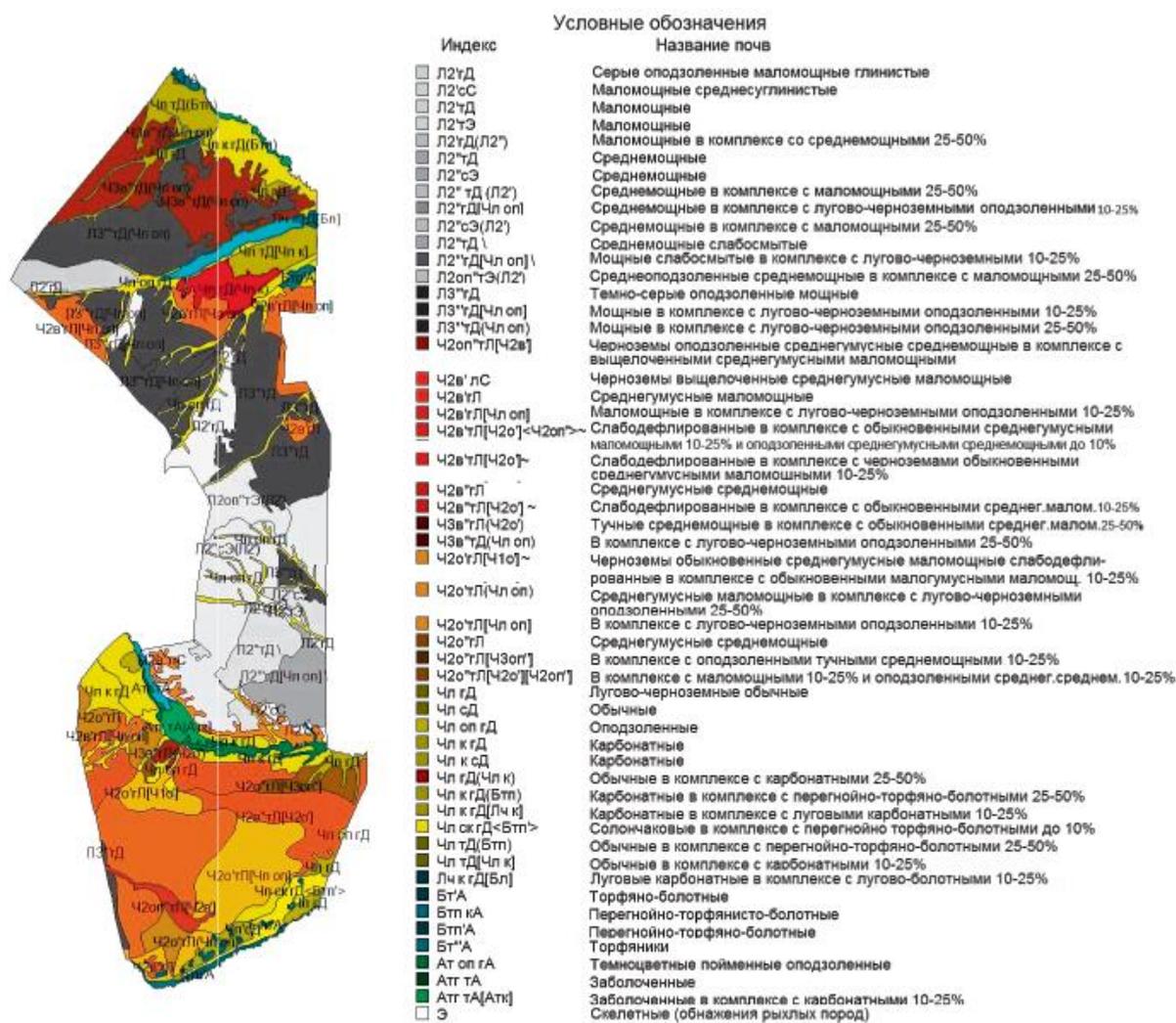


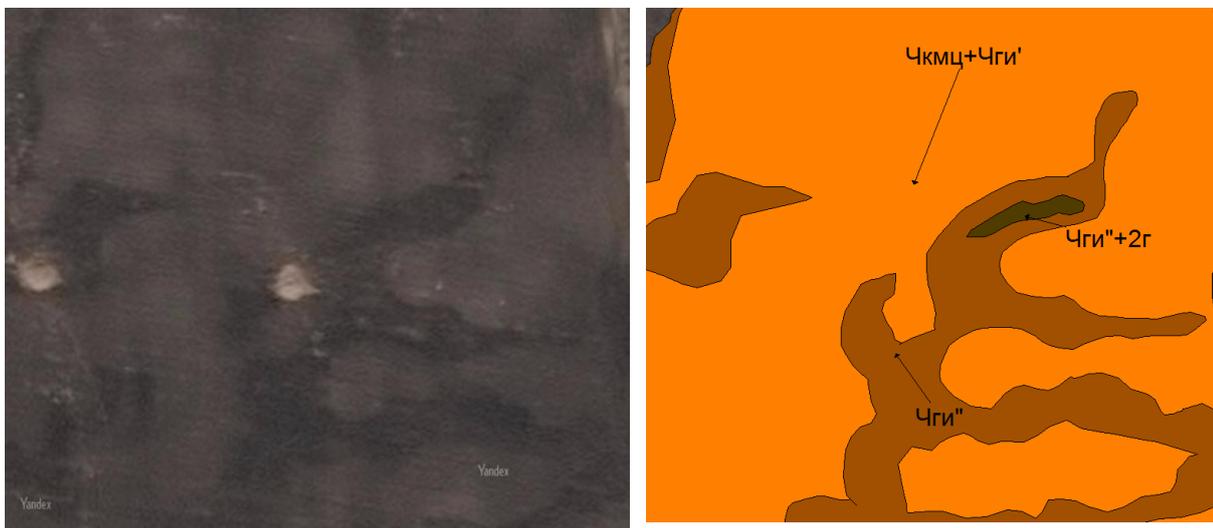
Рис. 1. Цифровая почвенная карта учхоза «Миндерлинское»

Черноземы выщелоченные занимают 29,6 % от общей площади. В основном они сочетаются с обыкновенными среднегумусными и лугово-черноземными оподзоленными почвами. Площади обыкновенных черноземов занимают 10,5 % территории.

Полугидроморфно-подчиненные ЭПС составляют лугово-черноземные почвы: обычные, оподзоленные, карбонатные в однородных контурах и в сочетаниях. Их доля в общей площади хозяйства составляет около 16 %.

Несмотря на крупный масштаб и более подробное содержание в отличие от предыдущих версий, данная карта не отражает неоднородности почвенного покрова, обусловленные выраженным микрорельефом территории, происхождение которого связано с криогенными явлениями. При отсутствии детальной топографической основы единственным способом картографирования территории является прямое дешифрирование космических снимков высокого разрешения. Конечно, существуют прямые методы, которые устанавливают границы между почвенно-картографическими выделами на основе использования геостатических подходов и интерполяции данных точечных полевых исследований почв, но такие методы очень затратны, трудоемки и при отсутствии финансирования практически невозможны.

Таким образом, на данном этапе исследования мы поставили задачу детализировать почвенный покров методом дешифровочных ключей. Ключевой участок представляет собой катену 1 600 метров, заложенную на северном склоне междуречья рек Бузим и Миндерла в двух километрах западнее п. Борск. В настоящем сообщении описан дешифровочный ключ водораздельной части катены (рис. 2).



**Рис. 2. Фрагмент космического снимка и карты структуры почвенного покрова водораздельной части катены. Буквенные обозначения: Чкмц+Чги' – сочетание черноземов криогенно-мицеллярных мелких и черноземов глинисто-иллювиальных маломощных; Чги'' – черноземы глинисто-иллювиальные среднемощные; Чги''+2г – черноземы глинисто-иллювиальные среднемощные с погребенными гумусовыми горизонтами**

Неоднородности почвенного покрова на пашне лучше всего прослеживаются на ранневесенних снимках с открытой поверхностью. Мы использовали спутниковую фотографию картографического online-сервиса «Яндекс.Карты», сделанную в этот период. В мае 2017 года проведено детальное почвенное обследование участка микрокатенным способом. Почвы систематизированы согласно современной классификации [6].

По почвенной карте 1989 года исследуемый участок находится в пределах контура средне- и малогумусных маломощных обыкновенных черноземов. Микрорельеф участка грядово-протяжинный. Полевые исследования выявили различия почв на типовом уровне. Темные участки на снимке соответствуют черноземам

глинисто-иллювиальным среднетощим (черноземы выщелоченные, по классификации 1977 года). Мощность гумусового горизонта варьирует от 57 до 80 см. Они приурочены к протяжинам. На дне протяжин (наиболее темные пятна на снимке) обнаружены ареалы черноземов глинисто-иллювиальных среднетощих с погребенными гумусовыми горизонтами (25–40 см). Основным фон составляют сочетания черноземов криогенно-мицеллярных мелких (гумусовый горизонт 17–20 см) и черноземов глинисто-иллювиальных малотощих.

На территории красноярской лесостепи подобных исследований структуры почвенного покрова до настоящего времени не проводилось. Таким образом, использование космоснимков высокого разрешения обеспечивает получение корректных характеристик почвенного покрова, ускоряет анализ и обновление информации и является приемлемым инструментом для принятия решений при планировании использования агроэкологических ресурсов территории.

#### **Список литературы**

1. Кирюшин В. И. Оценка качества земель и плодородия почв для формирования систем земледелия и агротехнологий // Почвоведение. 2007. № 7. С. 273–880.
2. Фридланд В. М. Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.
3. Сорокина Н. П. Крупномасштабная картография почв в связи с агроэкологической типизацией земель // Почвоведение. 1993. № 9. С. 37–46.
4. Сорокина Н. П. Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М., 2006. 159 с.
5. Егоров В. В., Фридланд В. М., Иванова Е. Н. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
6. Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов и др. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

**Б. С. Добронев, О. А. Попова**

Сибирский федеральный университет, Красноярск  
e-mail: olgaarc@yandex.ru

## **КУСОЧНО-ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АГРЕГАЦИИ И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ ДЗЗ**

Предложены новые подходы для исследования и анализа зависимостей в эмпирических данных. Обсуждаются вопросы агрегирования и различные виды математических моделей агрегированных данных. Для больших объемов данных предлагается использовать процедуры агрегирования на основе кусочно-полиномиальных моделей. Рассматриваются вопросы повышения точности построения кусочно-полиномиальных моделей в виде полиномиальных сплайнов. Рассмотрены новые подходы в задачах восстановления функциональных зависимостей на основе сплайн-агрегаций.

*Ключевые слова: численный вероятностный анализ, агрегация, регрессионный анализ, кусочно-полиномиальные модели, функции плотности.*

### **Введение**

Проблема восстановления зависимостей по эмпирическим данным уже не первое десятилетие широко обсуждается в научных кругах, поскольку имеет важное прикладное значение. В нашем исследовании предлагается метод построения регрессионных зависимостей на агрегированных данных. Мы рассматриваем агрегирование данных как метод предварительной обработки для последующего численного моделирования.

Суть процедуры агрегирования состоит в уменьшении объема исходных эмпирических данных для повышения эффективности их обработки, обнаружения знаний в базах данных и уменьшения неопределенности данных. Агрегация данных играет наиболее важную роль в извлечении полезной информации из большого объема данных. Сущности процедур агрегирования представляют собой методы сокращения исходного набора данных до меньшего объема. Агрегацию можно рассматривать как процесс преобразования данных с высокой степенью детализации для более обобщенного представления. Примером таких процедур является простое суммирование, вычисление среднего, медианы, диапазона максимальных или минимальных значений, то есть интервальных данных, построение функции распределения.

Процедура агрегирования имеет свои преимущества и недостатки. С положительной стороны мы отмечаем, что подробные данные часто являются очень неустойчивыми из-за воздействия различных случайных факторов, затрудняя обнаружение общих тенденций и шаблонов данных. Во многих случаях полезно рассматривать числовые большие числовые данные в агрегированной форме, такой как суммирование или среднее.

Важно иметь в виду, что использование таких процедур агрегирования, как усреднение, исключение экстремальных значений (эмиссия), процедура сглаживания может привести к потере важной информации. Поэтому выбор метода агрегирования является важной задачей, поскольку может вносить дополнительную неопределенность, которой нет в исходной задаче.

Для агрегирования данных используются различные математические модели. В тех случаях, когда данные агрегируются с построением функции распределения,

которая может быть интерпретирована как частотное распределение переменной, предлагается использовать кусочно-полиномиальные модели. Применение таких моделей делает возможным применить для изучения неопределенности и изменчивости эмпирических данных понятие функции плотности вероятности (ФПВ).

### 1. Проблема выбора способа представления агрегированных данных

Помимо гистограмм и частотных полигонов в качестве математических моделей агрегатов можно использовать сплайны как кусочно-полиномиальные функции.

Сплайн представляет собой достаточно гладкую кусочно-полиномиальную функцию.

Рассмотрим сплайн-подход к агрегированию данных. Этот подход полезен по следующим причинам. Поскольку сплайн является кусочно-полиномиальной функцией, то его можно рассматривать как функцию агрегирования данных. Функция агрегирования выполняет численные вычисления в наборе данных и возвращает сплайн-значения. Сплайны полезны для анализа неопределенности в данных из-за того, что они адекватно представляют частотное распределение данных.

### 2. Ядерные оценки функции плотности вероятности

Для оценки функция плотности вероятности часто используются непараметрические методы. Отметим, что вплоть до середины 50-х годов в качестве единственного подхода для построения непараметрической оценки функция плотности вероятности использовалась гистограмма. Первые важные результаты в области применения ядерных оценок для функции плотности вероятности были получены в работах М. Розенблатта, Э. Парзена и Н. Ченцова.

В общем виде ядерная оценка может быть записана в виде

$$\hat{f}^h(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x - \xi_i}{h}\right) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K_h(x - \xi_i),$$

где  $K_h(t) = K(t/h)/h$ .

Определим  $f^h(x)$

$$f^h(x) = M[\hat{f}^h(x)] = f(x) + \sigma^2 h^2 f''(x) / 2 + O(h^4) \quad (1)$$

и  $f^{2h}(x)$

$$f^{2h}(x) = M[\hat{f}^{2h}(x)] = f(x) + 4\sigma^2 h^2 f''(x) / 2 + O(h^4). \quad (2)$$

Применим экстраполяцию Ричардсона к  $f^h(x)$  и  $f^{2h}(x)$ . Далее умножим (1) на 1/4 и вычтем результат из (2). Исключая  $\sigma^2 h^2 f''(x)/2$  из (1) и (2), мы получим

$$f(x) = \frac{4}{3} f^h(x) - \frac{1}{3} f^{2h}(x) + O(h^4).$$

Заметим, что мы построили приближение к функции  $f(x)$

$$f_{cor}^h(x) = \frac{4}{3} \hat{f}^h(x) - \frac{1}{3} \hat{f}^{2h}(x). \quad (3)$$

с точностью  $O(h^4)$ .

С другой стороны, применяя правило Рунге, мы можем получить оценку

$$f''(x) = 2(f^h(x) - f^{2h}(x)) / (3\sigma h^2) + O(h^2)$$

или

$$\| \hat{f}'' \| = \frac{2}{3\sigma h^2} \| \hat{f}^h - \hat{f}^{2h} \|. \quad (4)$$

Рассмотрим вопрос построения сплайна  $s$ , аппроксимирующего функцию плотности  $f(x)$ , так чтобы выполнялась оценка

$$\|f - s\| \leq Ch^4.$$

Для этих целей построим в области  $[a, b]$  носителя функции плотности вероятности  $f(x)$  сетки  $\omega_z = \{z_i = a + ih_z, i = 0, \dots, N_z\}$ ,  $\omega_x = \{x_i = a + ih_x, i = 0, \dots, N_x\}$ .

На сетке  $\omega_z$  вычислим значения  $f_i = \hat{f}(z_i)$ . Сплайн  $s$  будем строить на сетке  $\omega_x$ . Краевые условия выберем следующим образом  $s(a) = 0, s'(a) = 0, s(b) = 0, s'(b) = 0$ :

$$\sum_{i=1}^{N_z} (s(z_i) - f_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

В случае кубических сплайнов – как классических, так и эрмитовых – задача (5) сводится к решению пятидиагональной системы линейных алгебраических уравнений.

Для кубических сплайнов справедлива следующая оценка:

$$\|f^v - s^v\| \leq Kh_x^{4-v} \|f^{(4)}\|, \quad (6)$$

где  $K$  – константа, не зависящая от  $h_x$ .

Задачу можно упростить, если вычислить в узлах сетки  $\omega_x$  значения  $\hat{f}_i$ . Для этих целей будем использовать значения  $\hat{f}_{cor}(z_i)$  и процедуры сглаживания. Например, для классических кубических сплайнов можно использовать метод скользящего среднего, метод взвешенной локальной регрессии, фильтр Савицкого – Голея. Следует стремиться, чтобы выполнялись оценки:

$$|\hat{f}_i - f(x_i)| = O(h_x^4).$$

В этом случае построение сплайна сводится к решению трех диагональной системы линейных алгебраических уравнений и будет выполнена оценка (6).

### 3. Арифметические операции над плотностями вероятности

Важно отметить, что построение регрессионных моделей с агрегированными входными данными требует использования соответствующих числовых процедур. С этой целью применяется численный вероятностный анализ (ЧВА). Отличительной особенностью ЧВА является наличие развитых арифметических операций над функциями плотности вероятности, для которых вводится понятие ФПВ – значные переменные. В рамках ЧВА имеется возможность вычисления функций от случайных аргументов с использованием процедур построения вероятностных расширений. В рамках ЧВА решаются различные задачи численного анализа, в том числе задачи интерполяции, аппроксимации и оптимизации.

Реализация арифметических операций над двумя случайными величинами  $x, y$  основана на работе с их совместной функцией плотности вероятности  $p(x, y)$ .

Известны аналитические формулы для определения функции плотности вероятности результатов арифметических действий над случайными величинами. Например, для нахождения плотности вероятности  $p_{x_1+x_2}$  суммы двух случайных величин  $x_1 + x_2$  используется соотношение

$$p_{x_1+x_2}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x-v, v)dv = \int_{-\infty}^{\infty} p(v, x-v)dv. \quad (9)$$

В случае, когда случайные величины  $x, y$  являются независимыми и имеют плотности вероятности, представленные кубическими сплайнами  $s_x, s_y$ , совместную плотность вероятности можно представить в виде произведения  $p(x, y) = s_x s_y$ . Поскольку кубический сплайн на каждом отрезке сетки представляет кубический полином, то  $p(x, y)$  в случае вычисления интегралов (9) будет кусочно-полиномиальной функцией шестой степени. Наиболее удобными в этом случае будут

квадратуры Гаусса с четырьмя внутренними узлами, которые точны на полиномах седьмой степени.

В качестве примера рассмотрим построение сплайна, аппроксимирующего  $p_{x_1+x_2}$ . Для этих целей в области носителя  $p_{x_1+x_2}$  построим сетку  $\omega = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  и вычислим значения  $f_i = p_{x_1+x_2}(x_i)$ . Используя значения  $f_i$  и краевые условия  $s'(x_0) = 0$ ,  $s'(x_n) = 0$  на сетке  $\omega$  построим кубический сплайн  $s$ . В этом случае справедлива оценка

$$\|p_{x_1+x_2}^{(\nu)} - s^{(\nu)}\| \leq Kh^{4-\nu} \|p_{x_1+x_2}^{(4)}\|, \nu = 1, 2, 3.$$

Далее вычислим

$$\text{norm} = \int s(x) dx,$$

если  $\text{norm} \neq 1$ , то  $s(x) := s(x)/\text{norm}$ .

В случае, когда случайные величины  $x$ ,  $y$  являются зависимыми, совместную функцию плотности вероятности необходимо вычислять отдельной процедурой.

#### 4. Модельный пример

Рассмотрим линейную модель

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \varepsilon,$$

где  $X_1$ ,  $X_2$  – предикторные переменные;  $Y$  – зависимая переменная;  $\varepsilon$  – ошибка. По наблюдаемым значениям  $Y_i$ ,  $X_{1,i}$ ,  $X_{2,i}$  после агрегации функции плотности переменных  $Y$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  представлены сплайнами:  $S_y$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ . Неизвестные параметры  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  определялись исходя из минимума функционала

$$\Phi(a_0, a_1, a_2) = \|S_y - (a_0 + a_1 S_1 + a_2 S_2)\|_2 \rightarrow \min.$$

Для численной реализации  $X_1$ ,  $X_2$  генерировались как суммы трех равномерных на  $[0,1]$  случайных величин, сдвинутых на 1 и 2 соответственно,  $\varepsilon$  с функцией плотности вероятности  $(|2x|-1)^2(2|2x|+1)$  с носителем  $[-0.5, 0.5]$  и  $Y = X_1 + X_2 + \varepsilon$ . Минимизация функционала  $\Phi(a_0, a_1, a_2)$  осуществлялась методом наискорейшего спуска. При значениях  $a_0 = -0.089$ ,  $a_1 = 1.031$ ,  $a_2 = 1.029$  величина  $\Phi(a_0, a_1, a_2)$  не превысила значения  $0.3 \cdot 10^{-3}$ .

#### Заключение

В то время, как существует много способов агрегирования данных, включая простое среднее, использование кусочно-линейных и кусочно-полиномиальных функций агрегации предлагает более информативное представление об изменчивости данных, чем другие формы агрегирования данных. Такие процедуры агрегирования помогают сократить объем вычислений при обработке данных и являются важной основой для извлечения полезных знаний из больших объемов данных.

#### Список литературы

1. Dobronets V. S., Popova O. A. Improving the accuracy of the probability density function estimation // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2017. 10 (1). P. 16–21.
2. Попова О. А. Применение численного вероятностного анализа в задачах интерполяции // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № 2. С. 99–114.
3. Добронетц В. С., Попова О. А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных. Красноярск, 2014.
4. Dobronets V. S., Popova O. A. The numerical probabilistic approach to the processing and presentation of remote monitoring data // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9, № 7. С. 960–971.

**Л. Е. Долгобородов<sup>(1)</sup>, Е. В. Чернышёв<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>АО «Российские космические системы», Москва  
e-mail: dolgoborodov@gmail.com

<sup>(2)</sup>АО «Российские космические системы», Москва  
e-mail: dgekcher@mail.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выполнен общий обзор деятельности АО «Российские космические системы» как головного исполнителя в структуре Госкорпорации «Роскосмос» программно-технологического сопровождения реализации государственной политики в области использования результатов космической деятельности (РКД), в том числе проведения технологических исследований, опытно-конструкторских работ в интересах внедрения соответствующих космических продуктов и космических услуг, развертывания и функционирования элементов инфраструктуры использования РКД. Рассмотрены выполняемые проекты по следующим направлениям: навигационные сервисы и оборудование, спутниковые сервисы, продажа данных ДЗЗ, тематическая обработка данных ДЗЗ, картографические сервисы.

*Ключевые слова: использование результатов космической деятельности, дистанционное зондирование Земли из космоса, глобальные навигационные спутниковые системы, системы мониторинга федерального масштаба.*

Основными нормативными документами, определяющими задачи использования результатов космической деятельности являются «Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года» (утверждены Президентом России 14.01.2014 № Пр-51) и План мероприятий на 2015–2020 годы по реализации Основ государственной политики в области использования РКД (распоряжение Правительства России от 1.09.2015 № 1698-р).

В соответствии с Основами государственной политики в области использования РКД в числе приоритетных целей ставится не только повышение эффективности управления государством, его территориями, регионами и отраслями экономики, но и развитие внутреннего рынка космических продуктов и услуг, в том числе за счет активного вовлечения предприятий малого и среднего бизнеса в сферу использования РКД [1].

Коммерциализация космической продукции и услуг является приоритетной задачей развития Госкорпорации «Роскосмос». В стратегии Госкорпорации определены целевые показатели по таким направлениям коммерциализации: навигационные сервисы и оборудование; спутниковые сервисы, включая продажу данных ДЗЗ, создание тематических продуктов обработки данных ДЗЗ; развитие картографических сервисов.

Приказом Госкорпорации «Роскосмос» от 27.12.2016 № 294 «О мерах по обеспечению координации работ по реализации государственной политики в области использования РКД» АО «Российские космические системы» назначено головным в части программно-технологического сопровождения реализации государственной

политики в области использования РКД на основе использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса и глобальных навигационных спутниковых систем.

Основными направлениями деятельности АО «Российские космические системы» являются создание, развитие и целевое использование различных космических систем, наземных комплексов, бортовых приборов и систем, аппаратуры потребителей и электронной компонентной базы, технологий и программно-аппаратных комплексов, систем использования информационных ресурсов, создаваемых на базе космической информации, для решения целевых задач потребителей.

Продукция АО «Российские космические системы» применяется в целом ряде отраслей народного хозяйства:

- недвижимость и строительство (планы застройки, мониторинг строительства, мониторинг состояния инженерных сооружений);
- государственное управление и безопасность, ЧС (мониторинг и анализ последствий стихийных бедствий и антропогенных катастроф, правительственная и спецсвязь);
- сельское, лесное хозяйство, экология, геология (мониторинг сельхозугодий и экосистем, инвентаризация лесов);
- геодезия и картография (кадастровые планы, картографические услуги, высокоточное позиционирование);
- транспорт и связь (системы мониторинга наземного, воздушного, морского транспорта, обеспечение транспортно-логистических услуг, подвижная спутниковая связь и спутниковый интернет);
- образование и наука (НИОКР и проекты различных заказчиков, подготовка специалистов по созданию и использованию космических технологий, продукция космического назначения для образовательных целей);
- туризм (система спасения, подвижная спутниковая связь и интернет, навигационные и информационные сервисы).

Корпоративные стандарты и стратегия развития АО «Российские космические системы» требуют ориентации на практическое применение исследований и разработок. При создании космических продуктов и услуг учитываются не только требования распорядительных документов федерального уровня, федеральных целевых программ или региональных программ, но и результаты исследований перспективных рынков и анализ требований потенциальных потребителей РКД.

Потребители, заинтересованные в использовании результатов космической деятельности, в том числе в организации космического мониторинга, находятся на всех уровнях управления:

- федеральные органы исполнительной власти, министерства, агентства и ведомства;
- региональные органы исполнительной власти, департаменты и управления регионального правительства;
- органы местного самоуправления;
- организации различных форм собственности и ведомственной принадлежности;
- население.

Проекты на различных стадиях могут использовать разные источники и формы финансирования – пилотные инвестиционные разработки, бюджетное и внебюджетное финансирование НИОКР, различные формы государственно-частного партнерства, франчайзи и концессии, прямые и косвенные доходы от коммерческой эксплуатации систем.

АО «Российские космические системы» ведет широкий круг технологических исследований и опытно-конструкторских работ в интересах внедрения космических

продуктов и космических услуг, развертывания и функционирования элементов инфраструктуры использования РКД. В области комплексного использования РКД основными являются проекты по разработке, созданию и внедрению следующих систем:

- государственной информационно-аналитической системы обеспечения потребителей результатами космической деятельности (ГИАС РКД);

- семейства навигационно-информационных систем «РКС-комплекс» для мониторинга транспорта различного назначения и управления производственными процессами на основе информации о местоположении и состоянии транспортных средств;

- системы высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений с использованием технологий глобальных навигационных спутниковых систем для непрерывного контроля с миллиметровой точностью смещений и колебаний элементов конструкций мостов, плотин, башен и других инженерных сооружений;

- комплекса бортовой аппаратуры космической системы мониторинга судов на базе сигналов автоматической идентификационной системы и оперативного мониторинга судов специального назначения и судов рыбопромыслового флота с использованием судового многофункционального навигационно-связного комплекса ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/ГОНЕЦ («Трал»);

- системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) как функционального дополнения глобальной навигационной системы ГЛОНАСС для повышения точности и обеспечения целостности определения местоположения морских, воздушных, сухопутных и космических потребителей навигационных радиосигналов открытого доступа ГЛОНАСС и GPS;

- национальной сети высокоточного позиционирования – объединенной интегрированной сети референцных станций различных операторов, обеспечивающей единое поле корректирующей информации в границах объединенной сети. Проект находится на этапе создания федерального оператора и реализуется с учетом практического опыта использования услуг высокоточного позиционирования в регионах;

- системы информационного обеспечения безопасного и эффективного использования малых беспилотных авиационных систем на всей территории Российской Федерации на базе инфраструктуры федерального сетевого оператора (ФСО) в области навигационной деятельности и комплексного использования компетенций и ресурсов организаций, подведомственных Минтрансу России, Росавиации, Госкорпорации «Роскосмос» и Минкомсвязи России;

- международной аэрокосмической системы глобального мониторинга (МАКСМ), которая путем комплексирования и интеграции существующих на территории России и стран СНГ средств мониторинга и прогнозирования природного и техногенного характера, данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), создаваемых прогнозных сервисов, обеспечивающих комплексное ситуационное представление данных по результатам прогнозирования и предупреждения наступления чрезвычайных ситуаций (оповещение об угрозах возникновения сильных землетрясений, природных пожаров и наводнений, оперативный контроль состояния критически важных технических объектов) в совокупности с семантической и геопространственной информацией решает задачи прогнозирования и предупреждения наступления ЧС и позволяет снизить, по экспертным оценкам, причиняемый ущерб на 10–20 %.

Сложность и масштаб проектов, выполняемых АО «Российские космические системы», требует объединения компетенций и усилий специалистов многих отраслей. Так, для реализации проекта по созданию Инфраструктуры ФСО, образован межотраслевой консорциум с участием ПАО «Ростелеком», ФГУП «Госкорпорация ОрВД» и АО «Российские космические системы». Создано совместное предприятие

в области использования РКД с новым брендом, который выводится на рынок – «Космические коммуникации», сокращенно «КосКом».

Такое межотраслевое объединение усилий дает синергетический эффект по следующим направлениям:

- развитие проектов за счет средств из внебюджетных источников;
- доступ к современной телекоммуникационной и вычислительной инфраструктуре на всей территории России;
- создание навигационных и картографических сервисов;
- проектирование и целевое применение систем обеспечения безопасного использования летательных аппаратов, организации управления воздушным движением;
- информационное обеспечение органов власти, деятельности федерального сетевого оператора;
- эксплуатация государственных информационных систем, функционирующих на всей территории России;
- масштабная реализация хозяйственной деятельности во всех регионах России.

### **Заключение**

АО «Российские космические системы» ведет широкий круг технологических исследований и опытно-конструкторских работ, выполняет ряд проектов внедрения космических продуктов и космических услуг, развертывания и функционирования элементов инфраструктуры использования РКД.

Успешное развитие технологий на этапах НИОКР, внедрение и коммерциализация космических продуктов и услуг обеспечивается сочетанием бюджетного и внебюджетного финансирования, различных форм и способов участия всех заинтересованных сторон.

Сложность и масштаб проектов требует объединения усилий значительного количества специалистов многих отраслей. Для реализации проектов создаются межотраслевые консорциумы и совместные предприятия.

### **Список литературы**

1. Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 г.: утв. Президентом РФ 14.01.2014 № Пр-51.

**Т. Г. Злобина**

АУ «Управление Минприроды УР», Ижевск, Удмуртская Республика  
e-mail: zlobinatata@gmail.com

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НАДЗОРА И МОНИТОРИНГА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРРИТОРИИ**

Статья посвящена описанию применения методов дистанционного зондирования Земли для повышения эффективности государственного экологического контроля на региональном уровне. Приведена схема получения информации о природных и антропогенных объектах с помощью визуального дешифрирования космической съемки.

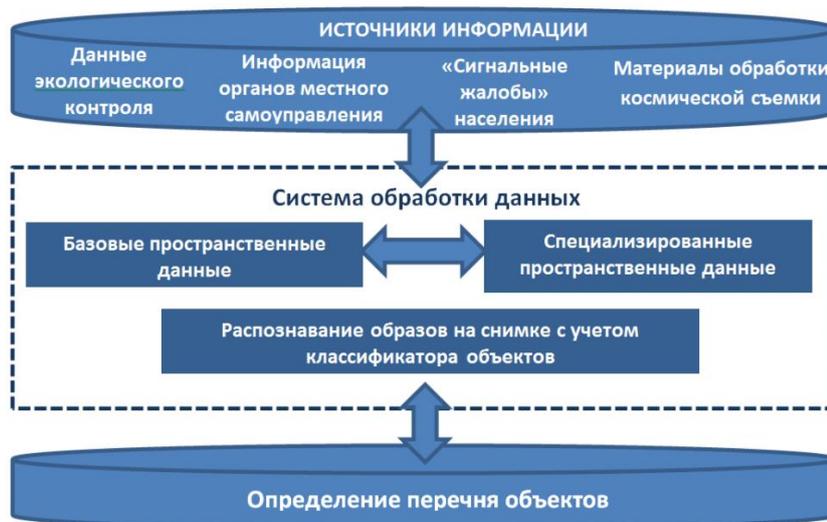
*Ключевые слова:* экологический надзор, экологический мониторинг, космическая съемка, алгоритм работы, классификатор объектов, визуальное дешифрирование.

Охрана окружающей природной среды и снижение уровня ее загрязнения в значительной степени определяются эффективностью экологического мониторинга и надзора за источниками негативного воздействия.

В условиях ограниченной численности инспекторского состава природоохранных органов и существующих методов организации проверок предприятий и учреждений резервы повышения эффективности указанной деятельности исчерпаны.

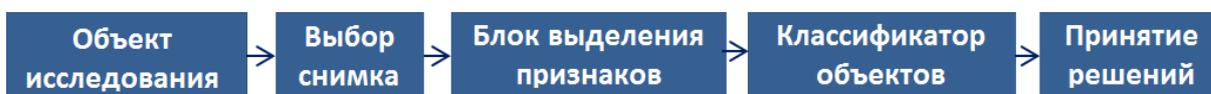
В создавшейся ситуации оптимизация деятельности государственных органов в сфере экологического надзора и мониторинга возможна на основе выбора приоритетных объектов на этапе планирования инспекторских проверок и рейдов. Космическая съемка как достоверная и относительно недорогая информация пока еще не получила широкое использование в практической деятельности экологического надзора.

Схема предполагаемой методики использования космических снимков для планирования деятельности в сфере экологического надзора и мониторинга продемонстрирована на рис. 1.



**Рис. 1. Схема методики использования космических снимков**

В блок распознавания образов на снимке входит метод визуального анализа космической съемки. Визуальный анализ осуществляется с учетом признаков дешифрирования, в роли которых выступают свойства объектов или их взаимосвязей, позволяющие по фотоизображению распознать сами объекты.



**Рис. 2. Блок распознавания образов на космоснимке**

Признаки подразделяются на прямые и косвенные [1]. Задача по их выделению и, соответственно, отнесению объекта к тому или иному классу усложняется многими обстоятельствами. Нередко одни и те же признаки характерны не только, например, для объектов добычи полезных ископаемых, но для других антропогенных объектов, видимых на снимках, – несанкционированного складирования отходов. В этом случае достоверность информации, полученной с помощью визуальной оценки снимков, тесно связана с информационной обеспеченностью данными по лесному фонду, размещению отходов, объектам строительства, расположению населенных пунктов и дорожной сети [2].

Классификатор объектов для планирования надзора и мониторинга включает следующие темы:

- Антропогенные воздействия при недропользовании.
- Антропогенные воздействия на поверхностные воды и водные биоресурсы.
- Оценка нарушенности почвенного покрова (земель).
- Антропогенные воздействия на леса.
- Обнаружение хозяйственной деятельности в границах особо охраняемых природных территорий.
- Выявление источников воздействия на окружающую среду.
- Выявление мест размещения отходов производств и потребления (в том числе несанкционированных) [3].

Методика позволит на основе разработанного алгоритма выявлять источники негативного воздействия, осуществлять контроль за состоянием природных ресурсов, оценивать состояние окружающей природной среды как на региональном уровне в пределах Удмуртской Республики, с учетом ее природно-климатических и экономических особенностей, так и для контроля и мониторинга на локальном уровне наблюдений.

Объединение информации с космических снимков с существующими данными об природно-климатических и техногенных особенностях территории позволит выстроить приоритеты объектов экологического надзора и мониторинга.

Разрабатываемый алгоритм представляет собой программный продукт, включающий базу данных интерпретируемых природных и техногенных объектов и специализированные средства выделения объектов и явлений на космических снимках с учетом их качественных и количественных характеристик.

### **Заключение**

Алгоритм интерпретации будет создан с использованием классификатора тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с применением материалов дистанционного зондирования Земли, на основе классификаторных правил, используемых для распознавания образов (источников негативного воздействия) в космической съемке, с учетом пространственных и временных признаков объектов и явлений [3].

Существенным отличительным признаком разрабатываемого алгоритма будет являться содержательная часть базы данных с выделенными характеристиками, позволяющими классифицировать источники и результаты негативного воздействия на окружающую среду.

#### **Список литературы**

1. Елсаков В. В, Кириллов Д. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений: учеб. пособие. Сыктывкар: СЛИ, 2013. 44 с.
2. Мониторинг недропользования в части общераспространенных полезных ископаемых на примере Республики Коми / А. В. Тетентьев, А. Н. Вшивцев, В. В. Афанасьев, Е. Б. Ахматова, С. И. Исаенко // Земля из космоса. 2009. Вып. 2. С. 15–21.
3. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. Ред 7. Иркутск: ООО «Байкальский центр», 2008. 80 с.

**А. Г. Зотин<sup>(1)</sup>, М. А. Курако<sup>(2)</sup>, К. В. Симонов<sup>(3)</sup>, А. В. Кругляков<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск

<sup>(2)</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>(3)</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

e-mail: mkurako@sfu-kras.ru

## **СЕГМЕНТАЦИЯ И АНАЛИЗ ГРАНИЦ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ОТ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ**

Разработана методика обработки изображений, включающая в себя применение алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с процедурой контрастирования изображений. На экспериментальном материале показано, что предлагаемая методика является эффективным инструментом для анализа внутренних геометрических черт изучаемых объектов – следов проявлений морских природных катастроф в береговой зоне.

*Ключевые слова: обработка изображений, шиарлет-преобразование, следы морских природных катастроф, геометрический анализ, контрастирование.*

### **Введение**

В современной литературе приводятся различные варианты для автоматизации процесса обработки изображений, связанных с проявлениями опасных природных явлений. Однако получаемые результаты не всегда отвечают требованиям современной практики. Успешные методики для эффективного и более точного решения этой задачи могут быть в действительности применены к гораздо более широкому кругу областей, в том числе в визуализации изображений для целей геометрического (морфологического) анализа применительно к исследованию проявлений морских природных катастроф. Во многих работах приводятся варианты применения различных вычислительных средств для решения указанных актуальных задач. В то же время применение алгоритмов шиарлет-преобразования [1–4] в сочетании с последующим контрастированием является новым вычислительным подходом в данной предметной области.

### **1. Методика обработки данных**

Рассмотрим основные этапы предлагаемой методики обработки изображений для обнаружения закономерностей и спектральной декомпозиции пространственных данных и изображений. Применение методики позволяет решать широкий класс задач по аппроксимации выделенных структур-объектов на изображениях с проявлениями природных катастроф. При этом на основе базовых алгоритмов шиарлет-преобразования [1; 2; 4] решаются задачи разделения точек и кривых, выделения контуров, эффективной визуализации данных (контрастирование).

Исследование алгоритма FFST [2] показало, что контуры объектов можно получать в виде суммы коэффициентов шиарлет-преобразования для заданного масштаба. В связи с этим предлагается использовать эту особенность для решения задачи обнаружения и спектральной декомпозиции данных с целью решения задачи аппроксимации: выделения и контрастирования контуров исследуемых геообъектов.

Для оценки эффективности работы алгоритмов шиарлет-преобразования использовалось несколько критериев. Один из них – среднее время работы алгоритма на одном изображении. Анализ результатов показал, что алгоритм ShearLab [1; 4] работает быстрее FFST на изображениях больших размеров, в то время как FFST имеет незначительное преимущество на небольших изображениях.

После применения алгоритмов вейвлет- и шиарлет-преобразования предлагается следующая процедура контрастирования: преобразования осуществляются поэлементно

для выделения интересующих деталей изучаемого объекта; выполняется исключение несущественных особенностей (фона); выполняется приведение изображения к виду, удобному для визуальной интерпретации и дальнейшего анализа; выполняется оценка расчетных искомым параметров (решение задач на выделение контуров и шумоподавление).

## **2. Процедура контрастирования**

Алгоритмически процедура контрастирования – подбора цветов и распределения плотности изолиний – соответствует известной методике построения упругой сетки по пространственным данным [5]. Анализируемый объект представляется как ограниченное двумерное многообразие, вложенное во множество исследуемых данных наблюдений (изучаемое изображение) так, чтобы форма и расположение многообразия отражали основные особенности распределения точек исходных данных на изображении.

Для описания такой сетки используется вектор-функция  $r = r(x, y)$  от координат  $x$  и  $y$ , называемых внутренними координатами. Линии, вдоль которых одна из внутренних координат принимает постоянное значение, задают внутреннюю координатную сетку. Таким образом, каждая точка данных на изображении может задаваться  $m$  «внешними» (исходными) координатами, а также двумя внутренними координатами. При построении вычислительных процедур предполагается, что расчеты выполняются не с многообразием (картой), а с его точечной аппроксимацией, определяемой сеткой узлов.

Предполагается также, что длина ребер сетки не велика, поскольку карта аппроксимирует данные и достаточно плотно к ним прилегает. Простейшим способом проецирования является сопоставление каждой точке данных ближайшего узла сетки. Множество данных располагается на поверхности сетки так, чтобы квадрат расстояния от точек данных до ближайшего узла был минимальным.

В соответствии с указанной постановкой задачи сформулирован критерий минимизации, включающий в себя не начальные и конечные положения точек (до и после проецирования на карту), а положения узлов сетки относительно исходных данных, что позволяет существенно снизить размерность задачи.

На основе изложенной постановки задачи предложен способ построения «упругой карты», учитывающий значения введенного физического признака для исследуемых данных и характеризующего изучаемый объект. Представлено краткое описание основных элементов алгоритмического обеспечения разрабатываемой методики анализа и визуализации данных на изображении.

## **3. Экспериментальные исследования**

Показаны возможности применения методики для обработки и анализа сложных изображений, в частности, в проблеме цунами и изучении следов катастрофических наводнений в береговой зоне. Представлена общая вычислительная схема модифицированного геометрического анализа при выполнении численных экспериментов с изучаемыми изображениями. Последовательность действий для оценки результатов анализа имеет следующий вид:

- по каждому снимку формируется карта эталонов, в которой пользователь-эксперт выделяет контуры объектов интереса;
- к каждому снимку применяется набор фильтров с разными настройками;
- по каждому снимку формируется серия расчетных (отфильтрованных) изображений;
- к каждой серии применяются методы выделения контуров (оконтуривание).

Результат применения фильтров и алгоритмов выделения контуров оценивается по следующим критериям:

- насколько хорошо (в процентном соотношении от эталона) видны контуры объектов интереса;
- сколько лишней информации (в процентах от размеров изображения).

Далее для оконтуренных изображений применяется методика контрастирования и оцениваются результаты расчетов: цветовое выделение, то есть насколько видны

контуры объектов интереса (в процентном соотношении от эталона), а также в сравнении с простым выделением контуров; доля незначимых участков; в итоге формируется заключение о том какой вариант лучше.

После этого выполняется общая оценка пригодности фильтров для обработки изучаемых снимков. Для наилучшего метода (алгоритмы шиарлет-преобразования в сочетании с контрастированием) проводятся дополнительные эксперименты на изображениях каждого класса.

Формируется искусственно зашумленные изображения с добавлением шума (5, 10, 15 %), где представлено следующее распределение шумовых компонентов – 70 % аддитивного и 30 % импульсного шума. После этого выполняются следующие исследования:

- формируется набор изображений, обработанных фильтрами с разными настройками (размерами ядра и параметрами);
- повторно применяется разработанная методика (шиарлет-преобразование и контрастирование);
- выполняется сравнительный анализ результатов на зашумленных изображениях с результатами на изображениях без шумов.

В итоге оцениваются результаты по контрастированным объектам интереса – насколько они близки к тому, что получены на снимках без шумов (в процентном соотношении), и выдается заключение о качестве решения поставленных задачи различными фильтрами.

Предлагаемые в данной работе авторами подходы к визуализации изображений и методы их обработки позволяют повысить объективность обнаружения и разрешающую способность, а также дают возможность создания трехмерного виртуального изображения изучаемого объекта.

Таким образом, предложена модифицированная схема геометрического анализа визуальных данных в данной предметной области. Выбор базовых алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с разработанной методикой контрастирования позволяет повысить точность выделения линейных структур и визуальное качество изображений изучаемых объектов. Приведенные примеры решения этой задачи показали варианты эффективной визуализации для исследуемых изображений.

### **Заключение**

Применение разработанной методики обработки и анализа визуальных данных на основе алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с процедурой контрастирования позволяет значительно улучшить результаты описания следов природных катастроф. Таким образом, разработанный вычислительный инструментарий для анализа внутренних геометрических черт экспериментальных изображений дает возможность успешно решить задачу количественного морфологического (геометрического) представления визуальных данных на основе применения алгоритмов шиарлет-преобразования в сочетании с процедурой контрастирования изображений.

Предлагаемая методика позволяет повысить точность выделения квазикруглых и линейных структур, а также визуальное качество изображений изучаемых объектов в рамках процедуры контрастирования снимка для адекватной количественной оценки их основных характеристик (длина, ширина, площадь).

### **Список литературы**

1. Donoho D. L., Kutyniok G. (2009). Geometric separation using a wavelet-shearlet dictionary. SampTA'09 (Marseille France 2009) Proc.
2. Hauser S. (2011). Fast finite shearlet transform: a tutorial. University of Kaiserslautern.
3. Guo K., Labate D., W-Q Lim (2009). Edge analysis and identification using the Continuous Shearlet Transform Appl Comput Harmon Anal 27: p. 24–46.
4. Kutyniok G., Labate D. (2012). Introduction to shearlets. In Shearlets. Multiscale analysis for multivariate data. Boston MA Birkhauser: p. 1–38.
5. Горбань А. Н., Зиновьев А. Ю., Питенко А. А. Визуализация данных методом упругих карт // Информационные технологии. 2000. № 6. С. 26–35.

**А. Г. Зотин, А. И. Пахирка, М. В. Дамов**

Институт информатики и телекоммуникаций  
Сибирского государственного университета науки и технологий  
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск  
e-mail: zotin@sibsau.ru, pahirka@sibsau.ru, me@damov.pro

## **СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ КАДРОВ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Рассматривается вопрос выбора алгоритма поиска точечных особенностей для использования в системе сопоставления кадров видеопоследовательности. Приводится сравнение быстродействия алгоритмов обнаружения и расчета дескрипторов точечных особенностей при анализе материала, полученного с использованием квадрокоптера.

*Ключевые слова: обработка видео, анализ изображений.*

В последние годы широкое применение находят такие устройства дистанционного зондирования как квадрокоптеры и беспилотные летательные аппараты – дроны, которые активно используются для съемки на малых высотах. Чаще всего они находят применение в сфере удаленного мониторинга объектов и обследования сооружений, а также оценке состояния земель. Одной из задач является формирование панорамных снимков, представляющих высокодетализированные изображения местности, которые часто невозможно получить в виде цельной фотографии.

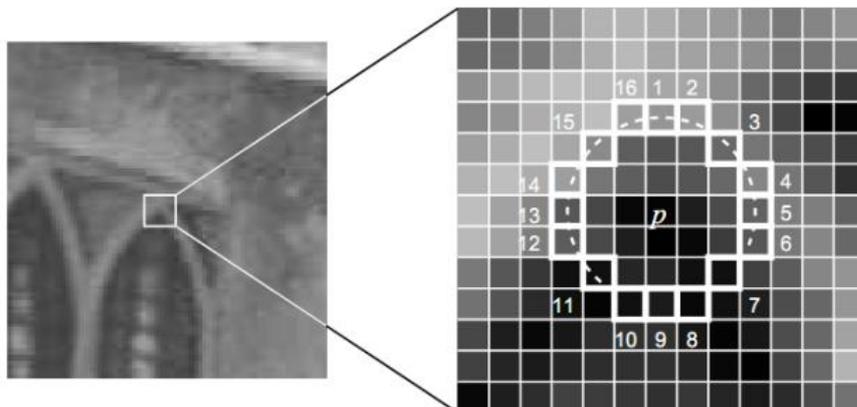
Одним из подходов к формированию панорамных снимков является использование данных видеопоследовательности полученной при съемке с квадрокоптера или иного беспилотного летательного аппарата. В таком случае формирование панорамных изображений будет включать следующие основные этапы:

- 1) обнаружение особых точек кадров видеопоследовательности и формирование наборов точечных особенностей;
- 2) сопоставление наборов точечных особенностей;
- 3) построение проективного преобразования для выравнивания изображений и их переноса в общую плоскость;
- 4) непосредственная сшивка выровненных изображений.

Метод обнаружения особых точек должен гарантировать инвариантность относительно любых преобразований изображения для того, чтобы можно было выполнить анализ данных и формирование панорамных снимков. Для обнаружения особых точек в изображениях кадров в рамках исследования были выбраны такие методы, как FAST, BRISK, ORB, SIFT в связи с тем, что на текущий момент они являются наиболее распространенными для решения подобного рода задач.

Метод FAST (Features from Accelerated Segment Test) заключается в том, что для каждой точки-кандидата  $P$  рассматривается окружность из 16 пикселей (согласно алгоритмом Брезенхема с радиусом 3) [1]. Точка будет считаться особенной, если для анализируемой точки  $P(x,y)$  с интенсивностью  $I_{P(x,y)}$  и установленным порогом  $t$  существуют 12 смежных пикселей на окружности, интенсивности которых больше  $I_{P(x,y)} + t$  или же меньше  $I_{P(x,y)} - t$ . Для наиболее быстрого анализа точки-кандидата авторы предлагают проверку интенсивность в вертикальных и горизонтальных точках

на окружности (принимая обход по часовой стрелке, это точки под номерами 1, 5, 9 и 13) с интенсивностью в точке  $P(x,y)$  (рис. 1). Если три из этих точек будут обладать значением большим  $I_{P(x,y)} + t$  или меньшим  $I_{P(x,y)} - t$ , то в этом случае будет проводиться полный тест для всех 16 точек. Принимая во внимание особенности работы, можно сделать вывод, что для некоторой окрестности может быть найдено несколько особых точек, эффективность алгоритма зависит от порядка обработки изображения и распределения пикселей.



**Рис. 1. Рассматриваемая окрестность для точки  $P(x,y)$  детектора FAST**

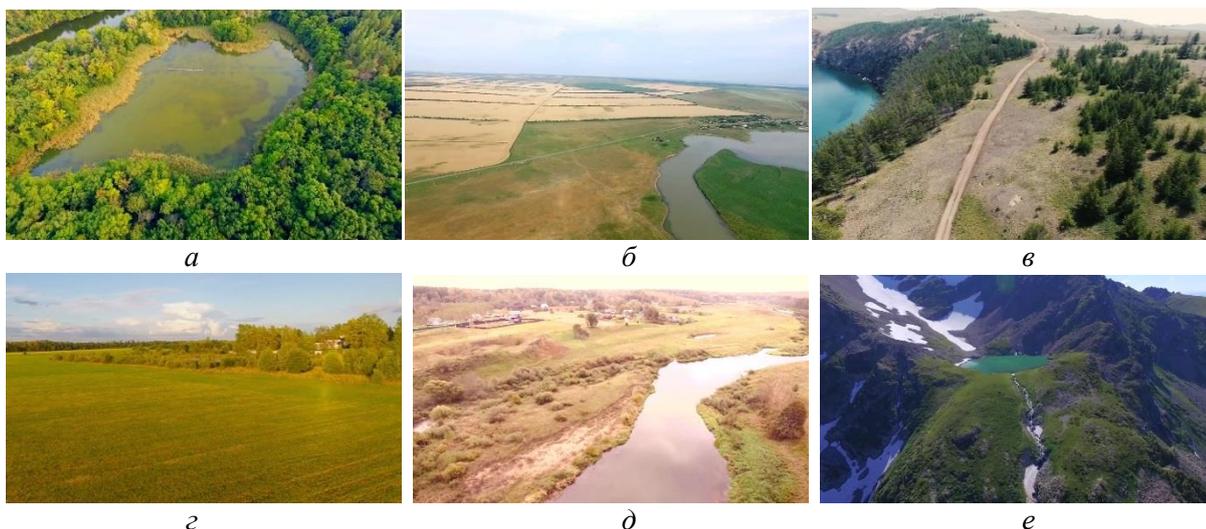
В сочетании с FAST часто используется дескриптор BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Feature), который является одним из самых быстрых и простых. Он представляет собой бинарный вектор, состоящий из 0 и 1, в котором расчет каждого значения дескриптора происходит путем сравнения яркости пар пикселей, находящихся в окрестность  $S \times S$  особой точки.

Метод BRISK (Binary robust invariant scalable keypoints) основан на детекторе FAST. Так же, как и в FAST, для определения ключевой точки используются окружности. Определяется набор концентрических окружностей вокруг точки и множество пар пикселей. Далее на данном множестве строится набор бинарных тестов, представляющих собой сравнение интенсивности в соответствующих пикселях. Результаты тестов объединяются в битовую строку, которая и является итоговым дескриптором особой точки [2].

Метод ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) является своего рода расширением для метода FAST. Так, в данном методе сочетаются алгоритмы поиска особых точек FAST и дескриптор BRIEF с некоторыми изменениями. В методе измеряется интенсивность между центральным пикселем и его окружностью, но в отличие от BRIEF подбираются оптимальные тестовые пары точек. Также в ORB задействуется механизм компенсации ориентации, что делает данный алгоритм инвариантным к вращению [3].

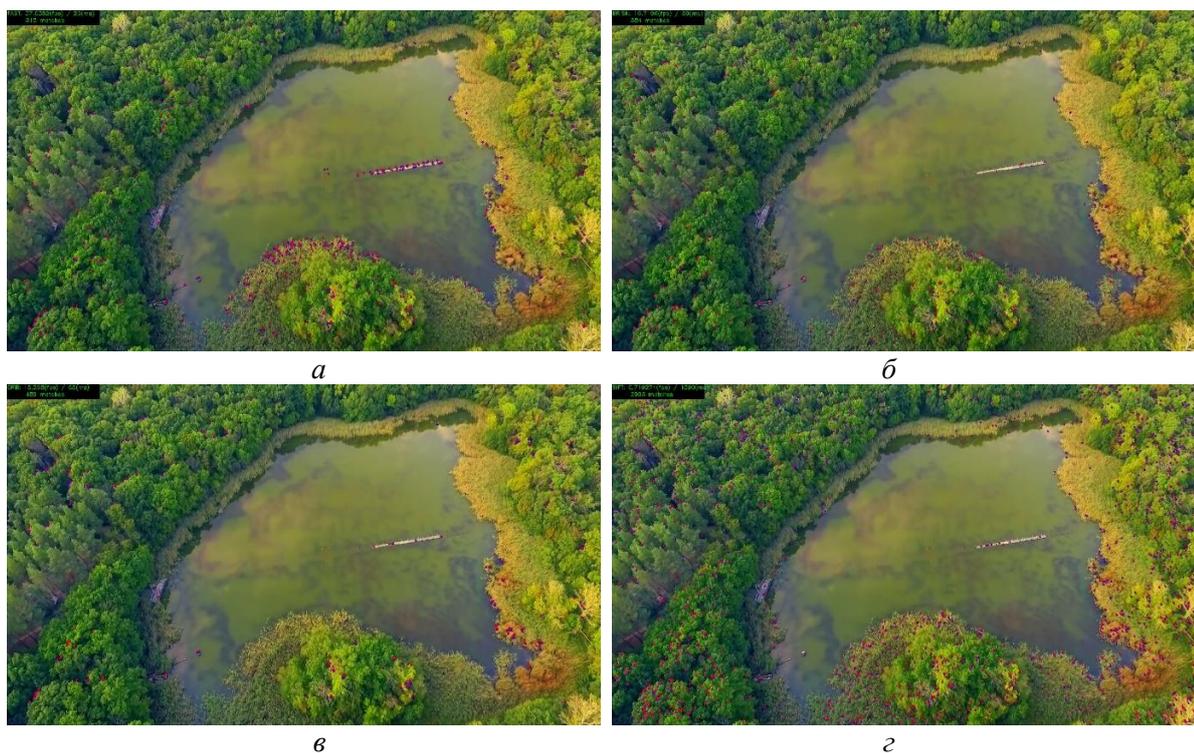
Метод SIFT (Scale Invariant Feature Transform) является одновременно методом детектирования и вычисления дескрипторов особых точек. Он инвариантен к сдвигам, вращениям и масштабированию. На первом шаге алгоритма сканируется изображение в разных масштабах, находится локальный экстремум вычитанием Гауссианов разных масштабов. Экстремумы принимаются за особые точки. Далее удаляются точки с низкой контрастностью, а для оставшихся рассчитывается ориентация на основе локального градиента [4].

Для проведения экспериментального исследования было взято несколько видеоматериалов с разными разрешениями, которые находятся в свободном доступе на YouTube: «Леса Орловщины – полет квадрокоптера DJI Phantom 3», «Полет над рекой-Егорлык, Ставропольский край», «Байкал», «Полет над полем», «Полет над рекой на квадрокоптере», «Алтай с квадрокоптера», – кадры из которых представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Кадры из видеоматериала: *a* – «Леса Орловщины – полет квадрокоптера DJI Phantom 3»; *б* – «Полет над рекой – Егорлык, Ставропольский край»; *в* – «Байкал»; *г* – «Полет над полем»; *д* – «Полет над рекой на квадрокоптере»; *е* – «Алтай с квадрокоптера»

В качестве демонстрационного примера для работы алгоритмов выбраны кадры из последовательности «Леса Орловщины – полет квадрокоптера DJI Phantom 3». Пример наборов данных результата сопоставления особых точек показан на рис. 3.



**Рис. 3.** Результаты сопоставления особых точек:  
*a* – FAST; *б* – BRISK; *в* – ORB; *г* – SIFT

Тестирование проводилось на компьютере со следующей конфигурацией: процессор AMD Athlon II X3 3.2 GHz, оперативная память 8GB DDR3 1333 Mhz, видеокарта NVIDIA GeForce GTX 650. Для каждой тестовой видеопоследовательности

были сформированы наборы в разрешениях от 640×360 до 1920×1080. В случае невозможности получить последовательность оригинала в желаемом разрешении был использован метод интерполяции Lanczos3, при этом для снижения потери качества видеоматериал сохранялся в формате RGB без сжатия. В качестве основных основного критерия для оценки алгоритмов выбран критерий времени (таблица). Такой выбор обусловлен тем, что для смежных кадров любой из методов мог сформировать набор из более 300 особых точек пригодных для расчета преобразования кадров. Дополнительно для искусственной последовательности была проведена оценка формирования наборов с учетом влияния освещения.

Таблица

**Сравнение среднего времени обработки кадров видеопоследовательностей**

Разрешение	Время, мс				Оценка времени обработки относительно FAST, раз		
	FAST	BRISK	ORB	SIFT	BRISK	ORB	SIFT
640×360	13,65	14,98	22,08	535,37	1,10	1,62	39,22
852×480	19,12	22,57	33,07	781,98	1,18	1,73	40,90
1280×720	29,24	47,59	63,65	1345,53	1,63	2,18	46,02
1600×900	34,71	78,32	90,12	1965,74	2,26	2,60	56,63
1920×1080	43,49	111,54	132,38	2844,56	2,56	3,04	65,41

### Заключение

В ходе экспериментального исследования было выяснено, что наиболее быстрым является метод FAST, он позволяет выполнять расчеты для изображений с разрешением меньше чем 1280×720 в реальном режиме времени. Все методы показали хорошие результаты при линейном движении и незначительных поворотах при съемки сверху. В случае прямой съемки и быстром вращении квадрокоптера методы FAST и BRISK приносят незначительные погрешности в расчеты. Метод ORB дает схожие результат с тем, что демонстрирует метод SIFT, при этом он в 20–24 раз быстрее. Основным недостатком рассмотренных методов является использование в расчетах яркостной составляющей пикселя, что может привести к некорректным результатам при выполнении формирования панорамных снимков местности в случае наличия на кадрах засветов или больших фрагментов содержащих блики.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 16-07-00121 А.*

### Список литературы

1. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection // Computer Vision–ECCV, Springer Berlin Heidelberg. 2006. P. 430–443.
2. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints // Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference. 2011. P. 2548–2555.
3. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski // Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference. 2011. P. 2564–2571.
4. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. 60(2). P. 91–110.

**А. В. Картушинский<sup>(1, 2)</sup>, А. А. Ларько<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>(2)</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск

e-mail: kartalvas@rambler.ru

## **ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ЗОН ЗЕМЛИ**

Представлены результаты обработки спутниковых данных по расчету градиентных характеристик поверхности Земли. Рассматриваются структурные особенности динамики горизонтальных градиентных полей водных систем и поверхности суши по физическим и биологическим параметрам. Обсуждаются проблемы параметризации взаимодействия факторов окружающей среды для численного моделирования процессов физического и биологического уровней по данным дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова: градиент температуры, концентрация хлорофилла, мутность воды, вегетационный индекс, поверхностные неоднородности.*

### **Введение**

Возможности изучения динамики горизонтальных неоднородностей поверхностных полей водных систем по температуре, солености, мутности и концентрации хлорофилла целиком зависят от пространственного разрешения спутниковых снимков. Горизонтальные масштабы пространственных неоднородностей распределения физических и биологических компонент поверхностного слоя суши и воды определенным образом связаны с атмосферными потоками тепла и массы. Реакция экосистем на изменение таких потоков имеет определенный инерционный интервал времени.

Пространственно-временные масштабы неоднородностей в воде могут значительно варьировать [1; 2], но структурные изменения в водных системах существенно выше по скорости изменения, чем в экосистемах суши [3], исключая реакцию системы на аномальные и катастрофические факторы воздействия природной среды. Наиболее важными показателями динамики структурной организации экологических систем можно рассматривать пространственные и временные масштабы изменчивости градиентных зон. Такие зоны выявляются при обработке спутниковых данных и расчете горизонтальных градиентов в широтном, меридиональном направлении и по модулю [3]. Устойчивость пространственного распределения градиентных зон (для морей и океанов обозначаются как фронтальные зоны [1; 2; 4]) и динамика границ таких зон определяются при усреднении по времени градиентных показателей в зависимости от периодичности спутниковой съемки и количества качественных снимков с исходной информацией.

Цель работы заключается в изучении условий развития и масштабов градиентных неоднородностей экосистем суши и воды, необходимых для совершенствования мониторинга экологического состояния природных систем. Расчет пространственных градиентов по спутниковым данным позволяет проводить оценку пространственных и временных масштабов формирования зон с высокими значениями градиентов. Возможные факторы воздействия на экосистему и закономерности взаимодействия

биологических и физических компонент необходимо изучать для совершенствования прогностических моделей, в том числе с использованием методов численного моделирования на основе спутниковых данных.

### **Материалы и методы**

В работе используются спутниковые данные, полученные различными сканерами SeaWiFS, CZCS, AVHRR, MODIS, SPOT, LANDSAT, AQUARIUS, которые применяются для расчетов градиентных характеристик в различных районах Мирового океана и озера Шира (Хакасия, Россия). Основное внимание уделяется выявлению закономерностей формирования горизонтальных высокоградиентных зон по физическим и биологическим компонентам поверхностного слоя океана. Для этого используется градиентный метод обработки спутниковых данных [3].

Исходными данными для вычислений градиентных характеристик являются долговременные ряды средненедельных (а также композиты для других пространственно-временных интервалов) спутниковых данных по температуре и солености поверхностного слоя Мирового океана, концентрации хлорофилла, индекса мутности воды (NDTI), вегетационного индекса (NDVI). Для проведения соответствующих расчетов применяется авторское программное обеспечение и программный пакет ENVI 4.7 с разработанными макросами в среде IDL, а также численные модели для моделирования вертикальной и горизонтальной структур водных экосистем с ветровым воздействием, волновыми процессами, скоростью течения, турбулентным перемешиванием и режимом опреснения [5].

### **Результаты**

Биологические и продукционные процессы в водных экосистемах, в частности в океане, значительным образом зависят от гидрофизических и гидродинамических условий. Обработка спутниковых данных и расчет градиентных полей позволяют понять, какие пространственные и временные масштабы процессов в водных системах являются наиболее важными при изменении гидробиологической и гидрофизической структуры. Так, несколько факторов, действующих в один момент времени, могут усиливать или ослаблять циркуляцию в отдельных зонах, а также формировать локальные экосистемы. Причем структурные проявления динамики распределения пространственных неоднородностей могут иметь циклический характер, зависящий от периодичности совместного действия факторов окружающей природной среды. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия структурной организации системы в целом. В механизме эволюции водных систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов, которые часто выступают в качестве генератора, обеспечивающего оптимальную настройку трофических связей внутри экосистемы.

Изображения земной поверхности, полученные методами дистанционного зондирования Земли, позволяют 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.

В нашем случае мы анализируем спутниковые данные, на основании которых рассчитываются горизонтальные градиенты температуры поверхности океана и сравниваются с результатами численного моделирования на основе двумерной численной модели переноса тепла [6]. Вертикальная компонента скорости может

играть значительную роль, и тогда на поверхности могут формироваться неоднородности температуры, которые под действием адвекции могут образовывать полосы градиентов температуры существующие достаточно долгое время. Однако важным обстоятельством является зона, которая может быть зоной конвергенции или зоной дивергенции. Устойчивость зон конвергенции и дивергенции может быть определена по распределению температурных градиентов (пример на рис. 1, а, б).

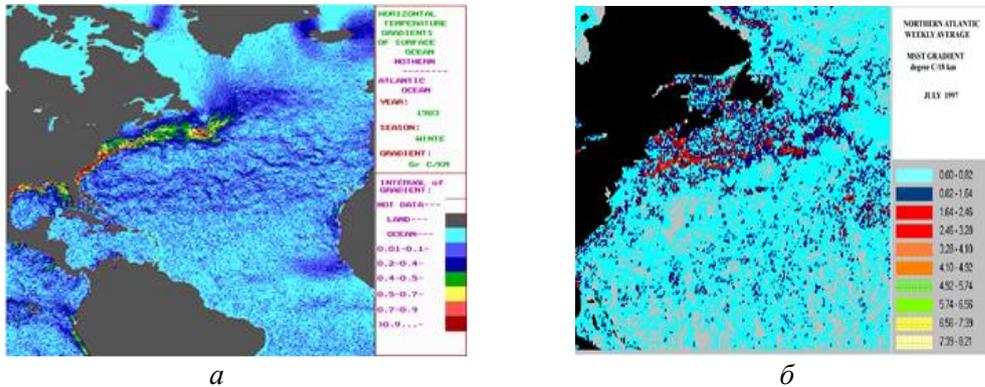


Рис. 1. Градиентное поле температурной фронтальной зоны Гольфстрим (Северная Атлантика): а – градиентное поле по спутниковым данным; б – градиентное поле по модельным данным

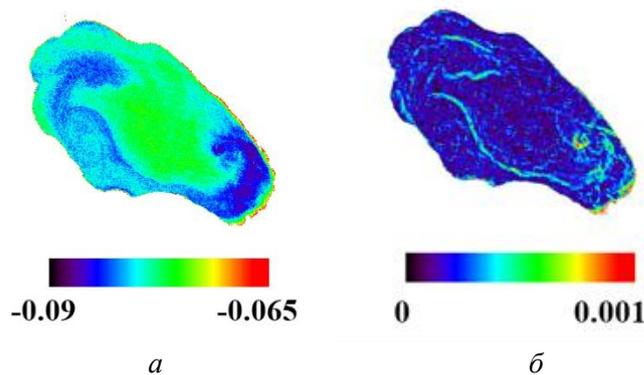


Рис. 2. Распределение поля индекса мутности NDTI озера Шира (Хакасия, Россия) по спутниковым данным для 31/08/2014: а – поле индекса мутности по спутниковым данным; б – градиентное поле индекса мутности

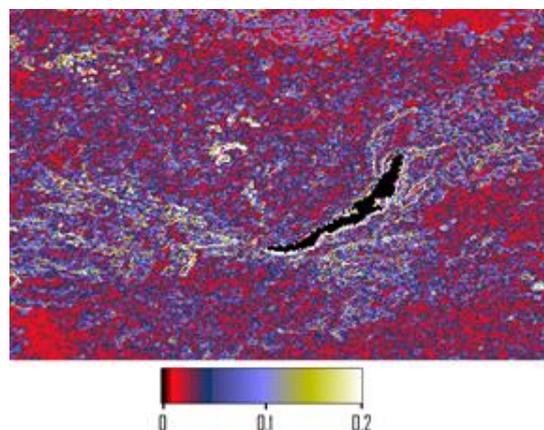


Рис. 3. Градиентное поле среднегодового вегетационного индекса для Байкальского региона по спутниковым данным MODIS

Пространственное распределение поля мутности поверхности озера Шира за разные периоды времени имеют определенные отличия, однако достаточно хорошо фиксируются масштабы неоднородностей и границы перепада количественных показателей характеристик (рис. 2), что в конечном счете помогает изучать динамику поверхностного слоя водной системы в целом.

Для отработки алгоритма расчета градиентов вегетационного индекса поверхности суши в районе озера Байкал в тестовом режиме используется вырезка спутникового изображения для 2006 года. На рис. 3 достаточно хорошо определяются градиентные зоны для выбранного района.

В данной работе на примере численных экспериментов с использованием моделей тепло- и массопереноса в отдельных районах океана и озерах, откалиброванных с учетом результатов натурных измерений и спутниковых данных, рассматривается возможность применения метода расчета градиентных характеристик для анализа и прогноза пространственно-временных интервалов устойчивого распределения градиентных характеристик.

В работе обоснована методологическая концепция объединения подходов к расчету градиентных показателей для изучения динамики границ между экотопами и показателями функционирования водных экосистем и систем суши, динамических характеристик гидрологических образований при оценке пространственно-временных интервалов функционирования неоднородностей биологической и физической природы. В ряде случаев показана согласованность биологических и физических процессов в экосистемах в пределах пространственно-временных границ влияния отдельных процессов, выявляемых градиентным методом обработки спутниковых данных.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант проекта № 13-05-00853 а.).*

#### **Список литературы**

1. Kartushinsky A. V. Time-space structure and variability of surface temperature frontal zones in the Ocean (Based on AVHRR satellite data) // *Advances in Space Research*. 2000. № 25(5). P. 1107–1110.
2. Казьмин А. С. Изменчивость крупномасштабных океанических фронтальных зон: анализ глобальной спутниковой информации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 1. С. 213–218.
3. Картушинский А. В., Кукоба Н. А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // *Вестн. СибГАУ*. 2015. № 3 (16). С. 587–596.
4. Miller A. J., Cornuelle B. D. Forecasts from fits of frontal fluctuations // *Dyn. Atmos. Oceans*. 1999. № 29. P. 305–333.
5. Картушинский А. В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. Т. 7, № 1. С. 112–124.
6. Kartushinsky A. V. The investigation on the dynamics of frontal zones in the ocean based on the numerical modelling, using the AVHRR satellite data // *Advances in Space Research*. 2004. 33 (7). P. 1173–1178.

**А. В. Качаев**

Сибирский федеральный университет, Красноярск; e-mail: avkachaev@gmail.ru

## МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Разработана модель описания структуры дендроклиматических данных в Json формате. Модель данных реализована в документоориентированной системе управления базами данных (СУБД) MongoDB. Комплекс программ, написанных на Java, конвертирует дендроклиматические данные из Международного банка данных древесных колец (ITRDB) в базы данных MongoDB.

*Ключевые слова:* дендроклиматология, системы управления базами данных, Json формат, MongoDB.

Именные данные – одно из ключевых понятий в композиционном программировании [1]. Суть именных данных – это то, что имеет *имя* и *значение*, прослеживается связь с *треугольником Фреге*. Json формат [2] – это представление именных данных в виде коллекции пар ключ/значение и упорядоченный список значений.

MongoDB [3] – это документоориентированная система управления базами данных, использующая в своей работе Json подобные структуры данных. В области дендроклиматологии выделим следующие источники данных: первичные измерения метрических характеристик древесных колец, дендрохронологические индексные хронологии, ежедневные климатические измерения. Перечисленные структуры являются базами данных в MongoDB [4].

Используем расширенную форму Бэкуса – Наура<sup>1</sup> (РФБН) [5] для формального описания Json подобных структур данных предметной области дендроклиматологии. Предварительно опишем Json формат, используя РФБН.

```

<объект>={<ключ> : <значение> [ , <ключ> : <значение> ] }
<массив>=[ <значение> [ , <значение> ] ]
<значение> = "<строка2>" | <Число> | <объект> | <массив> | true | false | null
<Число> = [ + | - ] <НатЧисло> [ <НатЧисло> ] [ ( e | E ) [ + | - ] <НатЧисло> ] .
<НатЧисло> = <Цифра> { <Цифра> } .
<Цифра> = 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9
<ключ> = "<Буква3> [ <Буква> | <Цифра> | _ ]"

```

На основании анализа дендроклиматических данных (ДД) из ITRDB [6] сформулируем следующее утверждение: «Любые ДД можно представить в виде двух совокупностей: неупорядоченную последовательность данных, определяющую *заголовок*, и упорядоченную регулярную последовательность *однотипных* данных, определяющих *вектор*».

Рассмотрим описание данных метрических характеристик древесных колец. К первичным метрическим характеристикам древесного кольца относят следующие измерения: ширина кольца, ширина ранней зоны, поздней зоны древесного кольца, а

<sup>1</sup> Используем в РФБН символы {, }, [, ], | для замены символов {, }, [, ], | которые используются также и в описании Json формата.

<sup>2</sup> Символы UNICODE.

<sup>3</sup> Символы английского алфавита.

также плотность ранней зоны кольца, максимальная и минимальная плотность по кольцу. Таким образом, первичные исходные данные в формате Tucson с одного географического места сбора формируются в до 7 текстовых файлах с расширением **rw1**. Для построения хронологии образцы берутся с 15–30 деревьев [7].

Для примера рассмотрим индексную хронологию в формате Tucson, в которой *заголовок* определяет такие данные как место взятия и вид древесного образца, географические координаты (широта, долгота и высота над уровнем моря), года измерения древесных колец (год рождения и год взятия измерения), список фамилий исследователей и другие данные. *Вектор однотипных* данных определяется упорядоченной последовательностью измеренных ширин древесных колец в миллиметрах.

Далее опишем в общем виде в Json формате первичные измерения о древесных кольцах используя РФБН.

```
<первичные измерения>={<заголовок>,<по типам измерений>}
<заголовок>=<идентификатор места сбора>,<описание места сбора>
<географические координаты>,<код вида древесной породы>,<типы измерения>,<список исследователей>,<другие описания заголовка>1
<географические координаты>="geo":{"long":<долгота>,"lat":<широта>,"elev":
<высота над уровнем моря>}
<код вида древесной породы>="spec":<символьный код>
<типы измерения>="meas":[<тип измерения>,<тип измерения>]
<тип измерения>="wri"|"wea"|"wla"|"dma"|"dmi"|"dea"|"dla"
<по типам измерений>=<измерения по образцу>,<измерения по образцу>
<измерения по образцу>=<тип измерения>:{"nsam":<идентификатор образца>,"years":
[<начальный год>,<конечный год>],"row":[<ряд измерений>]}
<ряд измерений>=<числовое значение>,<числовое значение>
```

Одним из преимуществ хранения данных первичных измерений в формате Json по сравнению с форматом **rw1** Tucson является то, что все типы метрических находятся в одном файле.

Далее опишем Json формат хранения хронологий, файлы которых имеют расширения **crn** в формате Tucson.

```
<хронологии>={<заголовок хронологии>,<ряд хронологий по всем типам>}
<заголовок хронологии>=<идентификатор места сбора>,<описание места сбора>
<географические координаты>,<код вида древесной породы>,<типы хронологий>,<список исследователей>,<другие описания заголовка>
<тип хронологии>="raw"|"std"|"res"|"ars"|"<возможны другие коды>"
<типы хронологий>="tcn":[<тип хронологии>,<тип хронологии>]
<ряд хронологий по всем типам>=<ряд хронологии>,<ряд хронологии>
<ряд хронологии>=<тип хронологии>:{"years": [ <начальный год>,<конечный год> ], "crn": [ <ряд расчетных значений> ] }
<ряд расчетных значений>=<числовое значение>,<числовое значение>
```

В формате Json все расчетные хронологии хранятся также в одном файле.

Климатические ежедневные данные из ITRDB имеют следующие типы измерений: максимальная и минимальная температура, величина осадков, величина снегопада, глубина снега и много других. Содержательно для каждого года, месяца и типа измерения имеется вектор значений. Все измерения по каждой метеостанции хранятся в текстовом файле с расширением **dly**. Предлагаемый формат климатических

---

<sup>1</sup> Не раскрытые термы имеют вид "<ключ>": <символьное или числовое значение по контексту>.

данных в формате Json группирует ежедневные данные в таблицы по типам климата, что удобно для дальнейших вычислений.

<климатические измерения>={<информация о метеостанции>,<измерения по всем типам климата>}

< информация о метеостанции >=<идентификатор метеостанции>,<географические координаты>,<другие описания заголовка>

<типы климата>="tdly":{<тип климата>},<тип климата>}

<тип климата>="tmax" | "tmin" | "prcp" | "snow" | "snwd" | "<другие коды>"

<измерения по всем типам климата>=<измерения по одному типу климата>},< измерения по одному типу климата>}

<измерения по одному типу климата>=<тип климата>: {"years": [ <начальный год>,<конечный год> ], "dly":[<ряд измерений по годам>]}

<ряд измерений по годам>=[<измерения за год>},< измерения за год >}

<измерения за год>=<измерения по дням> | <измерения по месяцам> | <другое>

### Заключение

Разработанная модель дендроклиматических данных в Json формате сокращает объем хранимой информации. С помощью комплекса программ написанных на Java проведена конвертация ДД из ITRDB в формате Tucson в базы данных MongoDB. Исправлены выявленные позиционные ошибки, содержащиеся в ДД из ITRDB при использовании формата Tucson. Сформированные базы данных в MongoDB в значительное мере улучшают манипуляционный аспект работы с дендроклиматическими данными в отличии от обычного хранения их виде набора текстовых файлов в формате Tucson.

Планируются в дальнейшем работы по использованию баз ДД при построении пространственных дендроклиматических моделей с визуализацией результатов в открытой геоинформационной системе QuantumGis.

### Список литературы

1. Редько В. Н. Композиции программ и композиционное программирование // Программирование. 1978. № 5. С. 3–24.
2. Введение в JSON. URL: <http://www.json.org/json-ru.html>.
3. Кайл Бэнкер. MongoDB в действии / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2012. 394 с.
4. Качаев А. В. NOSQL подход для разработки дендроклиматического банка данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. 2016. С. 89–91.
5. Расширенная форма Бэкуса – Наура. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Расширенная\\_форма\\_Бэкуса—Наура](https://ru.wikipedia.org/wiki/Расширенная_форма_Бэкуса—Наура).
6. The International Tree-Ring Data Bank. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>.
7. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособие / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов, В. Б. Круглов, В. С. Мазепа, М. М. Наурзбаев, Р. М. Хантемиров. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

**А. В. Ковалёв, О. С. Токарева**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», Томск  
e-mail: avkovaleov@gmail.com, ostokareva@gmail.com

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ**

Представлены результаты работ по реализации получения прогнозных карт на основе разновременных снимков с использованием вероятностных и пространственных характеристик каждого из типов земной поверхности на изображении при формировании клеточных автоматов.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, клеточные автоматы, геоинформационная система, моделирование.*

### **Введение**

В последние два десятилетия в связи с развитием технологий космосъемки особенно распространенным является использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Эти данные широко используются для исследования растительности из-за таких преимуществ, как частая повторяемость, глобальный охват данных и более низкая стоимость (в сравнении с полевыми или другими видами исследований) [1]. Существенная пространственная неоднородность исследуемых природных комплексов, их динамичность и большая площадь вызывают необходимость использования гибких методов, подходящих для моделирования сложных пространственных зависимостей, являющихся важной характеристикой многих типов земной поверхности. В настоящее время одним из наиболее интересных способов для учета пространственной корреляции является использование клеточных автоматов (КА). КА являются математической идеализацией физических систем, в которой конструкция делится на решетки клеток, состояния которых обновляются синхронно в дискретном времени по некоторым местным правилам. Можно легко заметить, что существует множество процессов оптимизации в природе. Характерная особенность КА, которой является моделирование сложных систем с помощью простого набора локальных правил, привлекла исследователей из различных дисциплин, таких как физика, биология, общественные науки, транспорт, логистика [2].

Изменения растительности в результате сочетания природных процессов (например, естественного роста растительности, пожаров, воздействия насекомых и циклов болезней, климатических изменений) и антропогенных процессов (например, вырубки древесины, выпаса скота, строительства дорог) со временем приводят к изменению состояния территорий. Прогноз данных изменений требует использования сложных методов моделирования, разработки систем моделирования, которые могут быть легко модифицированы для прогнозирования состояния различных ландшафтов [3].

### **Актуальность работы**

Антропогенная деятельность, как правило, ведет к появлению серьезных локальных и глобальных экологических изменений, которые необходимо

анализировать и оценивать, а также прогнозировать их развитие с целью комплексного исследования изучаемой территории и повышения эффективности использования природных ресурсов. Область применения данного проекта очень широка: он может использоваться как для личных целей заинтересованных людей, так и различными природоохранными организациями. Разработанный программный комплекс позволяет проводить мониторинг Земли с целью выявления территорий с высокой пожароопасной обстановкой, направления распространения пожара, оценки антропогенного воздействия рассматриваемых областей, их деградации или развития, а также с целью предвидеть паводки и их масштабы. Информация о возможности возникновения перечисленных выше чрезвычайных ситуаций природного характера дает время для подготовки к их ликвидации и минимизации вероятностей их возникновения.

### **Разработка программного обеспечения**

Для разработки программного обеспечения был выбран язык программирования C#, API Windows Forms и библиотека GDAL, которая используется для чтения и записи растровых геопространственных форматов данных.

В качестве используемых растровых данных были выбраны снимки с форматом *img* (формат данных *Erdas*), так как данный формат хранит информацию не только о значениях пикселей изображения, а также о таблице цветов и пространственной привязке и проекции.

Также важной задачей было определение количества классов для классификации изображения. Было принято решение разбить изображение на 4 класса, так как в большинстве случаев этого вполне достаточно для определения основных составляющих исследуемой области (например, густая растительность, разреженная растительность, гарь, водные объекты).

На первом этапе необходимо было определить основные параметры моделирования. Сначала необходимо рассчитать матрицу фактических переходов, которая содержит информацию о количестве фактически перешедших элементов одного типа земной поверхности в другой на след временной интервал.

Формирование стохастической матрицы происходит с использованием выражения

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^m n_{ij}}, \quad \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m,$$

где  $n_{ij}$  – число элементов, перешедших из состояния  $Q_i$  в состояние  $Q_j$ ;  $m$  – количество возможных сочетаний (классов). Полученная стохастическая матрица отвечает за вероятностную составляющую изменений земной поверхности. За количественные изменения, происходящие на земной поверхности, отвечает матрица ожидаемых территорий, или матрица ожидаемых переходов, которая вычисляется как произведение матрицы фактически переходов на стохастическую матрицу:

$$M_{ожид} = M_{факт} \times M_{стох}.$$

Важным компонентом моделирования изменений земной поверхности является порядок преобразования элементов на моделируемом изображении. Такой порядок задается в виде матрицы ранжирования, которая позволяет преобразовать в первую очередь элементы изображения с наибольшей вероятностью перехода в тот или иной класс. В результате работы алгоритма получения матрицы ранжирования мы получаем очередность преобразования для каждого пикселя изображения в виде порядкового номера (чем больше вероятность перехода текущего пикселя, тем больше порядковый номер) [4]. Затем для каждого элемента изображения в predetermined выше порядке формируется квадратная окрестность заданного размера (в нашем случае  $5 \times 5$ ).

Каждая такая окрестность будет представлять собой отдельный КА. Далее по predetermined правилам функционирования КА формируется каждый элемент моделируемого изображения. Это выполняется до тех пор, пока все элементы согласно матрице ожидаемых переходов не перейдут в элементы соответствующих типов.

Вероятность перехода типа  $I$  земной поверхности в тип  $j$  зависит не только от общей вероятности  $p_{ij}$ , но и от количества элементов типа  $j$  в этой окрестности.

$$p_{ij}^{exp} = n_j \cdot p_{ij} \quad j = 1, \dots, m,$$

где  $m$  – количество типов земной поверхности в анализируемой окрестности, а  $n_{ij}$  – количество элементов типа  $j$  в анализируемой окрестности.

Для расчета пространственных характеристик использовался локальный и средний критерий насыщенности, значение которого определяется как отношение частоты встречаемости конкретного типа в окрестности к встречаемости этого типа в целом на изображении:

$$F_{i,k,d} = \frac{n_{k,d,i} / n_{d,i}}{N_k / N},$$

где  $n_{k,d,i}$  – число элементов рассматриваемого типа в окрестности;  $n_{d,i}$  – число всех элементов в окрестности;  $N_k$  – число элементов рассматриваемого типа на всем изображении;  $N$  – число всех элементов изображения.

Метод расчета усредненных характеристик критерия насыщенности для каждого типа земной поверхности:

$$\bar{F}_{i,k,d} = \log \left( \frac{1}{N_l} \sum_{i \in L} F_{i,k,d} \right),$$

где  $L$  – множество элементов типа  $L$  на изображении, а  $N_l$  – их количество.

После чего вероятность  $p_{ij}^{np}$  определяется как  $p_{ij}^{np} = 1 - |\bar{F}_{i,k,d} - F_{i,k,d}|$  для каждого класса в рассматриваемом элементе изображения. Результирующая вероятность рассчитывается как сумма пространственной и вероятностной составляющей. Результатом этого этапа является прогнозная карта развития процессов и явлений на земной поверхности для следующего момента времени.

Интерфейс разработанной программы представлен на рис. 1.

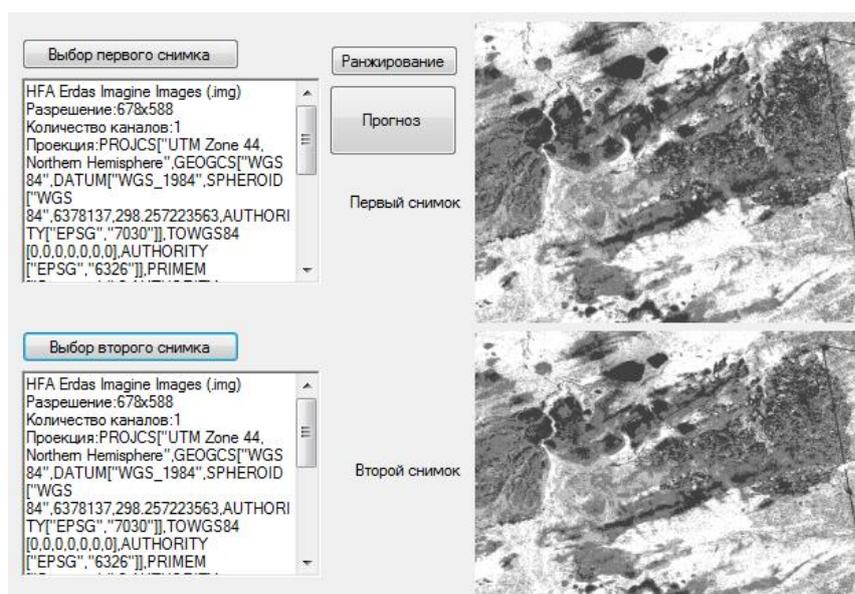


Рис. 1. Интерфейс программы

Разработанная программа позволяет загружать космические снимки формата IMG, отображает краткую информацию об этих снимках (формат, разрешение, количество каналов и проекция), отображать загруженные снимки, выполнять ранжирование значений пикселей изображения и прогноз на следующий временной интервал.

### Результаты

Среди имеющегося набора данных наиболее подходящими снимками стали снимки Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м, с подсчитанными значениями нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) за 2007, 2009 годы (рис. 1). Разбиение изображений на классы выполнялось в среде Erdas с помощью инструмента неконтролируемой классификации. В результате выполнения моделирования в разработанной программе была получена прогнозная карта на 2011 год в виде растрового набора данных формата IMG (рис. 2, а). Фрагмент «эталонного» изображения на рис. 2, б.

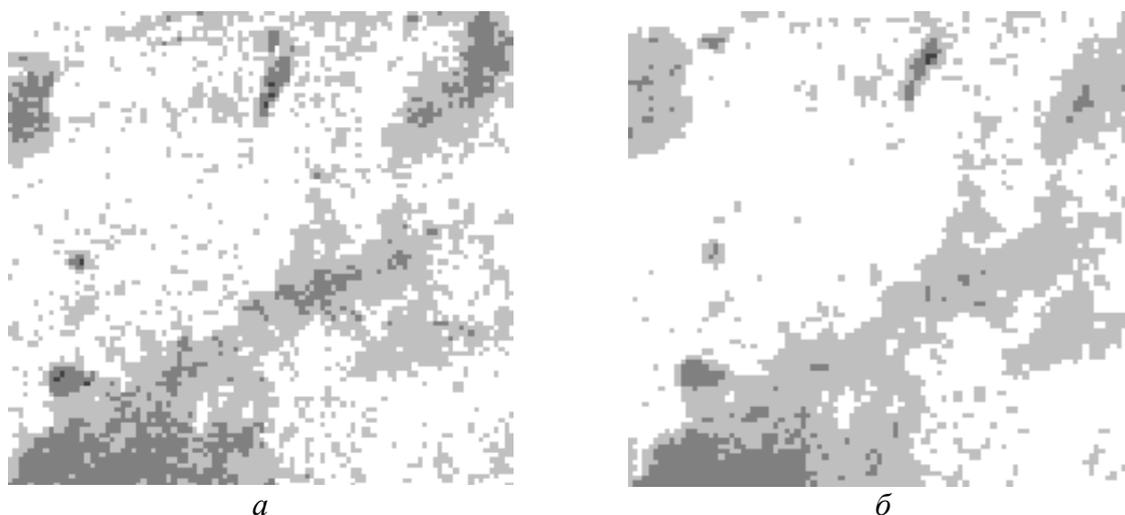


Рис. 2. Фрагменты эталонного изображения за 2011 год (а), смоделированного за 2011 год (б)

В 2009 году произошло увеличение светлых пикселей (в сравнении с 2007), что говорит об увеличении значений NDVI (развитие растительного покрова). По эталонному изображению за 2011 год можно сказать, что эта тенденция сохранилась. Общее количество светлых пикселей на смоделированном изображении также стало больше. Элементы изображения преобразовывались не просто по общей вероятности для всего изображения, а в зависимости от локальных характеристик (окружения) данных пикселей. Для более точного прогнозирования необходим учет ряда других характеристик (направление ветра, рельеф и т. д.) в виде добавления дополнительных вероятностей. Сбор таких характеристик является довольно сложной задачей, однако при наличии подобной информации модифицировать используемый метод не составит труда.

### Список литературы

1. Langley S. K., Cheshire H. M., Humes K. S. A comparison of single date and ultitemporal satellite image classification in a semi-arid grassland // Journal of Arid Environment. 49. 401–411.
2. Bochenek B., Tajs-Zielinska K. Topology optimization with efficient rules of cellular automata // Engineering Computations. 30(8): 1086–1106. 2013.
3. Barnett T. M. Models of Vegetative Change for Landscape Planning: A Comparison of FETM, LANDSUM, SIMPPLLE, and VDDT.Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-76-WWW. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 14 p.
4. Марков Н. Г., Замятин А. В. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. М.: Физматлит, 2007.

**А. А. Косторная, М. Г. Захватов, Е. Ю. Сахарова, Ф. В. Пяткин**

Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», Новосибирск  
e-mail: kostornaya@rcpod.ru

## **МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

В статье рассмотрены методики автоматического дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным, позволяющие предоставлять потребителям тематические продукты, отражающие качественные и количественные параметры облачности (карты классификации облачности, высоты и температуры верхней границы облака (ВГО)).

*Ключевые слова:* дешифрирование облачного покрова, классификация облачности, параметры ВГО.

**Введение.** Облака играют одну из главных ролей в формировании погодных условий на Земле. Характер облачного покрова напрямую определяется устойчивостью/неустойчивостью атмосферы, стадиями развития циклонической деятельности, расположением струйных течений и т. д. Использование изображений облачности с метеорологических спутников в оперативно-прогностической работе метеослужб предоставляет ряд преимуществ – пространственная непрерывность, синхронность и однородность информации.

Однако для практического использования данных спутниковых наблюдений необходимо уметь корректно идентифицировать и классифицировать облачность на исходных ИК снимках. Не исключены ошибки визуальной интерпретации снимка из-за неверного восприятия изображения. Закономерный шаг в развитии спутниковой метеорологии – автоматизация процесса дешифрирования космических снимков облачности. Современные исследования и разработки в области динамики и физики атмосферы (в том числе микрофизики облаков и осадков) и развитие космической техники способствуют созданию современных научных алгоритмов, позволяющих с хорошей достоверностью и без участия оператора детектировать облачность и оценивать ее параметры.

Авторами была проведена научно-исследовательская работа по созданию методики автоматического дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным. Разработанная методика позволяет предоставлять специалистам тематические продукты высокой информативности, отражающие качественные и количественные параметры облачности: карты классификации облачности, высоты и температуры верхней границы облака (ВГО).

В качестве предикторов используются измеренные спутниковым радиометром спектральные характеристики объектов и большой объем дополнительных данных: прогностические данные Национального центра по прогнозированию окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction (NCEP)), битовые маски водоемов, пустынь и т. п.

Главным алгоритмическим ядром методики является комплекс научных алгоритмов AWG (NOAA Algorithm Working Group), реализованных в программном комплексе (ПК) CLAVR-х [1]. Алгоритмы разработаны CIMSS/UW – Кооперативным

институтом спутниковых метеорологических исследований при университете Висконсина-Мэдисона, США (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies / University of Wisconsin-Madison, USA) и являются довольно гибкими в усвоении спутниковой информации – позволяют использовать данные радиометров с различных космических аппаратов без значительного изменения программного обеспечения. Результатом дешифрирования облачных структур являются тематические продукты в виде цифровых массивов данных в формате HDF5. Авторами была проведена адаптация алгоритмов AWG под климатические особенности бореальной зоны с учетом исследований, проведенных в [2].

В качестве исходных спутниковых данных используются данные радиометра AVHRR (Level-1b) КА NOAA-19, NOAA-18, NOAA-15 и MetOp-B. Процесс дешифрирования многоэтапный – при поступлении спутниковой информации в программный комплекс происходит последовательный запуск подпрограмм (алгоритмов), которые выполняют классификацию и восстановление количественных характеристик облачности:

- первый этап: обнаружение облачности, построение маски облачности;
- второй этап: определение типа облачности и ее фазового состояния;
- третий этап: определение характеристик верхней границы: высоты (км) и температуры (°C);
- четвертый этап: определение оптических и микрофизических свойств облака: оптической толщины облака и эффективного радиуса частиц (мкм);
- пятый этап: подробная морфологическая классификация облачности с помощью порогового метода, который в качестве входных параметров использует выходные данные предыдущих этапов выполнения методики [1; 2].

С целью определения степени достоверности конечных продуктов методики были проведены разнохарактерные оценки качества ее результатов. Первичная оценка качества рассчитанных параметров проводилась на основе данных наземной наблюдательной сети с помощью приземных и кольцевых карт погоды за ближайшие сроки. При сопоставлении с данными метеонаблюдений продукты методики показали высокую достоверность: на картах прослеживаются основные барические образования, облачность наиболее мощных форм, обнаруженная методикой, наблюдается вдоль линий фронтов, типы облачности в большинстве случаев совпадают с заявленными на станциях, кучево-дождевым формам соответствуют области осадков и пр.

Сопоставление с данными доплеровского метеолокатора проводилось Западно-Сибирским филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» с 1 июня 2015 года по 11 мая 2016 года. Испытание проводилось путем сравнения параметров облачности над территорией обзора Барабинского ДМРЛ с картами классификации облачности и высоты верхней границы (рисунком, б, в), полученных на основе информации со спутников NOAA-19, NOAA-18 и MetOp-B в сроки, наиболее близкие по времени пролета спутника над территорией наблюдения. Оценка оправдываемости методики проводилась для каждого проанализированного срока (совпадение/расхождение). Учитывая особенности и ограничения радиолокационного метода, специалистами привлекалась вспомогательная информация: синоптические, кольцевые карты, карты нефанализа и бортовая погода. Кроме того, при сравнении величин учитывалось, что границы массивов облачности на картах могут отличаться от данных ДМРЛ по причине различного пространственного разрешения выходной продукции.

В период испытания сравнению подверглись данные за 211 дней. Было произведено 546 сравнений данных по высоте ВГО и 384 сравнения классификации облачности. Ясные безоблачные дни анализу не подвергались. За весь анализируемый период количество сроков с соответствием всех испытуемых продуктов методики (карт классификации и высоты ВГО) данным ДМРЛ составляет 83,1 % от числа сроков

с полным сравнением. Количество сроков с полным расхождением в данных – 1,3 %. Были рассчитаны средние значения достоверности каждого продукта в отдельности, независимо друг от друга – для типов облачности она составила 96,9 % случаев, 80,2 % – для значений высоты ВГО.

В течение года достоверность типизации облачности не опускается ниже 88 % даже в зимние месяцы (рисунок, таблица), а в переходные сезоны составляет 100 % (сентябрь-октябрь, февраль-май). Точность расчета значений высоты ВГО находится в прямой зависимости от температуры воздуха у подстилающей поверхности – в среднем при понижении температуры воздуха и установлении снежного покрова, затрудняющего обнаружение облачности, на 6 % уменьшается точность определения типов облачности и на 19 % точность определения параметров ВГО (таблица).

В рамках сравнения с данными ДМРЛ определена повторяемость «ложного» детектирования облачности из-за высокого альbedo снежного покрова и низких значений температур подстилающей поверхности – 1,6 % случаев в рамках испытаний. Установлены синоптические условия, при которых отмечается «ложное» детектирование облачности [2].

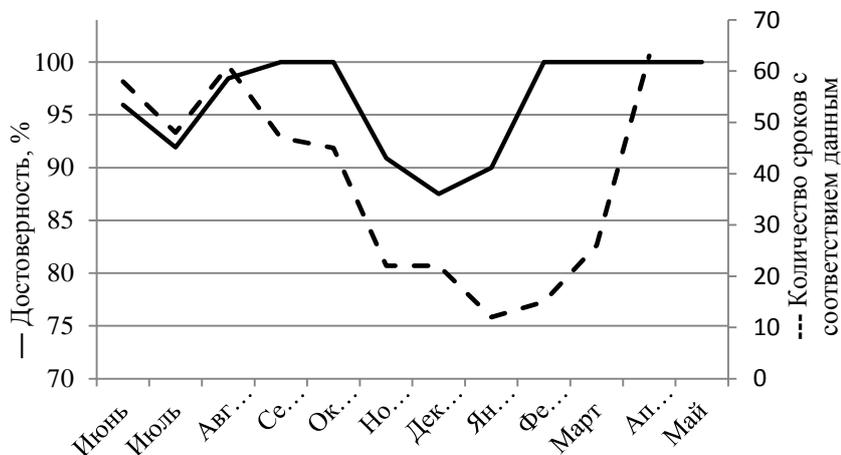
Таблица

**Общие результаты оценки качества продуктов методики при сопоставлении с данными доплеровского метеолокатора по месяцам, %**

Месяц	Общая достоверность методики по высоте ВГО	Общая достоверность методики по типизации облачности	Единовременное соответствие анализируемых данных методики (высоты ВГО и типизации облачности) с данными ДМРЛ	Единовременное расхождение анализируемых данных методики (высоты ВГО и типизации облачности) с данными ДМРЛ
Июнь	78	96	76	1
Июль	77	92	71	2
Август	94	98	92	0
Сентябрь	82	100	93	0
Октябрь	75	100	83	0
Ноябрь	65	91	64	9
Декабрь	79	88	88	13
Январь	48	90	50	10
Февраль	68	100	83	0
Март	90	100	100	0
Апрель	97	100	98	0
Май	76	100	80	0

На основе продуктов КА CALIPSO была проведена оценка точности расчета методикой параметров ВГО (высоты и температуры). Лидар CALIOP КА CALIPSO позволяет получать вертикальные профили рассеяния излучения от облачности и количественные параметры обнаруженных облачных и аэрозольных слоев. Сравнение с данными лидара CALIOP по оценке точности восстановления параметров ВГО были проведены в дни тандемной съемки территории России спутников CALIPSO и NOAA-19 в 2014 году. Для этого использовались данные лидара в форматах level 1 и level-2 и данные радиометра AVHRR КА NOAA-19 в формате Level-1b. При сравнении продукты методики показали способность к обнаружению как нескольких слоев облачности, так и отдельных единичных облачных образований. Наибольшая точность расчета параметров ВГО прослеживается у слоистообразной и кучевообразной

облачности, наименьшая – у перистых типов. В целом по сезонам максимальное качество восстановленных параметров ВГО отмечается в теплый период года – с апреля по сентябрь, с расхождением высоты не более 1,5 км, а температуры не более 5–10 °К, что согласуется с результатами испытания на основе доплеровского метеолокатора.



**Рисунок. Оправдываемость классификации облачности (сплошная линия) и количество сроков со значениями высоты ВГО, соответствующими значениям ДМРЛ Барабинск (пунктирная линия), в период с 1 июня 2015 года по 11 мая 2016 года**

### Заключение

В ходе проведенных испытаний методика распознавания облачности и расчета ее характеристик зарекомендовала себя как эффективная технология, позволяющая классифицировать облачность по спутниковым данным в автоматическом режиме, без участия оператора. Тематические продукты методики показали высокую достоверность в проведенных разнохарактерных оценках качества. Большим преимуществом также является возможность проведения анализа облачного покрова над большей частью территории России независимо от времени года и суток. Использование методики актуально в оперативной работе метеообеспечения – высокая скорость обработки исходных спутниковых данных позволяет получать дешифрованную информацию об облачности в автоматическом режиме через 15 минут после ее приема с КА. Кроме того, методика позволяет своевременно обнаруживать развитие грозовой облачности и оценивать степени ее опасности для различных областей и структур.

Тематические продукты методики – карты классификации облачности, высоты и температуры ВГО – могут использоваться как дополнение данных синоптических и радиолокационных наблюдений в региональных и мезомасштабных схемах численного анализа и прогноза погоды, а также для целей краткосрочного прогноза состояния облачного покрова в метеорологических службах и аэропортах. Важной областью применения являются и климатические исследования облачного покрова и осадков. Количественные характеристики классифицированной облачности необходимы для проведения научных исследований в целях изучения особенностей процессов, происходящих в атмосфере и формирующих погодные условия в рассматриваемом регионе и/или в пункте.

### Список литературы

1. Heidenger A. The clouds from AVHRR Extended User's Guide. Version 5.4.1. – NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research (STAR), 2014. 60 p.
2. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Оценки параметров облачного покрова по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA регионального покрытия в светлое время суток в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 65–73.

**Л. С. Миков**

ИВТ СО РАН, Кемерово; e-mail: mikov@ict.sbras.ru

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В работе рассматриваются вопросы обработки спутниковых радарных изображений методами радарной интерферометрии. Описываются этапы обработки и промежуточные результаты вычислений, такие как расчет интерферограммы, фильтрация, развертка фазы.

*Ключевые слова:* радарная интерферометрия, метод устойчивых отражателей, метод малых базовых линий, радарные данные.

В настоящее время для оценки деформаций земной поверхности на больших площадях (несколько сотен квадратных километров) активно используются спутниковые радарные данные. Обработка таких данных осуществляется, как правило, методами радарной интерферометрии. Выделим три основных метода:

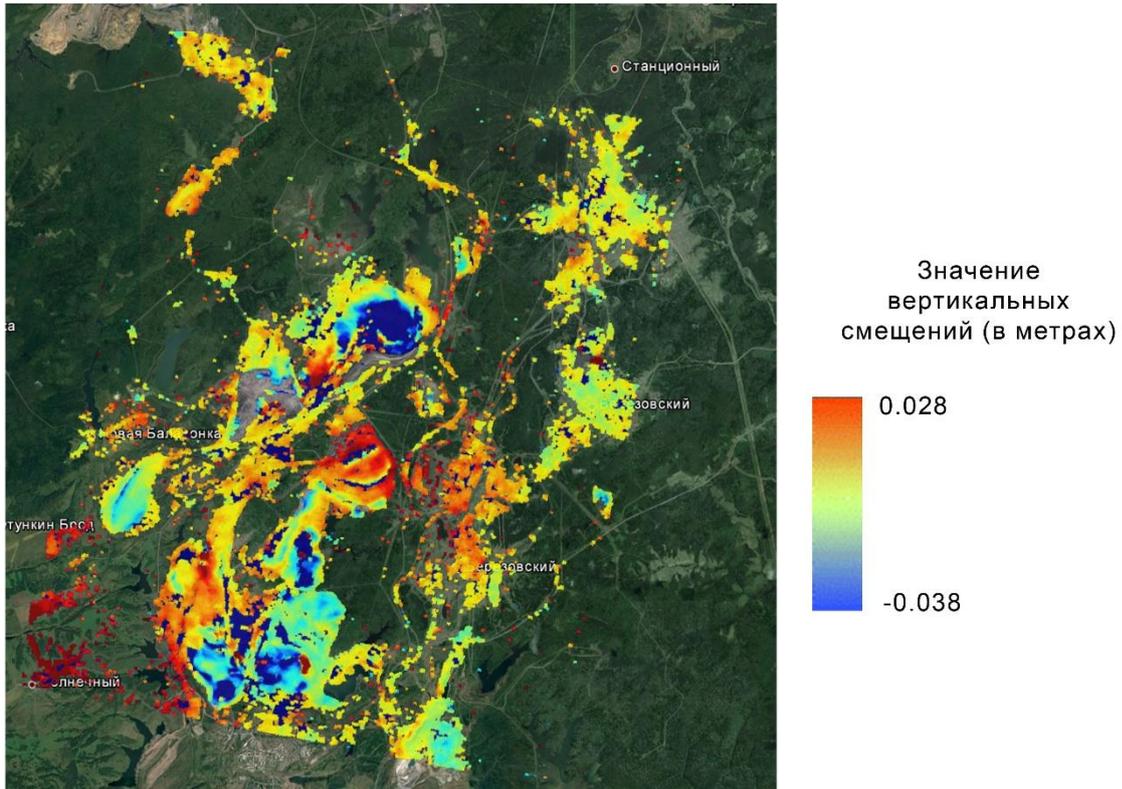
- метод дифференциальной интерферометрии (DinSAR);
- метод малых базовых линий (SBaS);
- метод устойчивых отражателей (PS).

Основное отличие методов – количество исходных данных для обработки. Например, для метода дифференциальной интерферометрии используется пара радарных изображений, снятых с небольшим временным промежутком (от нескольких дней, до пары недель). В результате мы получаем карту смещений земной поверхности, которые произошли за период между съемками (рис. 1). Метод SBaS требует не менее трех изображений, а метод PS – не менее тридцати. Два последних метода позволяют оценить динамику изменений земной поверхности за длительный период времени (от нескольких месяцев до нескольких лет). Рассмотрим все эти методы подробнее.

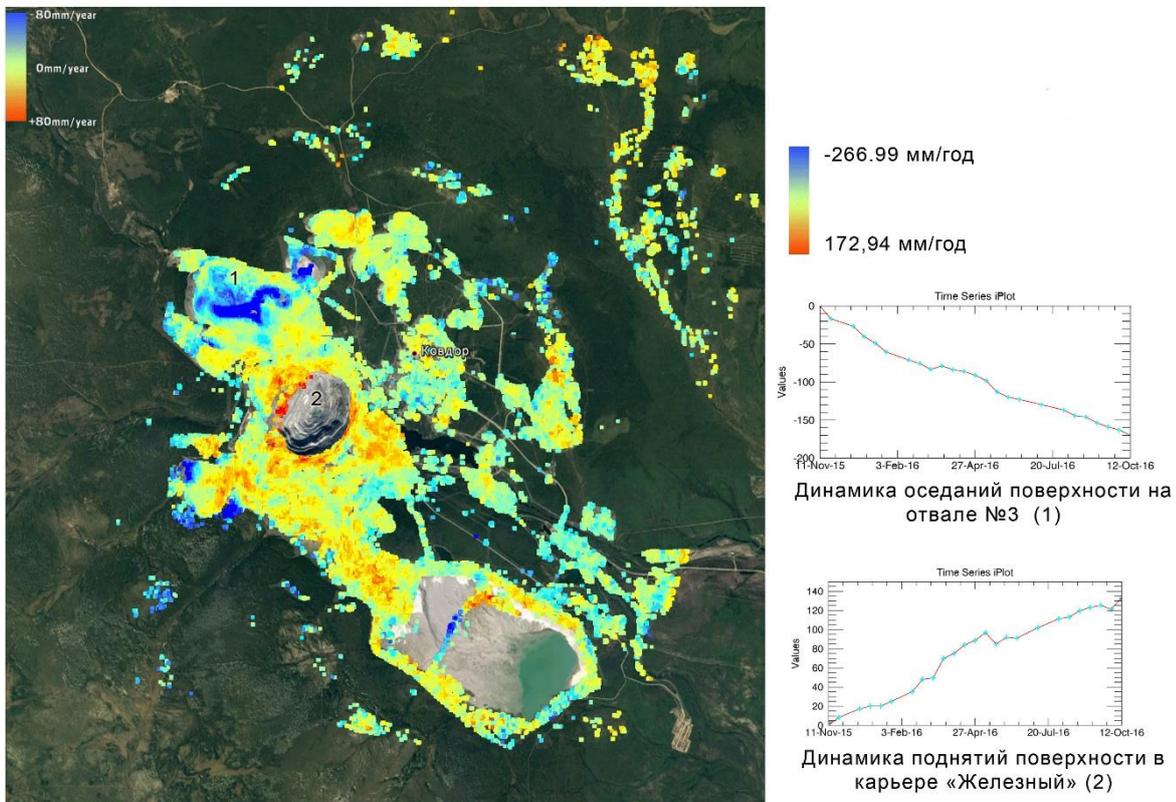
Дифференциальная интерферометрия – классический попарный метод расчета площадных смещений. Включает в себя следующие этапы: формирование интерферограммы, фильтрация и расчет когерентности, развертка фазы, коррекция и уточнение орбит, пересчет фазы в смещения. На выходе мы получаем карту смещений земной поверхности (рис. 1) [1].

Метод SBaS (Small Baseline Subset) – расчет точных площадных смещений при помощи серии космических снимков с небольшими базовыми линиями. Включает в себя следующие этапы: формирование интерферограммы с последующей фильтрацией и разверткой, коррекция орбитальных ошибок, первая инверсия, вторая инверсия (атмосферная коррекция) и орторектификация, геокодирование результатов обработки. На выходе получаем точечный векторный файл, представляющий собой карту средних скоростей изменения смещений земной поверхности (рис. 2) [2; 3].

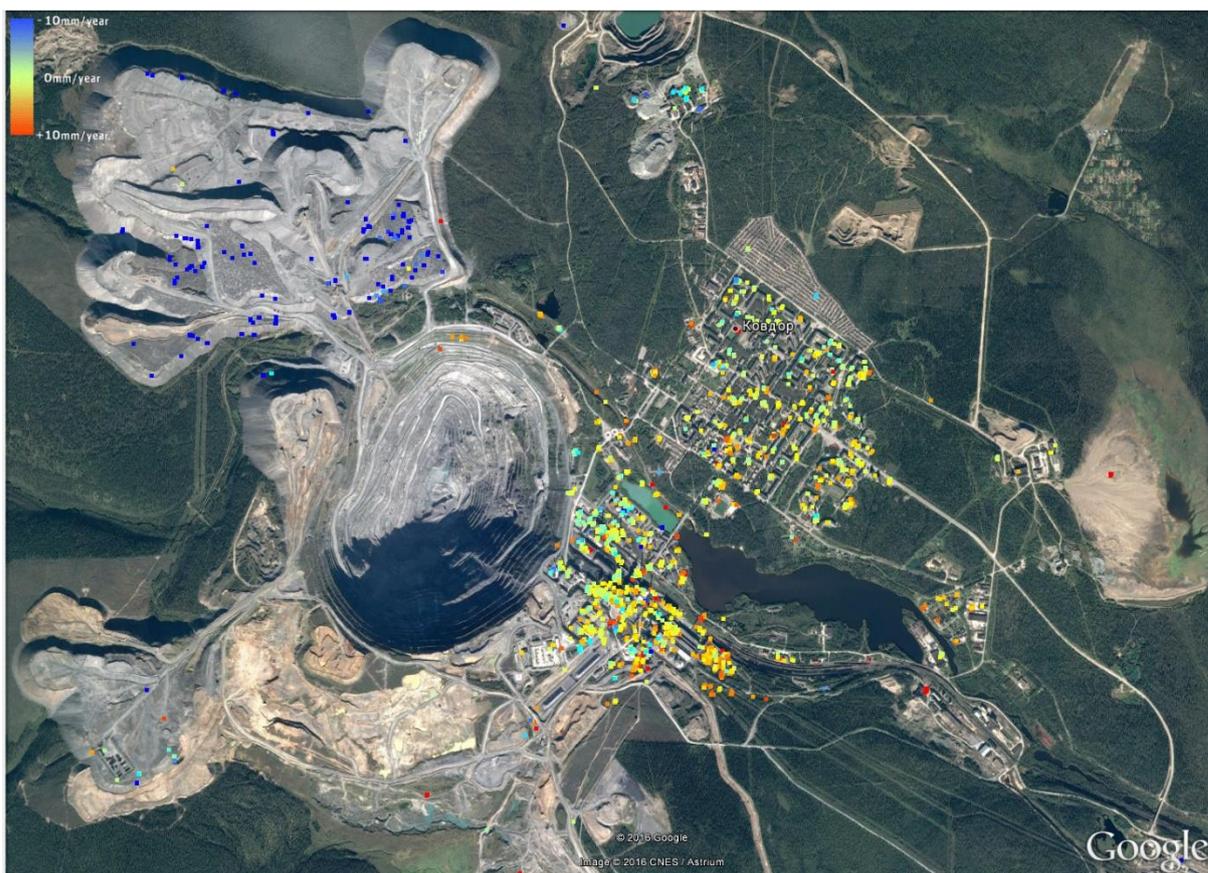
Метод PS (Persistent Scatterers) – расчет смещений точечных целей, являющихся постоянными отражателями для радиолокационного спутника. Позволяет измерить детальные смещения на объектах инфраструктуры. Применяется, как правило, для территорий с городской местностью. Включает в себя такие же этапы как метод SBaS. На выходе так же получаем карту средних скоростей изменения смещений поверхности (рис. 3).



**Рис. 1. Карта вертикальных смещений земной поверхности (по данным Sentinel-1A) за период 23.09.2015 – 05.10.2015. Кедровский угольный разрез**



**Рис. 2. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (по данным Sentinel-1A), ноябрь 2015 – октябрь 2016**



**Рис. 3. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (по данным Sentinel-1A), ноябрь 2015 – декабрь 2016. Ковдорское железорудное месторождение**

Все рассмотренные методы позволяют проводить оценку смещений земной поверхности с достаточно высокой точностью. Так, для метода DinSAR погрешность составляет 3–5 мм, для методов SBaS и PS – 1–3 мм, поэтому использование радарных данных для оценки смещений на больших площадях является перспективным направлением. В дальнейшем полученные результаты обработки могут стать основой для организации природоохранных мероприятий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-45-420277 p\_a).*

#### **Список литературы**

1. Synthetic aperture radar interferometry / P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, R. M. Goldstein // Proc IEEE 88(3). 2000. С. 333–382.
2. Кантемиров Ю. И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии ее многопроходных вариаций PS и SBaS // Геоматика. 2012. № 1. С. 22–26.
3. Soergel U. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Hannover: Springer, 2012. 277 с.

**М. Ф. Носков<sup>(1)</sup>, В. А. Хрусталеv<sup>(2)</sup>, М. Г. Рубанович<sup>(2)</sup>,  
А. С. Митьков<sup>(2)</sup>, А. А. Столяренко<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Саяно-Шушенский филиал СФУ, Саяногорск; e-mail: Eggl@rambler.ru

<sup>(2)</sup>НГТУ, Новосибирск; e-mail: xrustalev@corp.nstu.ru, mihail-nstu@mail.ru,  
am@alfa-instr.ru, 34\_inches@inbox.ru

## **ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ АНАЛИЗА ЧЕРНО-БЕЛЫХ АЭРОФОТОСНИМКОВ МЕТОДОМ ЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ**

Проблема повышения чувствительности распознавания низкоконтрастных элементов на аэрофотоснимках до сих пор является актуальной. Даже в настоящее время множество аэрофотоснимков первоначально выполняются черно-белыми, а затем при помощи тех или иных методов представляются в псевдоцветном варианте. Это связано в первую очередь со способностью человеческого глаза выделять до десятка ступенек на черно-белых снимках и до сотни – на цветных или псевдоцветных снимках.

*Ключевые слова:* черно-белый аэрофотоснимок, псевдоцветовое кодирование, дополнительный цвет, цветовая чувствительность глаза.

### **Введение**

Проблема повышения чувствительности распознавания низкоконтрастных элементов на аэрофотоснимках до сих пор является актуальной. Даже в настоящее время множество аэрофотоснимков первоначально выполняются черно-белыми, а затем при помощи тех или иных методов представляются в псевдоцветном варианте. Это связано в первую очередь со способностью человеческого глаза выделять до десятка ступенек на черно-белых снимках и до сотни на цветных или псевдоцветных снимках. Наличие перечисленных факторов вызвало многообразие подходов к решению проблемы более достоверного анализа черно белых изображений изображений: метод виртуальной голографической интерферометрии, метод электронного псевдоцветового кодирования, например, при помощи программы Femtoscan и т. п. Тем не менее проблема и до настоящего времени не является полностью решенной.

### **Теоретическое обоснование**

В данной работе кратко описан способ псевдоцветового кодирования аэрофотоснимков, основанный на последовательном применении двух методов – получении инвертированной черно-белой рентгенограммы и оптического синтеза на ее основе псевдоцветовой при помощи смещения двух дополнительных цветов. Наилучший эффект дает применение красного и синего цветов. Полученный в результате аэрофотоснимок содержит, кроме названных, еще и зеленый как результат смещения. Сам указанный принцип был предложен авторами [1–3] для анализа интерференционных картин и микроТВЭЛов. Принцип действия первоначально был опробован на фотослоях и состоял в следующем. Микрокристаллы галоидного серебра и поглощают, и рассеивают падающий на них свет, причем изображение в рассеянном свете является дополнительным к изображению в свете проходящем, а именно: черные и белые участки изображения меняются местами. Если теперь осветить анализируемую рентгенограмму этими двумя дополнительными цветами под двумя углами к нормали и

произвести наблюдение при помощи любого оптического прибора с небольшим передним апертурным углом, причем так, чтобы один из углов освещения был большим переднего апертурного угла, а другой – меньше, то мы и получим псевдоцветовое изображение. Такой способ применяется и сейчас при анализе рентгеновских снимков микроТВЭлов и других резкоконтрастных изображений. У фотопленок возможность инвертирования изображения связана с конечными размерами зерен галоидного серебра. Эффективное рассеяние на микрокристаллах наблюдается только тогда, когда размер кристалла в два-три раза превышает длину волны излучения анализатора, то есть примерно 1,0–1,5 мкм. Фотоматериалы с другим размером зерен не подходят. Разумеется, условиями проявления, то есть типом проявителя, температурой, временем проявления, можно выращивать кристаллы нужного размера.

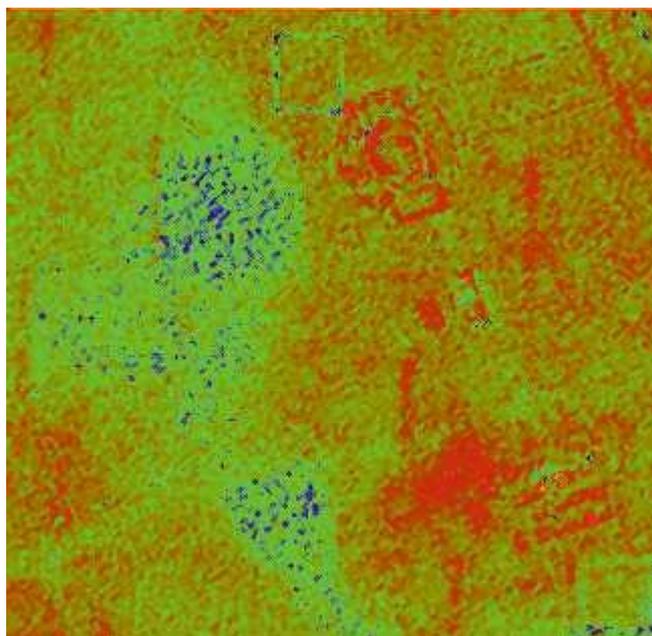
Очевидным недостатком фотослоев является невозможность работы в реальном масштабе времени. В настоящее время авторы используют как промежуточный носитель информации жидкокристаллический дисплей. Разумеется, размер элемента дисплея значительно превышает длину волны видимого света. Но на ЖК дисплеях проявляется следующий эффект – если размер пикселя изображения примерно равен размеру элемента экрана, то также наблюдается инвертирование изображения при изменении углов наблюдения. При этом оператор уравнивает два упомянутых размера при помощи масштабирования самого изображения.

#### **Экспериментальные исследования**

Сам эксперимент был реализован следующим образом. Исходный черно-белый аэрофотоснимок, представленный на рис. 1, наблюдался и фиксировался цифровым фотоаппаратом под углами плюс и минус 30 градусов сквозь синий светофильтр марки СЗС-22 и, соответственно, сквозь красный светофильтр марки КС-13. Затем полученные дополнительные изображения совмещались и в итоге получено псевдоцветовое изображение, представленное на рис. 2.



**Рис. 1. Исходный черно-белый аэрофотоснимок**



**Рис. 2. Исходный аэрофотоснимок, представленный в псевдоцветах**

### **Заключение**

В заключение данной работы авторы хотят отметить, что предлагаемый ими способ псевдоцветового кодирования изображений не противопоставляется уже известным электронным методам преобразования изображений [4–9], а дополняет эти методы. На рис. 1 и 2 видно достаточно большую разницу в исходном и обработанном изображении. В настоящее время производится патентование некоторых элементов предложенного способа, поэтому, к сожалению, мы не раскрываем некоторые особенности. Эти особенности будут раскрыты в выступлении на самой конференции.

### **Список литературы**

1. Kondpatev A. I., Noskov M. F., Raxmanov V. F. Separation of the extrema of interference bands photographic recording // *Instruments and Experimental Review*. 1983. V. 26, № 2. P. 481–484.
2. Носков М. Ф. Обращение многолучевой интерференционной картины // *Успехи современного естествознания*. 2014. № 5/2. С. 193–194.
3. Носков М. Ф. Оптико-электронная обработка изображений шаровых элементов // *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и геотехнологий*. 2016. № 4 (36). С. 254–262.
4. Немировский В. Б., Стоянов А. К. Сегментация изображений с помощью рекуррентной нейронной сети // *Вестн. Том. политехн. ун-та*. 2012. Т. 321, № 5. С. 205–210.
5. Колобродов В. Г., Пивторак Д. А. Алгоритм формирования изображения объекта фотографирования с большим диапазоном яркости // *Приборы и методы измерений*. 2013. № 2 (7). С. 58–62.
6. Зотин А. Г., Пахирка А. И., Буряченко В. В. Система видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // *Программные продукты и системы*. 2013. № 2. С. 191–197.
7. Добронеев Б. С., Попова О. А. Гистограммный подход к представлению и обработке данных космического и наземного мониторинга // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2014. № 6 (155). С. 14–22.
8. Обнаружение малококонтрастных целей / М. Х. Аксиятов, Е. В. Егорова, Н. В. Мартынов, А. Н. Рыбаков // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. № 1. С. 23–26.
9. Optic-Electronic Processing of Ball Elements Images / K. A. Suvilova, A. I. Polezhaeva, M. F. Noskov, V. I. Tatarnikov, M. G. Rubanovich, V. P. Razinkin // *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2017. P. 368–371.

**А. В. Пятаева, О. Е. Бандеев**

Сибирский федеральный университет, Красноярск  
e-mail: olegbandeev@yandex.ru

## **СЕГМЕНТАЦИЯ ПЛАМЕНИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ**

В настоящей работе предложен алгоритм выявления областей пламени по видеопоследовательностям, основанный на выделении движения, учете цветовых особенностей пламени и анализе его динамических свойств. Экспериментальные исследования, проведенные на видеопоследовательностях из базы данных Билькентского университета, подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

*Ключевые слова:* видеопоследовательность, пламя, пожар, сегментация, признаки огня.

Системы видеонаблюдения получили широкое применение как на городских территориях при наблюдении за сложными техногенными объектами, так и в системах экологического мониторинга за территориями лесных массивов, природных парков и др. Обнаружение пламени по видеопоследовательностям, полученным с камер видеонаблюдения, является актуальной задачей. Это позволяет предотвратить возможные потери и существенно уменьшить ущерб от возгорания. Традиционными способами обнаружения пламени являются методы, основанные на ультрафиолетовых или инфракрасных мультиспектральных принципах обнаружения. Однако такие технологии, как правило, требуют существенных материальных затрат. С развитием систем видеонаблюдения и технологий анализа изображений стало возможным использование видеоданных для обнаружения пламени как объективного признака пожара.

Пламя имеет достаточно много различных характерных особенностей, таких как цвет, движение, форма, поведение и т. д. Различные процессы в пламени очень быстротечны, поэтому часто их невозможно разглядеть невооруженным глазом.

Цвет пламени зависит от многих факторов. Во-первых, это может быть химический состав горящего объекта, при горении которого могут меняться оттенки пламени. Во-вторых, большое влияние оказывает насыщенность воздуха различными газами, например кислородом. Также на цвет пламени может влиять его температура [1].

Второй, не менее важной, характеристикой для распознавания пламени по видеопоследовательностям является его динамика, движение. Как известно, горение огня это весьма динамичный процесс. Языки пламени регулярно меняют свою форму и направление, поэтому такие процессы легко можно обнаружить. На видеоизображении пламя и дым представлены в виде динамической 2D-текстуры [2]. Подобные динамические текстуры могут иметь стохастическую и регулярную составляющую [3].

Таким образом, к признакам пламени на видеоизображениях можно отнести [4–9] движение, цвет, изменение границ, мерцание на краях и отблески пламени. Среди методов обнаружения пламени по видеопоследовательностям можно выделить подходы на основе стохастических моделей и других математических методов, методы на основе выделения движения и хроматических характеристик.

В настоящей работе задача обнаружения пламени по видеопоследовательностям решается следующим образом.

1. Видеопоследовательность в автоматическом режиме разбивается на серию видеоизображений из расчета 24 кадра в секунду.

2. На полученных видеоизображениях выполняется поиск движения для отделения фоновых областей от областей-кандидатов пламени. Для этого использована функция получения модели фона Background Subtractor библиотеки компьютерного зрения OpenCV [10]. Функция получения модели фона основана на алгоритме смеси гауссовых распределений. Модель гауссовых смесей представляет собой взвешенную сумму  $M$  компонент и может быть записана выражением

$$p(\bar{x} | \lambda) = \sum_{i=1}^M p_i b_i(\bar{x}), \quad (1)$$

где  $x$  –  $D$ -мерный вектор случайных величин;  $b_i(x)$  – функции плотности распределения составляющих модели;  $p_i$ ,  $i = 1, \dots, M$  – веса компонент модели. Параметр  $\lambda$  рассчитывается по формуле

$$\lambda = \left\{ p_i, \bar{\mu}_i, \sum_{i=1}^M p_i b_i(\bar{x}) \right\}. \quad (2)$$

Каждый компонент является  $D$ -мерной гауссовой функцией распределения. После нахождения движения по осям  $x$  и  $y$  находятся самые крайние обнаруженные пиксели и по их координатам строится прямоугольник, выделяющий область пламени.

3. На области, в которых выделено движение, накладывается цветовая маска пламени. Для выделения областей цвета пламени использована комбинация цветовых пространств  $RGB$  и  $HSV$ :

$$R > G \geq B, \quad (3)$$

$$R > RT, \quad (4)$$

$$S \geq (255 - R) \times ST / RT. \quad (5)$$

В выражениях (4)–(5) параметр  $RT$  обозначает пороговое значение канала  $R$ ,  $S$  представляет собой значение насыщенности пиксела, а  $ST$  соответствует насыщенности, когда значение  $R$  соответствует значению параметра  $RT$  для того же пиксела. Правила (3) и (4) показывают, что значение канала  $R$  больше по сравнению с другими объектами.

4. Анализ динамических свойств пламени (рис. 1) выполняется путем проверки изменения размера прямоугольного блока. Выполняется учет изменения размера блока из текущего и предыдущего кадров:

$$sd = s1/s2, \quad (6)$$

где  $s1$  – размер блока-кандидата предыдущего кадра;  $s2$  – размер блока текущего кадра.

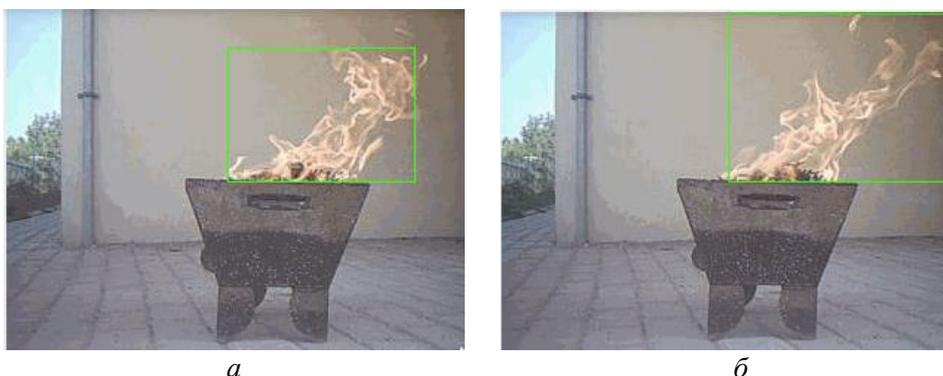


Рис. 1. Изменение размера блока:  $a$  – предыдущий кадр;  $b$  – текущий кадр

5. Геометрия пламени, обусловленная процессом образования ионов при горении, учитывается следующим образом:

$$circularity = s \times (4\pi \times s / P^2), \quad (7)$$

$$squareness = s/(x \times y), \quad (8)$$

$$aspectRatio = s \times (\min(x, y)/\max(x, y)), \quad (9)$$

$$roughness = s \times (P1/P), \quad (10)$$

где  $s$  – площадь области-кандидата;  $P$  – периметр области-кандидата;  $x$  и  $y$  – ширина и высота области-кандидата;  $P1$  – периметр изображения.

6. Также проверяется частота кадров исходного видео по сравнению с частотой кадров выделенных областей:

$$fr = FPS/MAXS \cdot C, \quad (11)$$

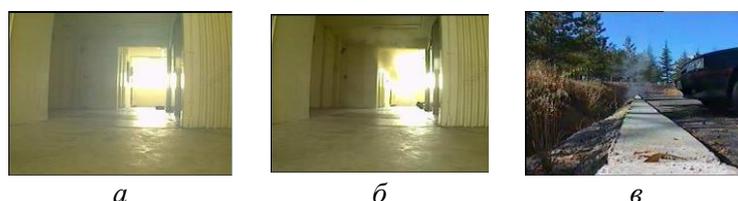
где  $MAXS$  – максимальный размер блока среди всех кадров видеопоследовательности;  $C$  – количество изменений максимально размера блока;  $FPS$  – частота кадров видеопоследовательности.

Сравнение частоты кадров и частоты изменения блока области-кандидата позволяет подтвердить наличие движения на видеопоследовательности, так как каждое такое изменение означает смещение пламени.

Для проведения экспериментальных исследований использованы видеопоследовательности из базы данных Bilkent [11]. Примеры использованных видеоизображений приведены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2. Кадры использованных видеопоследовательностей с пламенем:**  
 **$a$  – fBackYardFile.avi;  $b$  – barbeq.avi;  $v$  – forest4.avi;  $z$  – forest5.avi;  $d$  – ForestFire1.avi**



**Рис. 3. Кадры использованных видеопоследовательностей без пламени:**  
 **$a$  – sEmptyR1.avi;  $b$  – sEmptyR2.avi;  $v$  – sParkingLot.avi**

Результаты экспериментальных исследований показаны в табл. 1 и 2. Оценка качества работы алгоритма обнаружения пламени выполнялась с помощью показателя  $TR$  – *true recognition*. Этот показатель рассчитывается как отношение кадров, в которых пламя верно обнаружено к кадрам, в которых пламя пропущено. Для видеопоследовательностей без дыма рассчитан параметр  $FAR$  – *false alert rejection*, показывающий отношение числа кадров с ложноположительным срабатыванием к общему числу кадров видеопоследовательности.

**Таблица 1**

**Результаты обнаружения пламени (видеопоследовательности с пламенем)**

Видеопоследовательность	Общее количество кадров	Количество кадров с верно обнаруженным пламенем	TR, %
fBackYardFile.avi	1251	1127	90,09
barbeq.avi	516	507	98,26
forest4.avi	251	235	93,63
forest5.avi	246	234	95,12
ForestFire1.avi	247	240	97,17

## Результаты обнаружения пламени (видеопоследовательности без пламени)

Видеопоследовательность	Общее количество кадров	Количество кадров с ложным обнаружением пламени	FAR, %
sEmptyR1.avi	458	3	0,65
sEmptyR2.avi	437	12	2,74
sParkingLot.avi	1136	5	0,44

Экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенного алгоритма обнаружения пламени по видеопоследовательностям.

### Заключение

В работе предложен алгоритм выделения областей пламени по видеопоследовательностям. В основе алгоритма лежит анализ движения, динамических свойств и цвета пламени. При проведении экспериментальных исследований на видеопоследовательностях, содержащих пламя, среднее значение точности сегментации составило 94,6 %, что является хорошим результатом, так как пламя пропущено в 168 кадрах из 2 511. Ложноположительные срабатывания, исследованные при проведении эксперимента на видеопоследовательностях без пламени, получены в 20 кадрах из 2 031, что составляет в среднем 1,3 %.

### Список литературы

1. Тидеман Б. Г., Сциборский Д. Б. Химия горения: учебник для пожарных техникумов. 3-е изд. Л.: ОГИЗ. Гострансиздат, Ленингр. отд., 1935. 356 с.
2. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests // *Procedia Computer Science*. 2016. V. 96. P. 762–771.
3. Gonçalves W. N., Machado B. B., Bruno O. M. A complex network approach for dynamic texture recognition // *Neurocomputing*. 2015. V. 153. P. 211–220.
4. Богуш Р. П., Тычко Д. А. Алгоритм комплексного обнаружения дыма и пламени на основе анализа данных систем видеонаблюдения // *Техническое зрение в системах управления*. Москва. 2015. С. 65–71.
5. Бровко Н. В., Богуш Р. П. Анализ методов обработки последовательностей видеоизображений в приложении к задаче раннего обнаружения пожаров // *Вестн. Полоц. гос. ун-та*. 2011. № 12. С. 42–50.
5. Han D., Lee B. Flame and Smoke Detection Method for Early Real-Time Detection of a Tunnel Fire // *Fire Safety Journal*. 2009. V. 44 (7). P. 951–961.
6. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // *Pattern Recognition Letters*. 2006. V. 27, № 1. P. 49–58.
7. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A.E. Wavelet based real-time smoke detection in video // *Signal Processing: Image Communication, EURASIP*. Antalya. 2005. V. 20. P. 255–260.
8. Yu C., Mei Z., Zhang X. A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm // *The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. Hefei. 2013. V. 62. P. 891–898.
9. Seong G. Kong, Donglin Jin, Shengzhe Li, Hakil Kim – Fast flame detection in surveillance video using logistic regression and temporal smoothing // *Fire Safety Journal*. 2016. V. 79. P. 37–43.
10. Open Source Computer Vision Library. URL: <http://opencv.org/>.
11. Billtent database. URL: <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/FireClips/>.

**А. В. Пятаева, Ю. Д. Куликова**

Сибирский федеральный университет, Красноярск  
e-mail: anna4u@list.ru

## **АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И НЕДОСТАТОЧНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ДЫМА ПО ВИДЕОДАНЫМ**

Компенсация артефактов съемки, возникающих из-за пониженной освещенности и связанных с атмосферными осадками, позволяет увеличить точность обнаружения различных объектов по видеоданным. Для компенсации пониженной освещенности использован многомасштабный Ретинекс, фильтры Гаусса, Лапласа и медианный. Искажения от атмосферных осадков компенсированы на базе НОГ-гистограмм и метода получения темного канала. Экспериментальные исследования проведены на примере системы обнаружения дыма.

*Ключевые слова:* видеопоследовательность, атмосферные осадки, дождь, туман, шум, недостаточная освещенность, обнаружение дыма.

Качество работы любого алгоритма компьютерного зрения зависит от условий съемки и наличия шумов на видеоизображениях. Артефакты съемки могут возникать из-за присутствия атмосферных осадков, влияния времени суток, помех линии электросвязи, внутренних шумов аппаратуры. Искажения, вносимые атмосферными осадками на видеоизображения можно разделить на три категории: отдельные частицы дождя или снега, треки частиц, наличие дымки. Видеоизображения, полученные в условиях низкой освещенности, обладают следующими особенностями: содержат ограниченный диапазон малых значений яркостей, имеют низкую контрастность и аддитивный шум.

Признаками атмосферных осадков на видеоизображении являются: наличие движения, облачное небо, отсутствие теней, отражений и низкая контрастность. Перед этапом компенсации искажений, вызванных атмосферными осадками, определяется тип и интенсивность осадков. С помощью метода сопоставления блоков с размером блока 15–30 пикселей и радиусом поиска 5–20 пикселей (так как атмосферные частицы могут двигаться с различной скоростью) производится поиск поврежденных блоков изображения, выделение полос дождя и снега в этих блоках выполняется с помощью НОГ-гистограмм [1]. Для устранения дымки использован метод получения темного канала, по которому изображение без дымки может быть получено согласно выражению

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) \cdot \text{тар}(x, y)}{A_c(1 - \text{тар}(x, y))}, \quad (1)$$

где  $I(x, y)$  – наблюдаемое изображение;  $A_c$  – интенсивность атмосферного света  $A^C = \{A^R, A^G, A^B\}$ ;  $\text{тар}(x, y)$  – светопередача. Значение светопередачи  $\text{тар}(x, y)$  рассчитывается следующим образом:

$$\text{тар}(x, y) = 1 - \phi \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I_c(x, y)}{A_c} \right) \right), \quad (2)$$

где  $I_c$  – значение цветового канала изображения  $I(x, y)$ ;  $\Omega(x, y)$  – локальный блок с центром в точке  $(x, y)$ ;  $C$  – цветовой канал изображения;  $\phi$  – постоянный параметр для

учета природного явления воздушной перспективы ( $\phi = 0,75$ ). Последним этапом компенсации влияния атмосферных осадков является применение медианного фильтра.

Компенсация искажений, вносимых пониженной освещенностью, выполняется следующим образом. Для расширения диапазона и увеличения средней яркости пикселей, а также для повышения контрастности к изображению применяется многомасштабный алгоритм Ретинекс, основанный на понятии цветопостоянства:

$$R_i(x, y) = C(x, y) \cdot \sum_{i=1}^N W_i (\log[I_i(x, y)] - \log[I_i(x, y) \cdot F(x, y)]), \quad (3)$$

где  $C(x, y)$  – функция восстановления цвета  $i$ -го канала;  $N$  – количество масштабов;  $W_i$  – вес каждого масштаба;  $I_i(x, y)$  – указывает яркость пикселей, расположенных в  $i$ -м канале изображения;  $F(x, y)$  – отрегулированная функция Гаусса для оценки освещенности. На следующем шаге применяется медианный фильтр и фильтр Гаусса для подавления аддитивного шума и выравнивания яркостей пикселей. Поскольку эти фильтры увеличивают общую размытость изображения, для повышения резкости использован фильтр Лапласа.

Для проведения экспериментальных исследований в работе использованы тестовые видеопоследовательности из баз данных Dyntex [2], Bilkent [3] и других баз видеопоследовательностей [4–6]. В базе данных CAVE\_Dataset [7] содержатся тестовые изображения с погодными условиями различного типа. Изображения, содержащие дождь и снег – из базы «Rain and Snow» [8]. На рисунке показаны примеры тестовых видеоизображений. Для имитации недостаточной освещенности к изображениям с нормальной освещенностью последовательно применены гамма-коррекция, добавлен аддитивный гауссов шум и импульсный шум.



Рисунок. Примеры тестовых видеоизображений

Проверка качества работы алгоритмов компенсации искажений, вносимых атмосферными осадками и пониженной освещенностью, выполнена на примере системы обнаружения дыма. Для этого использована система детектирования дыма на базе пространственно-временных локальных бинарных шаблонов [9]. Результаты экспериментальных исследований алгоритма компенсации искажений, вносимых атмосферными осадками, показаны в табл. 1. Качество работы алгоритма оценивалось с помощью показателей:  $TR$ , % – точность обнаружения;  $FRR$ , % – ложноотрицательное срабатывание;  $FAR$ , % – ложноположительное срабатывание. В табл. 1, 2 показаны средние значения по всем использованным видеопоследовательностям.

Таблица 1

Результаты распознавания густого дыма

Видеофрагменты	Виды атмосферных осадков											
	Дождь			Снег			Морось			Туман		
	TR	FRR	FA R	TR	FRR	FA R	TR	FRR	FA R	TR	FRR	FA R
Густой дым	86,1	13,9	15,1	87,2	12,8	16,5	92,2	7,81	12,9	93,2	6,82	9,76
Отсутствие дыма	91,5	8,50	18,6	89,2	10,8	19,2	91,8	8,20	11,8	94,4	5,59	10,1
	Осадки скомпенсированы											
	Дождь			Снег			Морось			Туман		
Густой дым	98,2	1,81	0,89	99,0	1,02	2,18	99,7	0,32	0,85	99,7	0,34	0,54
Отсутствие дыма	98,4	1,62	1,23	98,2	1,82	1,85	99,2	0,80	0,99	99,4	0,56	0,75

В табл. 2 приведены результаты работы алгоритма компенсации влияния условий пониженной освещенности при обнаружении дыма по видеопоследовательностям.

Таблица 2

Результаты распознавания густого дыма

Видеофрагменты	Исходное изображение			Зашумленное изображение			Улучшенное изображение		
	TR	FRR	FAR	TR	FRR	FAR	TR	FRR	FAR
Густой дым	97,04	2,42	5,58	65,82	34,18	27,42	94,41	5,59	6,66
Отсутствие дыма	97,21	2,79	7,25	70,85	29,95	30,00	96,47	3,53	8,01

Экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенных методов компенсации атмосферных осадков и пониженной освещенности по видеоизображениям.

**Заключение**

Артефакты съемки, возникающие на видеоизображениях вследствие влияния пониженной освещенности и (или) присутствия атмосферных осадков, существенно снижают качество обнаружения дыма по видеоизображениям. При этом на степень снижения качества оказывает влияние интенсивность осадков. Для компенсации влияния искажений, вносимых атмосферными осадками, предложен алгоритм на основе НОГ-гистограмм и метода получения темного канала изображения. Влияние пониженной освещенности компенсируется многомасштабным алгоритмом Ретинекс с последующим применением фильтра Гаусса, Лапласа и медианной фильтрацией. Экспериментальные исследования (на примере дыма) подтверждают эффективность предложенных методов.

**Список литературы**

1. Пятаева А. В. Компенсация визуальных эффектов атмосферных осадков на нестабилизированных видеопоследовательностях // Материалах 19-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2017». М., 2017. Т. 2. С. 724–729.
2. Renaud P., Fazekas S., Huiskes M.J. DynTex: A comprehensive database of dynamic textures // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31, No. 12. P. 1627–1632.
3. Database of Bilkent University [Электронный ресурс]. <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/> (дата обращения: 01.06.2017).
4. Video smoke detection. URL: <http://staff.ustc.edu.cn/~yfn/vsd.html>.
5. Database of Wildfilmsindia. URL: [www.wildfilmsindia.com](http://www.wildfilmsindia.com).
6. V-MOTE Database. URL: [http://www2.imse-cnm.csic.es/vmote/english\\_version/index.php](http://www2.imse-cnm.csic.es/vmote/english_version/index.php).
7. CAVE\_Dataset. URL: <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/databases/>.
8. Barnum P., Narasimhan G., Kanade T. Analysis of Rain and Snow in Frequency Space // International Journal of Computer Vision. № 86(2-3). P. 256–274.
9. Пятаева А. В., Фаворская М. Н., Попов А. М. Система сегментации областей дыма на видеопоследовательности (SmokeAnalyzer 2.18). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613827. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.04.2016.

**А. П. Раевич**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

## **КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ УЧАЩИМИСЯ НА ПРИМЕРЕ ДЕШИФРАЦИИ КОСМОСНИМКОВ**

Рассмотрен механизм расчета комплексного показателя оценивания знаний учащихся при решении сложных задач на примере дешифрации космоснимков, основанный на знаниях и опыте эксперта, составляющего задачи.

*Ключевые слова:* комплексный показатель, многофакторная оценка, решение сложных задач.

Для применения данных дистанционного зондирования земли в любой из областей хозяйственной деятельности из них должна быть извлечена необходимая информация. Одним из наиболее сложных и дорогих с точки зрения временных затрат является процесс распознавания и локализации различных объектов или характерных черт местности естественного и искусственного происхождения, таких как русла рек, береговые линии, здания, дороги.

Математическая обработка цифровой картографической информации в автоматическом режиме с использованием моделей, которые представляют собой систему логических и математических правил, определяет процесс обработки исходного цифрового изображения либо обработку информации в режиме диалога оператора с ЭВМ с целью отбора информации исходного изображения [4].

Таким образом, большинство задач в области дешифрации космоснимков, решение которых позволит обучающимся приобрести необходимые умения для формирования соответствующих компетенций, обладают сложной и трудоемкой процедурой проверки, ручное исполнение которой не приемлемо в условиях смешанного и дистанционного автоматизированного обучения.

В литературе такие задачи определяются как задачи со сложным результатом. Методики и средства проверки таких работ рассмотрены в [1; 2]. Традиционное оценивание таких задач, основанное только на верности итогового ответа, не может показать истинный уровень освоения знаний и умений обучаемого [3].

Современные механизмы расчета многофакторного показателя оценки решения многоходовых задач должны определяться экспертом, составляющим задачу. В качестве примера можно рассмотреть вычислительное соотношение:

$$O = l_1 f_1 + l_2 f_2 + l_3 f_3 + l_4 f_4 + l_5 f_5 + \dots + l_n f_n \quad (1)$$

где  $f_i$  – частный классификационный фактор оценки решения многоходовой задачи, нормированный по шкале нормализации;  $l_i$  – показатель важности классификационного фактора (весовой коэффициент);  $i$  – порядковый номер фактора. Весовые коэффициенты формируются в зависимости от значения экспертной оценки влияния того или иного фактора на решение задачи.

Методика расчета многофакторного показателя осуществляется с помощью формирования вычислительной процедуры оценивания. Экспертом выбирается группа

факторов оценивания, которая может меняться под конкретную решаемую задачу (рисунок). Целью данного этапа является формирование кортежа факторов  $F = \{f_i\}$ , релевантных цели выполнения многоходовой задачи, а также уточнение способа вычисления для каждого  $f_i \in F$ .

Для вычисления каждого  $f_i \in F$  используются две системы метрик: первичные метрики и метрики оценивания. Множество первичных метрик  $M$  формируется, исходя из физических характеристик факторов. Так, точность решения задачи может измеряться в процентах, скорость выполнения – в минутах и т. д. Каждой из метрик сопоставляется диапазон допустимых значений. Роль метрик оценивания, образующих множество  $E$ , заключается в интерпретации значений первичных метрик применительно к решаемой задаче.

Ранжирование системы факторов оценивания знаний обучаемого по степени значимости может быть выполнено с помощью экспертного комитета. Для создания экспертного комитета при разработке балльной оценки используются элементы метода «снежного кома». Для измерения тесноты связи между ранжируемыми группами факторов используется коэффициент конкордации Кендалла.



**Рисунок. Система факторов для оценки решения сложной задачи дешифрации космоснимков**

Корректность ранжирования факторов, а также точность их измерения определяется способностью эксперта правильно понимать причинно-следственные зависимости событий, что, в свою очередь, существенно зависит от уровня знаний и опыта человека. Для повышения точности измерения субъективных вероятностей целесообразно проводить групповую экспертизу с необходимой обработкой

высказываний экспертов. Такая экспертиза обеспечивает использование коллективного знания и опыта.

Расчет комплексного показателя многофакторной оценки решения сложной задачи заключается в расчете интегрального критерия на основе объединения отдельных оценок по каждому фактору (линейные критерии). Таким образом, формула определения многофакторного показателя (1) принимает следующий вид:

$$O = \sum_{i=1}^{n=7} l_i \times f_i; \sum_{i=1}^{n=7} l_i = 1, \quad (2)$$

где  $O$  – многофакторный показатель оценки решения задачи;  $f_i$  – частный классификационный фактор, нормированный по шкале нормализации;  $l_i$  – показатель важности классификационного фактора (весовой коэффициент);  $i$  – порядковый номер фактора.

Вычисление весовых коэффициентов  $l$  осуществляется на основе применения метода парных сравнений с последующей обработкой его результатов. Для этого строится матрица сравнений  $Z$  размерностью, равной количеству оцениваемых факторов  $n$ , а каждый элемент матрицы вычисляется согласно соотношению

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } n_i > n_j \\ 0, & \text{если } n_i < n_j \end{cases}$$

где  $z_{ij} = 1$ , если фактор  $n_i$  не менее предпочтителен (важен) для эксперта, чем фактор  $n_j$ , а если фактор  $n_i$  менее важен, то ставится 0.

Итоговая формула для расчета значений весовых коэффициентов  $l_i$  имеет следующий вид:

$$l_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} / (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij}) = z_i / \sum_{i=1}^n z_i. \quad (3)$$

#### Список литературы

1. Латыпова В. А. Методики проверки работ со сложным результатом в условиях смешанного и дистанционного автоматизированного обучения // Наукоедени: интернет-журн. 2015. Т. 7. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/170TVN315.pdf>.
2. Латыпова В. А. Методика и инструментальное средство автоматизированной проверки работ со сложным результатом на основе использования банка ошибок // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 7 (49).
3. Rosli R., Goldsby D., Caprano M. M. Assessing students' mathematical problem – solving and problem-solving skills // Asian social science. 2013. V. 9, № 16. P. 54–60.
4. Журкин И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. 272 с.

**А. П. Раевич**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета  
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

## **МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ ДЕШИФРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Рассмотрены методы дешифрации космоснимков, выделены неопределенности и ошибки во входных данных при решении задач дешифрации данных дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова: методы дешифрации космоснимков, численные методы, неопределенности в данных.*

### **Введение**

Современное развитие технических средств дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволило широко применять получаемую информацию во всех сферах хозяйственной деятельности человека. В отличие от «полевых» измерений, которые требуют значительных временных и экономических затрат, и в ряде случаев могут быть невыполнимы на труднодоступных территориях методы анализа данных ДЗЗ позволяют извлекать и накапливать необходимую информацию о значительной области земной поверхности с высокой скоростью и точностью. Немаловажным преимуществом космических средств перед наземными измерениями является оперативность поступления информации.

Несмотря на очевидные преимущества использования космоснимков, анализ литературы [1–5] показывает, что дешифрация данных ДЗЗ представляет собой трудоемкую задачу, сложность которой повышается в условиях неопределенности и риска. В [2] авторами определено, что специфика изучения сложных систем, к которым относятся объекты земной поверхности, обуславливается рядом факторов, которые можно отнести к одной из четырех групп: первая группа характеризуется сложностью самой системы как объекта исследования; вторая группа характеризуется внешней сложностью явлений и процессов, влияющих на систему и взаимодействующих с ней; третья – недостаточностью информации и знаний о предыстории процесса функционирования системы; четвертая группа факторов связана с разрабатываемыми и применяемыми технологиями анализа систем.

В целом можно отметить наличие в научной литературе по данному вопросу множества частично перекрывающихся подходов и методов.

### **Применение численного вероятностного анализа в задачах дешифрации данных ДЗЗ в условиях неопределенности информации**

Подходы к решению задач дешифрации данных ДЗЗ с определенной долей условности могут быть разделены на следующие основные группы:

1. Визуальные методы дешифрирования, когда объекты могут быть выявлены на спутниковых снимках по признакам, которые присущи самому изображению объектов, либо по связным с объектом компонентам ландшафта и элементам его структуры.
2. Автоматизированные методы дешифрирования, которые, в свою очередь, подразделяются на:

– алгоритмы контролируемой классификации (с помощью обучения, с помощью дискриминантной (решающей) функции, с помощью методов статистического распознавания образов);

– алгоритмы неконтролируемой классификации (с использованием кластерного анализа, на основе нейронных сетей, на основе моделей машинного зрения).

Из перечисленных групп в литературе [1–3] отдельно выделяются статистические подходы к анализу данных вследствие того, что: ход действия природных процессов может иметь случайный характер; имеются неопределенности и ошибки относительно правильной идентификации обучающих образов; исследуемые классы образов могут быть неотличимы от других классов в пространстве измерений.

Неопределенность информации о природных процессах отражается на входных данных и параметрах дешифрируемых объектов. Выделяется три типа «неопределенных» данных: случайные, нечеткие и интервальные [1; 2; 5].

Наличие неопределенностей и ошибок во входных данных приводит к необходимости создания методов, учитывающих характер и тип неопределенности. В [5] отмечается, что в понятии неопределенности выделяются две важные составляющие, а именно, элиторная и эпистемистическая:

– элиторная неопределенность в первую очередь определяется изменчивостью явлений и процессов и является неотъемлемым атрибутом случайных событий, может быть представлена частотными функциями распределения. В условиях элиторной неопределенности используются различные методы, которые опираются на теорию вероятностей, в том числе подходы, основанные на описании законов распределения случайных величин;

– эпистемистическая неопределенность прямо связана с объемом и достоверностью информации об изучаемом объекте. В условиях эпистемистической неопределенности системы для ее анализа важен факт неопределенности вероятностных оценок. В литературе выделяется несколько основных подходов для анализа эпистемистической неопределенности: методы экспертных оценок; интервальные методы; анализ вероятностной чувствительности и другие.

## **Выводы**

Численный вероятностный анализ представляет собой непараметрический подход и может успешно применяться для исследования сложных природных объектов в условиях неопределенности и неполноте сведений об объекте исследования, повышая тем самым качество исследования [1; 2].

## **Список литературы**

1. Добронев Б. С., Попова О. А. Гистограммный подход к представлению и обработке данных космического и наземного мониторинга // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 6 (155). С. 14–22.

2. Добронев Б. С., Попова О. А. Численный вероятностный анализ для исследования систем в условиях неопределенности // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 4 (21). С. 39–46.

3. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования земли: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010.

4. Раевич К. В., Маглинец Ю. А., Зеньков И. В. Разработка системы поддержки принятия решений в управлении использованием земельного сектора агропромышленного комплекса в регионах Сибири // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. № 6 (113). С. 89–98.

5. Добронев Б. С., Попова О. А. Численные операции над случайными величинами и их приложения // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия: Математика и физика. 2011. Т. 4, № 2. С. 229–239.

**А. В. Рубцов<sup>(1)</sup>, Е. В. Труханов<sup>(1, 2)</sup>, А. А. Перунов<sup>(1, 2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>(2)</sup>ООО НПП «Автономные аэрокосмические системы-ГеоСервис», Красноярск

e-mail: etrukhanov@uav-siberia.com

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ СЪЕМКИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ**

В представленном исследовании итоговой целью являлось определение и дифференциация индивидуальных характеристик вегетационного цикла деревьев различных климатипов в географических культурах лиственницы с помощью периодической аэрофотосъемки. В ходе работы были применены методы автоматической сегментации и классификации ортофотопланов с пробной площади для определения количества деревьев (верифицирован по наземным данным), расчета площадей крон деревьев и дифференциации их фенологических фаз.

*Ключевые слова: аэрофотосъемка, сегментация, распознавание деревьев, фенофазы.*

### **Введение**

Определение таксационных характеристик древостоев – трудоемкая, но практически значимая процедура как в учете лесных ресурсов (программа государственной инвентаризации лесов), так и для частных арендаторов лесных участков. Наземные методы учета обладают высокой точностью, но малой эффективностью в связи с обширностью необходимых для инвентаризации площадей, в то время как доступные данные спутниковой съемки с высоким пространственным разрешением позволяют определять породный состав лесов, но имеют ограничения в возможности распознавать характеристики древостоя на уровне индивидуальных деревьев. Данные беспилотной аэрофотосъемки являются альтернативой и дополнением в задачах получения более детальных характеристик древостоев и все чаще используются в последнее время.

Расчет количества деревьев и распознавание границ их крон – важные и актуальные задачи для проведения анализа пробных площадей по сегментам (группам) исследуемого древостоя, за которой следуют задачи расчета вегетационных индексов, определения сезонных особенностей их фенологического цикла, определения жизненного состояния деревьев или степени их поражения, расчет запасов стволовой древесины и пр. Однако решение этих задач выполняется отдельными алгоритмами; их выбор, параметризация и точность результата зависит от специфики объектов исследования. Универсального метода как совокупности нескольких алгоритмов для решения обозначенных задач для любых типов растительности в настоящее время не существует. В нашей работе представлены результаты анализа композитных изображений (ортофотопланов) видимого спектра по данным аэрофотосъемки экспериментальных климатипов лиственницы с высокой плотностью насаждения.

### **Используемые данные**

В качестве пробной площади были выбраны географические культуры (климатипы) лиственницы, заложенные в 1969–1970 годах на территории стационара

ОЭП «Погорельский бор» Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН [1]. Наземная инвентаризация участка выполнена в 2016 году с использованием программно-инструментального ГИС комплекса «FieldMap» [2], исходные данные были экспортированы из базы данных инвентаризации в ГИС слой. В базе данных содержатся записи о таксационных показателях 1678 деревьев: род, вид, климатип (место происхождения) деревьев, их высота, диаметр ствола на уровне 1,3 м, протяженность живой части кроны, а также координаты деревьев на пробной площади.

В периоды начала (17 мая), середины (18 августа) и окончания сезона вегетации (20 сентября – 4 октября) исследуемых древостоев в 2016 году была проведена аэрофотосъемка пробной площади с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) «Delta-m» и «DJI Phantom 3» с камерой видимого диапазона спектра. Фотограмметрическая обработка фотоснимков производилась в ПО «Agisoft PhotoScan», ортофотопланы участков созданы из исходных наборов снимков на каждую дату съемки древостоя с пространственным разрешением 6–8 см/пикс.

### **Методы и алгоритмы классификации**

На первом этапе работы были применены и сравнены результаты следующих методов распознавания границ крон деревьев: алгоритм с наращиванием областей, сегментация с помощью дерева квадрантов, сегментация с переменной разрешающей способностью. Большая часть алгоритмов основана на представлении того, что дерево на аэрофотоснимке представляет собой объект с «гористой» структурой с максимумом яркостного значения, соответствующим верхушке [3]. Основная трудность задачи сегментации состоит в высокой детализации изображений с БПЛА и высокой плотности древостоя (60–70 м<sup>2</sup>/га), которая приводит к распознаванию ветвей деревьев в качестве отдельных объектов. Для решения данной проблемы изображения сглаживались билатеральным фильтром с целью уменьшения яркостных колебаний в пределах крон при сохранении четких границ объектов. Алгоритм сегментации с переменной разрешающей способностью показал лучший результат на наших данных по сравнению с двумя другими алгоритмами, так как позволял автоматически выполнить оконтуривание крон с большей точностью. Основным входным параметром в данном методе является масштаб – он позволяет регулировать размер создаваемых при распознавании объектов. Оптимальный масштаб (40) был подобран экспериментальным путем несколькими итерациями сегментации при различных значениях масштаба. Критерий оценки – наименьшее количество единых крон деревьев, разделенных алгоритмом на части.

На следующем этапе сегментированные слои были классифицированы пороговым методом по критериям средней отражательной способности ( $R$ ) в каждом из трех RGB каналов на три группы объектов: «деревья», «земля», «тень». Класс «земля» присваивался объектам,  $R$  которых имела значение в канале синего спектра менее 100; класс «тень» при  $R < 100$  в трех каналах ( $R$ ,  $G$ ,  $B$ ); класс «деревья» при  $R > 150$  в канале зеленого спектра и  $R > 100$  в красном и синем каналах. Далее элементы класса «деревья», имеющие общие границы, были соединены в единые объекты [4].

Для промежуточной оценки ошибки алгоритма оконтуривания крон деревьев был применен алгоритм распознавания образов с обучающей выборкой из 10 образцов деревьев на всем ортофотоплане, диаметр области составлял 20 пикселей, нормализованный коэффициент корреляции между тест-объектами составил 0,75. Сравнение расчета реального количества деревьев с результатами алгоритма сегментации изображения и метода распознавания образов представлены в табл. 1. Значительное расхождение между количеством сегментов и количеством распознанных деревьев объясняется высокой плотностью древостоя, сегменты имеют

непосредственную пространственную близость и схожие спектральные характеристики в результате чего в один полигон может входить до 7 близкорасположенных деревьев.

С целью определения зависимости ошибки распознавания деревьев от плотности древостоя на ортофотоплане были размечены 10 тестовых участков площадью 450 и 850 м<sup>2</sup>. Для каждого участка была определена плотность древостоя и произведено сравнение количества распознанных деревьев с количеством деревьев по базе Field-Mar (табл. 2). Результаты показывают прямую зависимость ошибки распознавания от плотности древостоя, что ограничивает применение выбранного нами алгоритма в условиях высокой плотности лесных насаждений.

**Таблица 1**

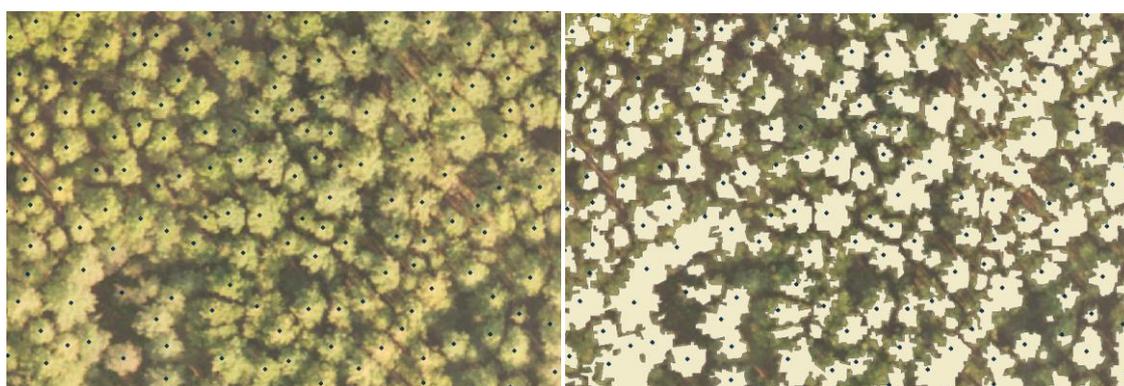
**Результаты сегментации и автоматического подсчета деревьев**

Дата съемки	Наземные данные «Field Map»	Количество сегментов	Количество распознанных деревьев
17.05.2016	–	597	805
18.08.2016	–	429	927
20.09.2016	1676	521	886
04.10.2016	–	639	715

**Таблица 2**

**Показатели распознавания количества деревьев по тестовым участкам**

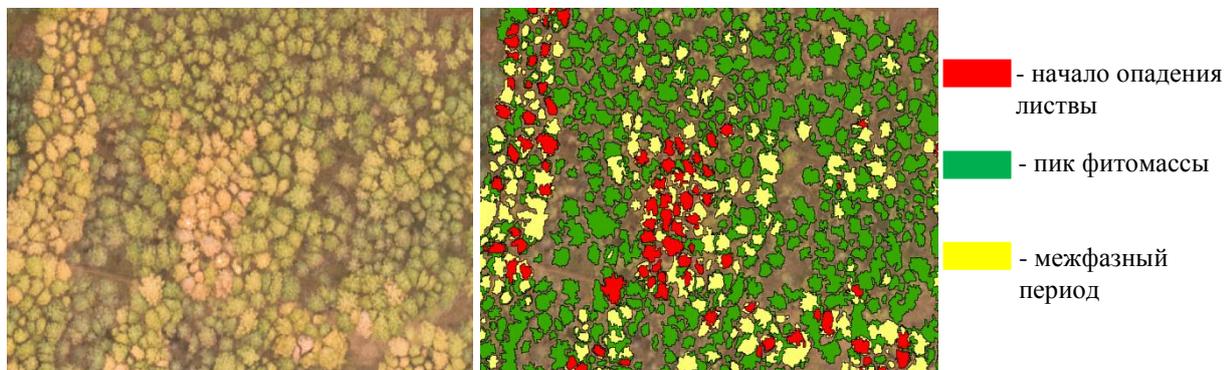
№	Площадь участка (м <sup>2</sup> )	Средняя плотность древостоя (на м <sup>2</sup> )	Количество деревьев (база Field-Map)	Количество распознанных деревьев	Ошибка распознавания (%)
1	450	0,07	32	19	40,63
2	450	0,08	40	21	47,50
3	850	0,1	87	44	49,43
4	850	0,1	91	46	49,45
5	450	0,11	50	24	52,00
6	450	0,12	57	25	56,14
7	850	0,14	117	47	59,83
8	450	0,14	61	24	60,66
9	450	0,15	65	24	63,08
10	450	0,17	78	26	66,67



**Рис. 1. Фрагмент аэрофотоснимка от 20.09.2016 с точками вершин деревьев (слева) и распознанные контуры крон деревьев (справа)**

Особенность исследуемой пробной площади заключается в том, отдельные климатипы лиственницы имеют индивидуальные фенодаты [16; 5]. На последнем этапе

работы ортофотопланы разных дат съемки по слою контуров распознанных деревьев были классифицированы по фенологическим различиям. В зависимости от даты съемки метод позволяет распознать как минимум три фенологических состояния, среди которых на весеннем ортофотоплане выделяются деревья в фазе покоя (без фитомассы), начала облиствения и расцветивания листьев; в середине сезона выделяются фазы пикового расцветивания листьев; по осенней съемке – фазы начала опадения листьев, массовое опадение листьев или межфазный период.



**Рис. 2. Фрагмент снимка древостоя от 04.10.2016 (слева) и классы фенофаз (справа)**

### **Заключение**

В работе было показано, что задача определения характеристик отдельных деревьев в древостоях по признакам фенологического цикла, в частности по индивидуальным фенодатам развития фитомассы, практически может быть решена применением последовательности алгоритмов к данным аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения с БПЛА. Однако каждый из алгоритмов этого метода имеет свои недостатки и ограничения, что приводит к снижению точности конечного результата. В частности, тестовый алгоритм расчета количества деревьев в древостое не удовлетворяет предъявляемым требованиям инвентаризации, где точность должна быть близка к 90 %. В целом метод требует доработки и апробации на большем разнообразии древостоев с различной плотностью, и универсализация алгоритма является предметом дальнейших исследований.

Для улучшения работы метода и увеличения области его применимости необходимо, помимо камеры видимого диапазона, применять съемочную аппаратуру с каналом инфракрасного диапазона, что в сочетании с RGB-каналами позволит производить расчет различных вегетационных индексов, а сезонная динамика значений этих индексов послужит дополнительным признаком в ряде алгоритмов определения рассмотренных характеристик древостоя.

### **Список литературы**

1. Ирошников А. И. Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск, 1977. С. 4–110.
2. Charles T. Scott & Jeffrey H. Gove Forest inventory // Encyclopedia of Environmetrics. 2002. P. 814–820.
3. Erikson M., Olofsson K. Comparison of three individual tree crown detection method // Machine Vision and Applications. 2005. P. 258–265.
4. Дмитриев Е. В. Классификация лесного покрова Тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.

**С. А. Рылов, И. А. Пестунов**

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск  
e-mail: rylovs@mail.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ОЗЕР ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУБПИКСЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СМЕШАННЫХ ПИКСЕЛЕЙ**

В работе предлагается метод уточнения площадей водных объектов на основе субпиксельного анализа смешанных пикселей по данным мультиспектральной спутниковой съемки. Эксперименты на спутниковых изображениях Ресурс-П и IKONOS показывают, что предлагаемый метод обеспечивает получение устойчивых результатов при обработке снимков разного пространственного разрешения.

*Ключевые слова:* водные объекты, площадь акватории озера, водные индексы, смешанные пиксели, уточнение границ, спутниковые снимки, NDWI, *mixel*.

### **Введение**

В последние десятилетия наблюдается значительное влияние климатических изменений и антропогенных факторов на состояние и гидрологический режим водных объектов. Основными признаками для оценки степени такого воздействия на наземные водные ресурсы могут служить морфометрические характеристики озер [1; 2], такие как площадь водного зеркала, уровень и объем воды. В настоящее время для большинства регионов России наземное измерение указанных характеристик озер не представляется возможным ввиду крайне малого числа стационарных пунктов наблюдения. В связи с этим является актуальной задача мониторинга морфометрических параметров озер по данным спутниковой съемки, являющейся часто единственным источником объективной и актуальной информации для обширных и труднодоступных территорий.

При выделении водной поверхности по спутниковым изображениям пиксели, как правило, жестко разделяются на водные и неводные. При этом наличие смешанных граничных пикселей (*mixels*), которые захватывают как воду, так и сушу, может приводить к существенным ошибкам при определении площадей водоемов, а также к расхождениям между результатами различных методов выделения водной поверхности [3]. Площадь, занимаемая смешанными пикселями, напрямую зависит от разрешения съемки и длины береговой линии. Например, при пространственном разрешении 10 м для озера Большое Яровое, имеющего правильную овальную форму с периметром 40 км, площадь смешанных пикселей составляет 0,4 км<sup>2</sup> (0,5 % от общей площади). А для озера Красиловское (рис. 1), имеющего сложную конфигурацию береговой линии с периметром 10 км, эта площадь составляет 0,1 км<sup>2</sup> (14 % от общей площади). Таким образом, ошибка определения площади может оказаться вероятнее для водоемов меньшего размера и характеризующихся большим коэффициентом извилистости береговой линии (отношение длины береговой линии к длине окружности круга, имеющего площадь, равную площади озера).

В данной работе предлагается метод уточнения площадей водных объектов на основе субпиксельного анализа смешанных пикселей по данным мультиспектральной спутниковой съемки.

### Определение площади водных объектов с учетом смешанных пикселей

Для автоматического выделения водной поверхности по данным мультиспектральной спутниковой съемки использовался алгоритм ECCA-Water [4], построенный на основе непараметрического быстродействующего алгоритма кластеризации ECCA [5]. Алгоритм ECCA-Water не требует настройки параметров и не допускает ошибок [3; 4], присущих распространенным пороговым методам на основе водных индексов, при классификации сильно увлажненных почв, теней и антропогенных объектов [6–8].

Для обработки смешанных пикселей широко используется линейная модель смеси [9]. Она подразумевает, что спектральные характеристики  $I_M$  смешанного пикселя определяются взвешенной суммой характеристик входящих в него классов в соответствии с занимаемыми ими площадями. Для случая двух классов ( $W$  – вода и  $NW$  – суша) это можно выразить следующим образом:

$$I_M = I_W \times s_W + I_{NW} \times s_{NW}, \quad (1)$$

где  $s_W + s_{NW} = 1$ . Здесь  $s_W$  и  $s_{NW}$  – доли пикселя, занимаемые соответствующими классами. Для определения соотношения площадей классов внутри пикселя необходимо знать эталонные значения спектральных характеристик этих классов ( $I_W$  и  $I_{NW}$ ). В одномерном случае  $s_W$  можно найти по формуле

$$s_W = (I_M - I_{NW}) / (I_W - I_{NW}). \quad (2)$$

В качестве эталонов, как правило, выбираются характеристики отдельных «чистых» пикселей. Однако фиксированные значения эталонов плохо подходят при обработке границ водной поверхности [10], что связано с существенными локальными изменениями спектральных характеристик воды в прибрежной зоне. Исходя из предположения, что эталонные значения характеристик воды должны быть более близки к характеристикам соседних водных пикселей, будем выбирать эталонные пиксели в окрестности каждого рассматриваемого смешанного пикселя.

Предлагаемую процедуру определения площади водоемов можно представить в виде четырех основных этапов.

*Этап 1.* Выделение воды на изображении с помощью алгоритма ECCA-Water. При этом изображение разбивается на множество кластеров, часть из которых помечена как водные. Для каждого кластера  $i$  вычисляется среднее значение водного индекса NDWI [6], которое будем обозначать  $NDWI_i^{avg}$ . Рассматриваемый водный объект, определяемый как пространственно-замкнутая водная область, выделяется в отдельный кластер  $L$ .

*Этап 2.* Определение смешанных пикселей скользящим окном размера  $5 \times 5$  пикселей. Если в рассматриваемом окне содержится хотя бы один водный пиксель из кластера  $L$  и при этом присутствует хотя бы один неводный пиксель, то центральный пиксель окна считается смешанным.

*Этап 3.* Для каждого смешанного пикселя определяется доля водной поверхности с помощью линейной модели по формуле (2). При этом в качестве спектральных характеристик используются значения водного индекса NDWI. Эталонная характеристика суши  $I_{NW}$  определяется как средний показатель  $NDWI_i^{avg}$  для всех пикселей внутри окна, не принадлежащих к водным кластерам. Для установления эталонной характеристики воды для всех пикселей внутри окна, принадлежащих к водному кластеру  $L$ , определяется минимальное значение водного индекса:  $NDWI_L^{min}$ . Учет данной локальной характеристики осуществляется с весом  $k$ , определяемым как отношение числа водных пикселей в локальном окне к общему числу пикселей в окне. В итоге эталонная характеристика воды определяется по формуле

$$I_w = NDWI_L^{\min} \times k + NDWI_L^{\text{avg}} \times (1 - k).$$

Этап 4. Расчет площади водного объекта с учетом результатов обработки смешанных пикселей.

### Экспериментальные исследования

В таблице представлены площади озера Красиловское (рис. 1) и озера Улугколь (рис. 2, а), вычисленные по спутниковым снимкам Ресурс-П и IKONOS при варьировании пространственного разрешения изображений (методом осреднения). Из таблицы видно, что при ухудшении разрешения определяемая площадь озер без учета смешанных пикселей уменьшается. Применение процедуры коррекции позволяет значительно повысить устойчивость получаемых результатов.

Таблица

Площадь озер до и после коррекции смешанных пикселей при изменении пространственного разрешения изображений

Площадь озера Красиловское, км <sup>2</sup> (снимок Ресурс-П)			Площадь озера Улугколь, км <sup>2</sup> (снимок IKONOS)		
Разрешение, м	Алгоритм ЕССА-Water	После коррекции	Разрешение, м	Алгоритм ЕССА-Water	После коррекции
2.14	0.718	0.736	0.8	6.18	6.21
6.42	0.692	0.738	3.2	6.12	6.19
10.7	0.696	0.752	9.6	6.08	6.22
15	0.672	0.748	16	5.99	6.22
Ст. откл. × 100	1.89	0.77	Ст. откл. × 100	7.97	1.41



Рис. 1. RGB-композиты (каналы: Red, NIR, Green) снимков озера Красиловское за 03.05.2016 со спутников Ресурс-П № 2 (разрешение 2.14 м) и Landsat-8 (разрешение 30 м)

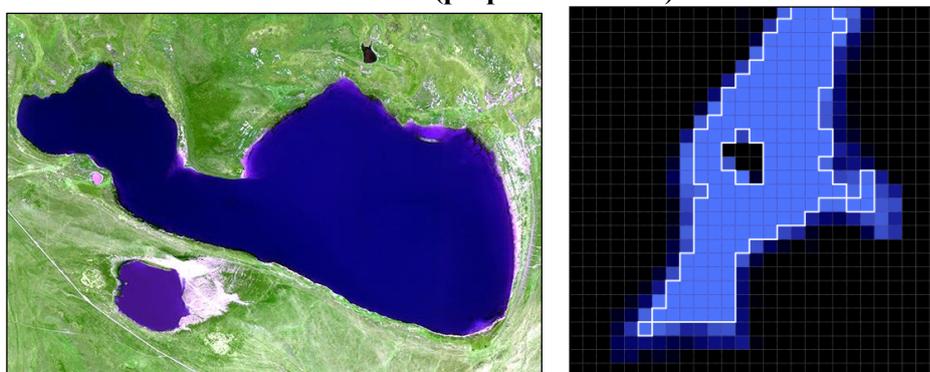


Рис. 2. RGB-композит (каналы: Red, NIR, Green) снимка озера Улугколь за 14.10.2003 со спутника IKONOS (слева); пример обработки смешанных пикселей (черным цветом отмечена суша, белой линией – граница воды без учета коррекции) (справа)

## **Заключение**

Предложенный в данной работе метод обработки смешанных пикселей позволяет повысить точность определения площадей водных объектов по данным спутниковой съемки среднего разрешения, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями. Это обеспечивает возможность использования снимков среднего разрешения (Sentinel-2, Landsat-8, Канопус-В и др.) для мониторинга озер небольшого размера. Преимуществом этих данных является относительно высокая периодичность съемки и наличие открытого доступа к ним.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (грант № 0316-2015-0006).*

## **Список литературы**

1. Кравцова В. И., Тарасенко Т. В. Динамика термокарстовых озер центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли. 2011. Т. 15, № 3. С. 31–42.
2. Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2015. № 6 (121). С. 16–24.
3. Автоматизированный мониторинг площадей акваторий озер и водохранилищ по спутниковым данным / А. А. Донцов, И. А. Пестунов, С. А. Рылов, И. А. Суторихин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 4, № 2. С. 38–45.
4. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С. А. Рылов, О. Г. Новгородцева, И. А. Пестунов, О. А. Дубровская, Ю. Н. Синявский // Материалы II междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2015. С. 207–212.
5. Ensemble of clustering algorithms for large datasets / I. A. Pestunov, V. B. Berikov, E. A. Kulikova, S. A. Rylov // Optoelectronics, instrumentation and data processing. 2011. V. 47, № 3. P. 245–252.
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. V. 17, № 7. P. 1425–1432.
7. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery / F. Sun, W. Sun, J. Chen, P. Gong // International journal of remote sensing. 2012. V. 33. Is. 21. P. 6854–6875.
8. Антонов В. Н., Новгородцева О. Г. Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в Сибирском федеральном округе // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 8. С. 81–86.
9. Spectral unmixing / C. Quintano, A. Fernández-Manso, Y.E. Shimabukuro, G. Pereira // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33, № 17. P. 5307–5340.
10. Automated Subpixel Surface Water Mapping from Heterogeneous Urban Environments Using Landsat 8 OLI Imagery / H. Xie, X. Luo, X. Xu, H. Pan, X. Tong // Remote sensing. 2016. V. 8, № 7. P. 584.

**А. Ж. Сарина, А. В. Замятин**

НИ «Томский государственный университет», Томск  
e-mail: assiya\_prog@mail.ru

## **АЛГОРИТМ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УЧЕТОМ МЕЖДИАПАЗОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ**

В данной статье исследованы особенности каналов гиперспектрального аэрокосмического изображения (АИ). Предложен алгоритм с межканальным нахождением наилучшего канала корреляции и применением индексированного кодирования без потерь, позволяющий уменьшить размеры каналов изображения и преобразовать их перед сжатием.

*Ключевые слова:* гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, междианазонная корреляция, индексированное кодирование, группы каналов.

### **Введение**

В связи с быстро возрастающим интересом ученых и всего научного пространства к развивающимся геоинформационным системам и технологиям в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стало перспективным рассмотреть проблему передачи данных аэрокосмического мониторинга и их архивации. При этом объективную необходимость и актуальность приобретает вопрос научной проблемы предварительной обработки сжатия для больших объемов данных, получаемых со спутников.

Основными этапами обработки аэрокосмического изображения (АИ) являются: ввод и внутреннее представление изображений; фотограмметрическое преобразование снимков; геометрическая коррекция; предварительная обработка изображения. Алгоритм и этап предварительной обработки аэрокосмического изображения предлагается в статье, рассмотрим его подробнее [1–5].

### **Решение задачи сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений**

Последовательность этапов обработки и алгоритма сжатия:

- 1) расчет величины корреляции между каналами АИ;
- 2) нахождение лучшего канала корреляции среди пар каналов и вычитание наилучших пар каналов АИ;
- 3) индексированное кодирование;
- 4) сжатие статистическим алгоритмом.

Рассмотрим поэтапность алгоритма.

**1-й шаг.** Рассчитаем величину корреляции (междианазонной зависимости) между каналами гиперспектральных АИ, что позволит уменьшить диапазон изменения данных, значит, потребуется меньшее число разрядов для их хранения. Найдем наилучший коррелированный канал (the best).

**2-й шаг.** Учет междианазонной корреляции. Произведем учет междианазонной корреляции между выбранными каналами (группами) гиперспектрального АИ путем выбора оптимального значения корреляции и формирования массивов разностей между исходными данными и вычитаемым каналом.

**3-й шаг.** Индексированное кодирование. Эффективностью алгоритма является диапазон гиперспектральных данных варьируемым определенным диапазоном возможных значений с использованием дополнительных одномерных структур данных. В структурах данных значения сохраняются в виде индексов. Эффективность применения индексации в том, что индексы лежат в небольшом диапазоне, за счет этого они хорошо будут сжиматься тем же энтропийным кодированием (без потерь).

**4-й шаг.** Сжатие известным статистическим алгоритмом.

### Экспериментальные исследования

Для определения эффективности предлагаемого алгоритма с точки зрения степени сжатия, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов на гиперспектральных АИ (Avisis) (таблица).

Таблица

Характеристики тестовых гиперспектральных АИ

Количество каналов	Размер изображения	Размер (байт)	Количество каналов	Размер изображения	Размер (байт)
50	50×50	540800	150	300×300	54360600
50	100×100	2040200	150	400×400	96480600
50	200×200	8080200	150	614×512	188620800
50	300×300	18120200	200	50×50	2163200
50	400×400	32160200	200	100×100	8160800
50	614×512	62873600	200	200×200	32320800
100	50×50	1081600	200	300×300	72480800
100	100×100	4080400	200	400×400	128640800
100	200×200	16160400	200	614×512	251494400
100	300×300	36240400	224	50×50	2421632
100	400×400	64320400	224	100×100	9140096
100	614×512	125747200	224	200×200	36199296
150	50×50	1622400	224	300×300	81178496
150	100×100	6120600	224	400×400	144077696
150	200×200	24240600	224	614×512	281673728

На рис. 1, *а* и *б* представлены алгоритмы сжатия при варьируемом количестве каналов  $K$  и геометрическим размере  $R$  (50×50) в сравнении с универсальными архиваторами Winrar, 7Z. Показатели степени сжатия на 25 % выше, чем универсальные алгоритмы, за счет учета межканальной корреляции и индексированного кодирования.

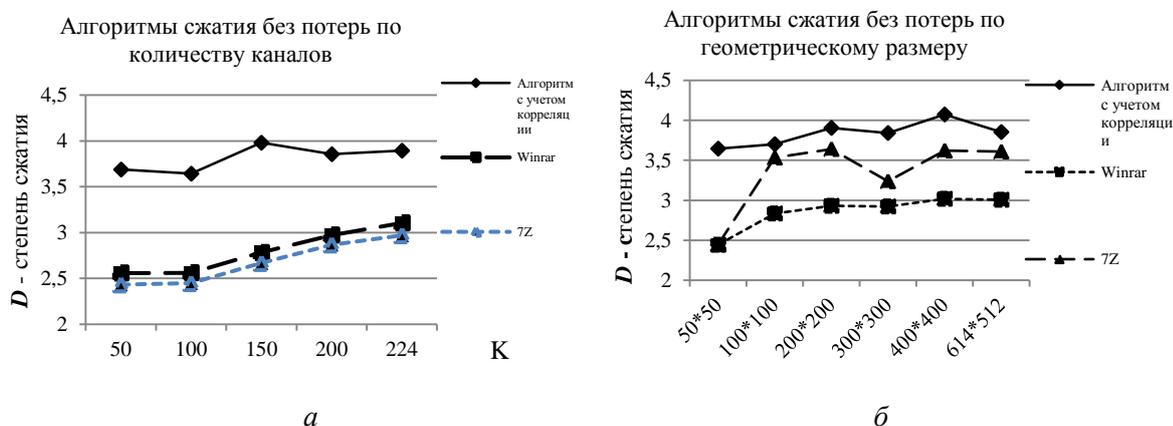
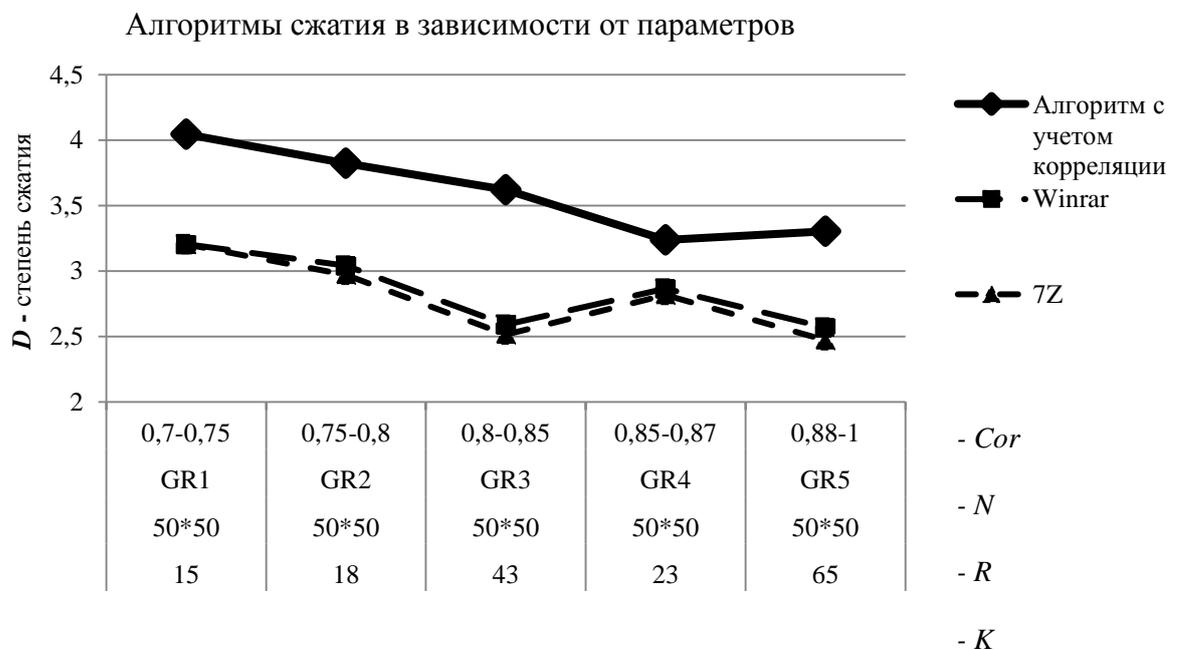


Рис. 1. *а* – сравнение алгоритмов по  $K$ ; *б* – сравнение алгоритмов по  $R$

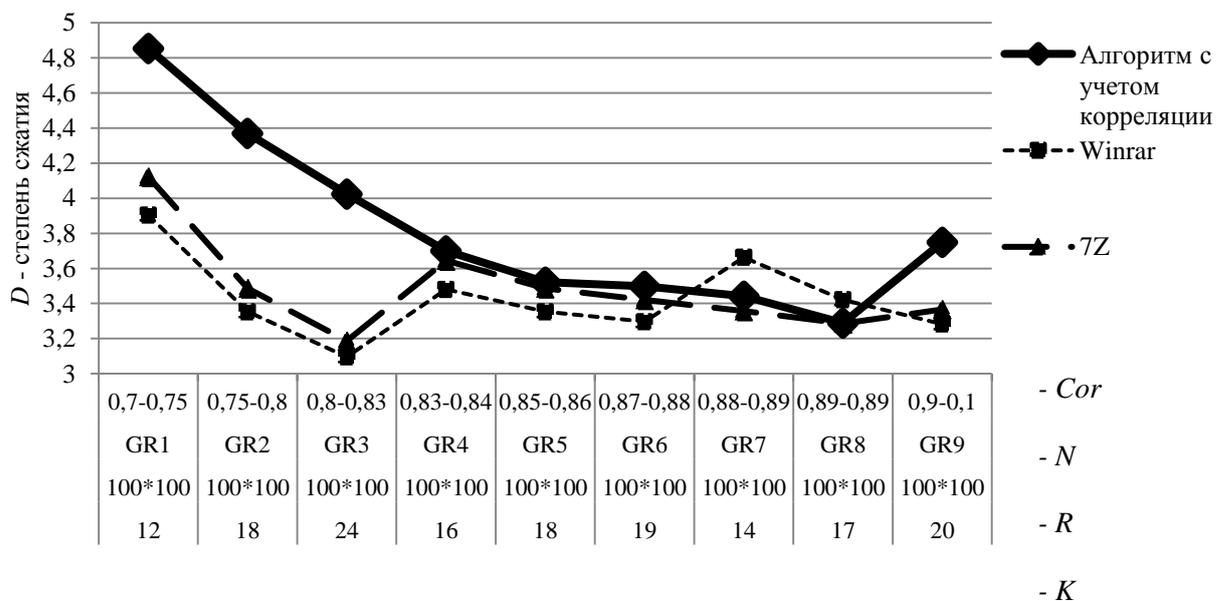
Как видно из рис. 1, б, показатели степени алгоритма сжатия  $I$  превосходят в степени сжатия архиваторы *WinRAR*, *7Z* более, чем на 60 %.

Для повышения эффективности применяемого алгоритма проведены эксперименты по следующим параметрам:  $Cor$  – заданное значение корреляции;  $N$  – номер группы каналов АИ;  $R$  – размер каналов АИ;  $K$  – количество каналов в группе  $N$ .

На рис. 2, а, б представлены зависимости от различных параметров проведенных экспериментов, показывающих модификации степени сжатия, например при  $N = 5 (D \geq 4)$ ,  $N = 9 (D \geq 4)$ .

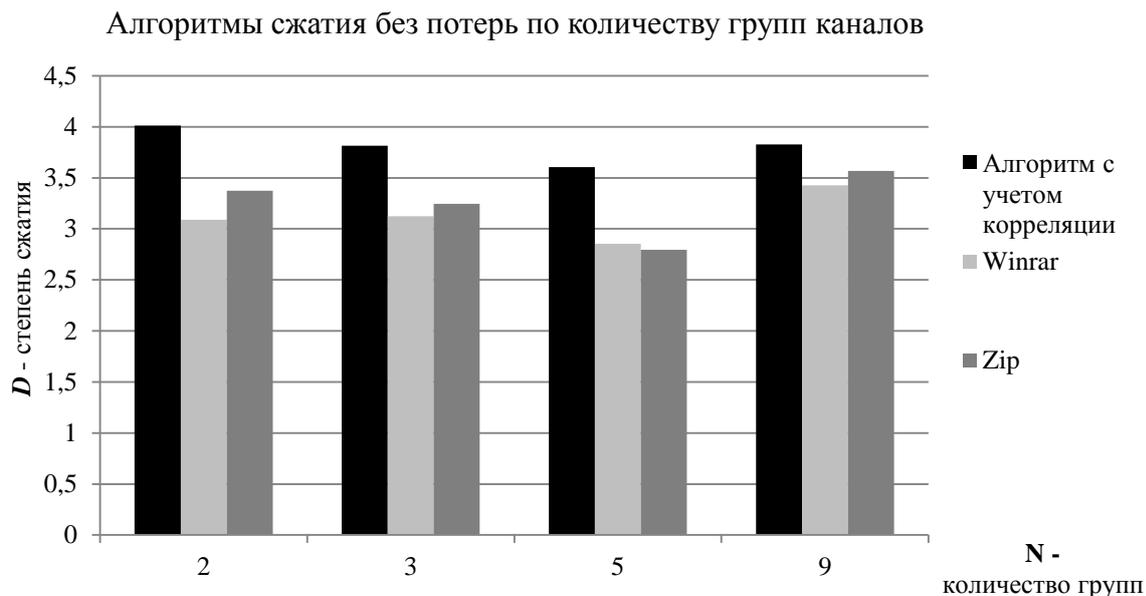


а



б

Рис. 2. Сравнение алгоритмов сжатия без потерь: а – при  $N = 5$ ; б – при  $N = 9$



**Рис. 3. Сравнение алгоритмов сжатия  $N = 2, 3, 5$  и  $9$**

Из рис. 3 видно, что зависимости степени сжатия алгоритмов с учетом корреляции и от количества групп выше. Это свидетельствует о том, что вычитание (разностные преобразования) эффективны при выборе большого спектра каналов, тогда значения разностей будут наименьшими, что позволит хранить исходные каналы в наименьшем объеме на диске.

### Заключение

Алгоритм сжатия без потерь с учетом междиановой корреляции позволяет повысить степень сжатия до ( $D = 5$ ), чем в универсальных архиваторах. Предлагаемый подход нахождения наилучших групп каналов при заданном значении корреляции повышает эффективность применения этапа вычитания каналов (разностного преобразования). Полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ позволяют предположить эффективность применения этапов индексированного кодирования.

### Список литературы

1. Yuan L., Jianping L. and Ke G. Lossless compression of hyperspectral images using hybrid context prediction // OPTICS EXPRESS. 2012. V. 20, № 7. P. 8199–8206.
2. Замятин А. В., Сарина А. Ж. Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учетом байтовой обработки и междиановой корреляции // Прикладная информатика. 2013. № 5 (47). С. 37–42.
3. Changguo Li, and Ke Guo. Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Three-Stage Prediction with Adaptive Search Threshold // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2014. V. 7, № 3. P. 305–316.
4. Ayman Ahmed, Salwa ElRamly & Mohamed El. Sharkawy. Hyperspectral Data Compression Using Weighted Spatial-Spectral Lossless Coding Technique // International Journal of Image Processing. 2012. V. 6. Is. 6. P. 468–477.
5. Changguo Li and Ke Guo. Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Three-Stage Prediction with Adaptive Search Threshold // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2014. V. 7, № 3. P. 305–316.

**А. Н. Сафонова**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

## **КЛАССИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГАУССА**

Разработан алгоритм классификации сельскохозяйственных культур с применением процессов Гаусса для анализа временных рядов вегетационного индекса NDVI по данным спутника Landsat 8. В алгоритме используется регрессия с нулевым средним значением и квадратом экспоненциального ядра. Описана методика классификации и приведен пример распознавания видов культур. Дана оценка точности определения культур разработанным классификатором.

*Ключевые слова:* процессы Гаусса, регрессия, классификация, Landsat, дистанционное зондирование Земли.

### **Введение**

Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга агрокультурного сектора позволяет контролировать площади пахотных земель и различных культур, произрастающих на нем. В частности, с использованием спутниковой информации, собранной в разные периоды времени можно отслеживать изменения состояния растительности и оценивать темпы роста и тип культуры [1]. Существует несколько методов классификации изображений для анализа сельскохозяйственных земель. Наиболее широко применяемые методы – метод максимального правдоподобия (MLS) и метод опорных векторов (SVM). Оба метода демонстрируют неплохие результаты с использованием спутниковой информации Landsat, например, в работе [2] с использованием первого метода точность классификации нескольких классов составляет 93 %, и 78 % вторым методом. Также существуют и иные результаты, так, например, в работе [3] с использованием метода MLS точность классификации общего класса агрокультур составила около 45 % и 77 % методом SVM. Согласно [4], общая точность классификации нескольких классов (пахотные культуры, зерновые, рапс, корнеплоды, сад, лес, город) составила 62 % методом MLS и 64 % – по методу SVM. Однако точность этих методов не всегда удовлетворительна для конкретных приложений и снимков, что приводит к поиску новых методов классификации.

Целью данной работы является реализация классического гауссовского процесса с использованием временных рядов пахотных земель по данным спутника Landsat для проведения классификации видов сельскохозяйственных культур на исследуемых участках.

### **Исследуемая область**

Исходной информацией являются данные американского спутника Landsat 8, снимающего до 400 сцен ежедневно [5]. В качестве обучающего набора использовались безоблачные снимки в периоды активной вегетации за 2015–2016 годы с уровнем

обработки 1Т (коррекция рельефа) и разрешением 8071×8161 пикселей. Изображения использовались в формате GEOTIFF с проекцией UTM в системе координат WGS.

Исследуемыми участками являются территории Сухобузимского района, расположенного в центральной части Красноярского края России с общей площадью в 5,612 тыс. км<sup>2</sup>. Обучаемая территория составляет 219×196 пикселей или примерно 16 км<sup>2</sup> площади на земной поверхности. Объектом исследования являются сельскохозяйственные культуры ОАО Учхоз «Миндерлинское» и ЗАО Племзавод «Таежный»: ячмень, пшеница, однолетние травы, многолетние травы. Тестовая территория составляющие 546×627 пикселей, что соответствует площади на земной поверхности размером 135 км<sup>2</sup> (рис. 1).

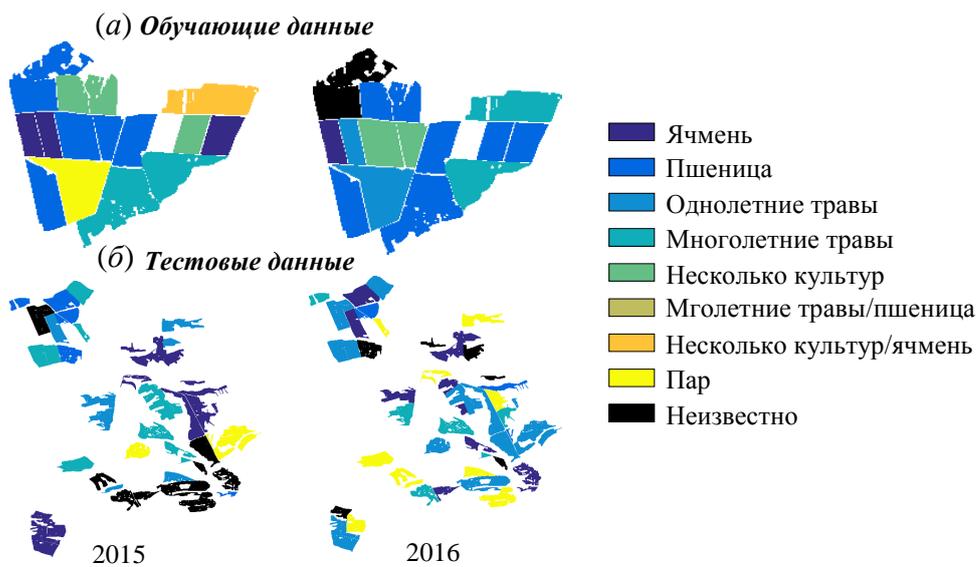


Рис. 1. Карты полей за 2015–2016 годы: а – ОАО Учхоз «Миндерлинское»; б – ЗАО Племзавод «Таежный»

Верификация производилась на основе полевых данных, представленных на геоинформационном портале ИКИТ СФУ [6]. Предварительная обработка спутниковой и наземной информации была выполнена с помощью программного продукта ENVI 5.2, а также QGIS 2.8.2. Предобработка состояла из нескольких шагов: объединение спектральных каналов; создание маски для всех участков на вегетационной карте полей; обрезка космических снимков по созданным маскам. На данном этапе было подготовлено 12 разновременных космических снимков для обучения и 9 – в качестве тестовых данных.

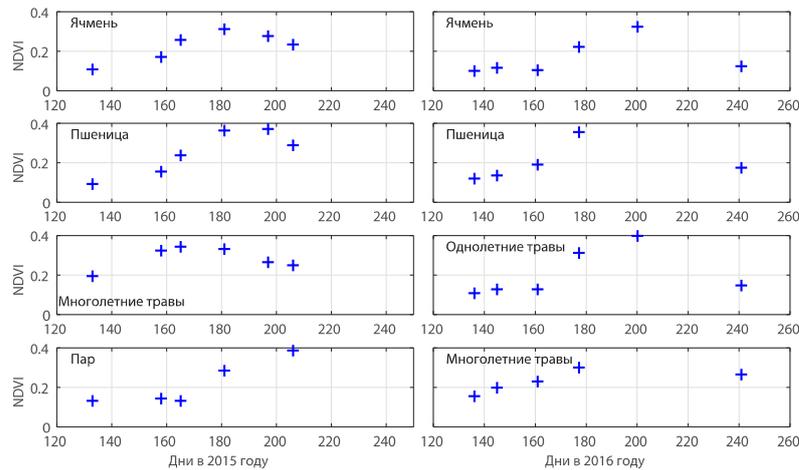
Алгоритм классификации базируется на использовании нормализованного относительного индекса растительности (NDVI). В качестве примера показатели NDVI всех пикселей снимка разных классов обучающего набора представлены на рис. 2.

Таким образом, на рис. 2 синие крестики представляют собой усредненные значения NDVI для каждой культуры за 2015 и 2016 годы. Временной ход каждой культуры будет различен, значение NDVI близкое к 0,6 для снимков Landsat соответствует области снимка с густым растительным покровом, а значения до 0,3 – областям со смешанным покровом, с незрелой растительностью или окончанием жизненного цикла культур.

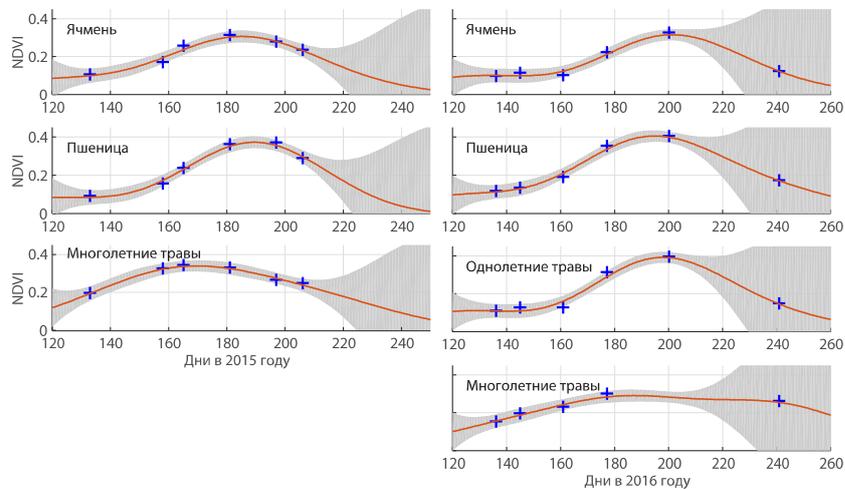
### Регрессия ГП

Далее мы использовали регрессию гауссовских случайных процессов (ГП) для моделирования временной зависимости данных, так как ГП являются

непараметрическими вероятностными моделями, которые хорошо подходят для моделирования временных рядов [7; 8]. Для этого построили временные ряды вида  $f(t) \sim GP(0, k(t, t))$ , которые взяты из ГП с нулевым средним значением и квадратом экспоненциального ядра ( $k$ ). Очевидно, что отклонения NDVI от одного дня к другому должны быть небольшими, следовательно, среднее значение и параметры ядра выбираются вручную. ГП содержат параметр шума, определяющие, насколько жесткой должна быть подгонка заданной функции к точкам данных. Серые области показывают неопределенность регрессии (рис. 3). Видно, что области с меньшей плотностью данных имеют большую неопределенность.



**Рис. 2. График усредненного хода NDVI для обучающего набора данных**



**Рис. 3. Обученная модель регрессии ГП за 2015–2016 годы**

Таким образом, функция оценки, связанная с точками во времени ( $t$ ), извлекает из распределения Гаусса мультислучайную величину (1):

$$p(y(t)) = N(\mu(x), K(t, t')), \quad (1)$$

где  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  – значения зависимых функций, вычисляемых в точках  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $\mu$  – средняя функция. Данная модель ГП близка к линейной регрессионной модели (2):

$$K(t, t) = \begin{pmatrix} k(t_1, t_1) & k(t_1, t_2) & \dots & k(t_1, t_n) \\ k(t_2, t_1) & k(t_2, t_2) & \dots & k(t_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(t_m, t_1) & k(t_m, t_2) & \dots & k(t_m, t_n) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При оценке распределения мы определяем среднюю функцию и дисперсию для многомерных ГП обучающих наблюдений, используя стандартные результаты ГП [3].

$$m' = \mu(x') + K(x', x)K(x, x)^{-1}(y(x) - \mu(x)), \quad (3)$$

$$C' = K(x', x') - K(x', x)K(x, x)^{-1}K(x, x'). \quad (4)$$

Функциональной формой функции ядра является квадратичная экспоненциальная функция, включающая набор гиперпараметров, и имеющая следующий вид (5) [7]:

$$k(t_i, t_j) = h^2 \exp \left[ - \left( \frac{t_i - t_j}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $h$  – амплитуда выходных данных;  $\lambda$  – входной гиперпараметр времени, который контролирует гладкость функции.

### Классификация

Далее мы построили простой классификатор, производительность которого прямо пропорциональна точности полученных данных. Временные данные из каждой области в новом изображении сравниваются с полученной регрессионной моделью. Классификатор присваивает класс, который дает самую низкую среднеквадратичную ошибку между контрольными точками и значениями регрессии в этих временных точках для каждой культуры. Следовательно, мы имеем (6, 7):

$$class = \arg \min \Delta_k, \quad (6)$$

$$\Delta_k = \sum_i d_{ik}^2, \quad (7)$$

где  $d$  – расстояние от обучающей модели для времени ( $i$ ) до того же временного значения в тестовой модели. На рис. 4 представлена классификация ГП за 2015–2016 годы.

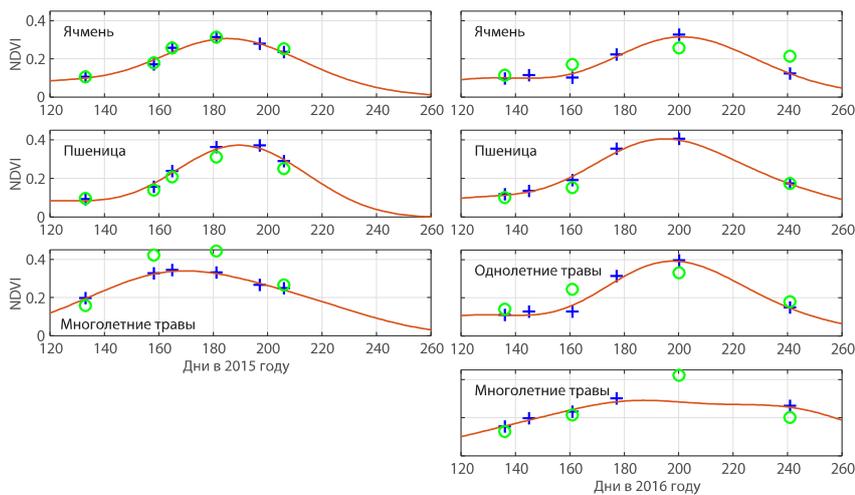


Рис. 4. Классификация ГП по усредненным данным NDVI за 2015–2016 годы

Следует заметить, что значения тестовых данных (зеленые кружки) аналогичны значениям, полученным для обучающего набора, что приводит к высокой точности классификации. Тем не менее для 2015 года наблюдаются более высокие значения NDVI для многолетних трав, в отличие от 2016 года, по причине включения нескольких типов культур, которые могут иметь разные профили NDVI. Кроме того, мы имеем отсутствующие данные в 2016 года этого же класса, которые расходятся с кривой обучения.

### Результаты исследования

В работе была проведена классификация сельскохозяйственных культур на основе вегетационного индекса NDVI, временной ход которого был получен из спутниковых снимков Landsat, что является наиболее важным признаком, влияющим на общую точность классификации методом Гаусса. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Матрица неопределенности и общей точности за 2015 год

Класс		Тестовые данные			
		Ячмень	Пшеница	Многолетние травы	Всего
Обучающие данные	Ячмень	12	4	0	16
	Пшеница	4	4	0	8
	Многолетние травы	0	0	12	12
	Всего	16	8	12	36

Отметим, что в 2015 году у нас не было данных для обучения по однолетним травам, поэтому в данном случае мы рассматривали только 3 класса. Созданный алгоритм всегда отличал многолетние травы от ячменя и пшеницы, хотя последние два в свою очередь часто путаются по причине аналогичного профиля NDVI, что говорит о необходимости использования дополнительной информации, такой как: погода, почва и др. Таким образом, за 2015 год выявлена общая точность равная 77,78 %.

Таблица 2

Матрица неопределенности и общей точности за 2016 год

Класс		Тестовые данные				
		Ячмень	Пшеница	Однолетние травы	Многолетние травы	Всего
Обучающие данные	Ячмень	12	4	0	0	16
	Пшеница	4	4	0	0	8
	Однолетние травы	0	6	0	1	7
	Многолетние травы	0	0	0	12	12
	Всего	16	14	0	13	43

По результатам табл. 2 общая точность равна 65,12 %. В целом только первый класс имеет удовлетворительную точность. Отметим, что пшеница часто относится к кладовому ячменю, поэтому, как и в предыдущем случае, здесь возникает необходимость в использовании дополнительных данных. Кроме того, средние профили NDVI для 2016 года, по-видимому, заметно отличаются от результирующей регрессии, как показано на рис. 4. Значения NDVI следует проверять индивидуально для обнаружения ошибок сбора данных или наличия облачности, что может ухудшить производительность алгоритма.

## **Заключение**

Проведены исследования с использованием процессов Гаусса в задачах классификации сельскохозяйственных культур по данным спутника Landsat. Результаты исследования показывают, что ГП позволяет с точностью в 77 % распознать такие культуры, как ячмень и многолетние травы. Однако существуют также и проблемы в классификации, а именно, сложность в распознавании отдельных видов растительности в связи с идентичным временным ходом NDVI, а также огромным наличием разновидностей, принадлежащих одному классу. Следует также отметить, что отдельный анализ, проведенный путем объединения нескольких классов, а именно ячменя и пшеницы в класс – яровые культуры, показал, что общая точность классификации методом Гаусса составляет 97 % в 2015 году и 76 % в 2016 году. Таким образом, следует добавить, что ГП имеет большие перспективы в его дальнейшем использовании в задачах классификации объектов по данным ДЗЗ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №16-11-00007).*

## **Список литературы**

1. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning // Springer. 2006.
2. Devadas R., Denham R. J., Pringle M. Support vector machine classification of object-based data for crop mapping, using multi-temporal Landsat imagery // XXII Congress of ISPRS, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
3. Topaloglu R. H., Sertel E., Musaoglu N. Assessment of classification accuracies of sentinel-2 and landsat-8 data for land cover / use mapping // XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague.
4. Waske B., Benediktsson J.A. Fusion of Support Vector Machines for Classification of Multisensor Data // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. Vol. 45, No. 12. December, 2007.
5. Геологическая служба США. URL: <https://www.usgs.gov/>.
6. Система сельскохозяйственного мониторинга ИКИТ СФУ. URL: <http://activemap.ikit.sfu-kras.ru/>.
7. Rasmussen C. E., Williams C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning // London, 2006.
8. Gaussian processes for time-series modeling / S. Roberts, M. Osborne, M. Ebdon, S. Reece, N. Gibson and S. Aigrain // Home | Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 371, January 4, 2013.

**В. С. Сидорова**

Институт вычислительной математики и математической геофизики  
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск  
e-mail: svcs@oii.sccc.ru

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ СРАВНЕНИЕ КЛАСТЕРНЫХ КАРТ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ, И ТАКСАЦИОННЫХ КАРТ ЛЕСА**

Рассматривается возможность сравнения карт по каппе Коэна. Сравниваются карты, полученные иерархическим гистограммным алгоритмом данных ДЗЗ с заданием предельной отделимости кластеров, и карты, добытые лесоводами с помощью наземной таксации.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, кластеризация, многомерная гистограмма, кластерная делимость, каппа Коэна.

Оценить результат кластеризации можно, сравнивая полученную карту кластеров с картами, построенными другими методами. Каппа Коэна может быть использована для оценки согласованности между двумя оценщиками, классифицирующими  $n$  объектов по  $s$  категориям. Применим каппу для сравнения двух карт, построенных разными методами. Сравним цифровую карту, построенную разработанным иерархическим делимым гистограммным кластерным алгоритмом с заданием отделимости кластеров  $d$  для данных ДЗЗ и карту наземной таксации того же участка земной поверхности.

На каждом этапе иерархии кластерного алгоритма используется гистограммный метод Нарендры [1], который разделяет пространство признаков по унимодальным кластерам. Этот быстрый непараметрический алгоритм позволяет полностью автоматизировать процесс кластеризации с целью распознавания данных. Он не требует а priori задания числа кластеров и их формы. Достоинством этого алгоритма является также то, что в оперативной памяти хранятся лишь различные присутствующие вектора в виде определенным образом упорядоченного списка различных векторов и их гистограмма, что обеспечивает линейную зависимость алгоритма от количества этих различных векторов. Предложенный иерархический алгоритм [2] автоматизирует процесс выбора детальности, учитывая делимость кластеров, причем для разных областей данных будет получена свой порог наибольшей детальности, обеспечивающей заданную отделимость кластеров  $d$ . Для оценки отделимости используется ранее предложенная автором мера [3]. Мера отделимости для отдельного унимодального кластера  $m^j(n)$  (1), и мера качества распределения в целом  $m(n)$  по  $K(n)$  кластерам (2):

$$m^j(n) = \frac{1}{B^j(n) * H^j(n)} \sum_{i=1}^{B^j(n)} h_i^j(n), \quad (1)$$

$$m(n) = \frac{1}{K(n)} \sum_{j=1}^{K(n)} m^j(n), \quad (2)$$

где  $n$  – число уровней квантования пространства признаков;  $h_i^j(n)$  – значение гистограммы в  $i$ -й точке границы кластера  $j$ ;  $B^j(n)$  – число точек границы кластера;  $H^j(n)$  – максимальное значение гистограммы.

Всегда  $m^j(n) \leq 1$  и  $m(n) \leq 1$ . Ценность этих мер в том, что они позволяют сравнивать статистические распределения с тесно расположенными унимодальными кластерам, когда на их границах много общих векторов. Эти меры удовлетворяют условиям мер делимости [4]. Кроме того, эти меры легко вычисляются, так как сравнивают скалярные значения гистограммы в центре и на границах кластеров. Границы кластеров легко находятся, используя списки соседей векторов, построенных как составная часть алгоритма Нарендры. Устройство иерархического алгоритма таково: начиная с малого число уровней квантования  $n$  и постепенно его увеличивая на единицу, определяется распределение с наилучшим разделением полученных кластеров. Когда этот процесс прекратится по числу этапов иерархии или, исходя из физических соображений, то осуществляется автоматический анализ и возврат к тем деталям, на которых кластеры были разделены по порогу  $d$ . Таким образом осуществляется дифференцированный подход к различным областям данных, имеющих различную природу и различную делимость кластеров. Исследованиями установлено, что для многоспектральных данных ДЗЗ с увеличением детальности существует предельная детальность, выше которой делимость кластеров становится хуже. Таким образом, задавая предельную делимость кластеров  $d$ , избегаем получения лишней дробности и получаем существенно меньше кластеров, чем прямым алгоритмом. Если используются статистические текстурные признаки, то алгоритм кластеризации модифицируется, так как возникает проблема появления «узких» кластеров на границах текстур, а также вопрос определения размера блока для формирования статистического признака текстуры [5]. Внутри кластеров может быть осуществлен переход в собственное пространство для сокращения размерности [6]. Затем строится кластерная карта, которая является по сути картой глобальной сегментации данных.

Сравним цифровую карту, построенную разработанным иерархическим делимым гистограммным кластерным алгоритмом с заданием делимости кластеров  $d$  для данных ДЗЗ и карту наземной таксации того же участка земной поверхности.

Таблица 1 предназначена для вычисления каппы Коэна – меры согласованности между двумя категориальными переменными  $X$  (по горизонтали классы таксационной таблицы) и  $Y$  (по вертикали кластеры) [7].

Таблица

Таблица сопряженности

	1	2	...	S	
1	11	12	...	1S	1
2	21	22	...	2S	2
...	...	...	...	...	...
S	S1	S2	...	SS	S
	1	2	...	S	

$$\text{Справедливы равенства } \sum_{i=1}^s n_{ij} = n_j, \quad \sum_{j=1}^s n_{ij} = m_i, \quad \sum_{i=1}^s m_i = n.$$

Наблюдаемая согласованность между  $X$  и  $Y$ :

$$P_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^s n_{ii},$$

ожидаемая вероятность случайной согласованности:

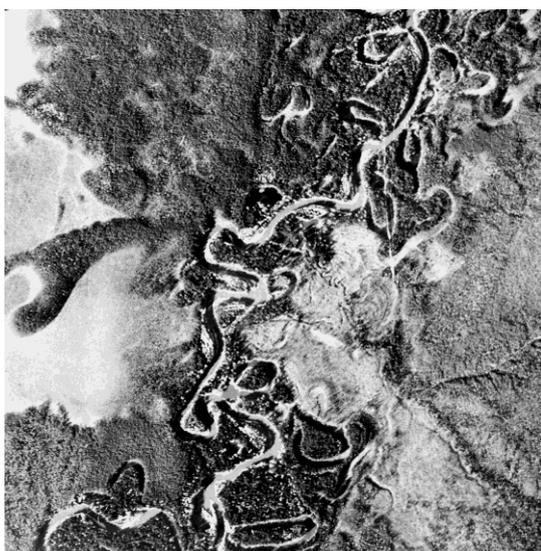
$$P_e = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^s n_i m_i,$$

Каппа Коэна задается как

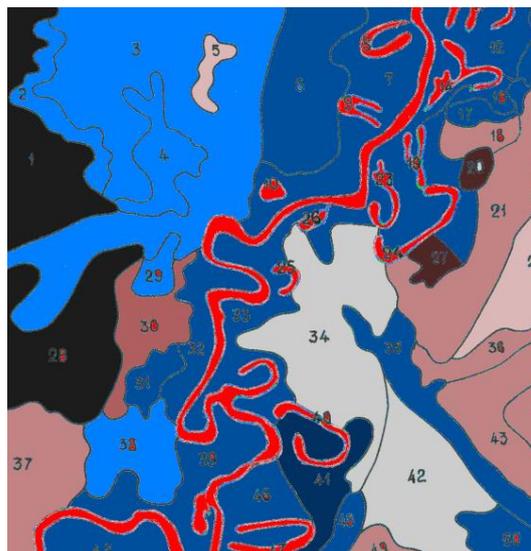
$$k = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}.$$

Если оценщики полностью согласованны, тогда  $k = 1$ .

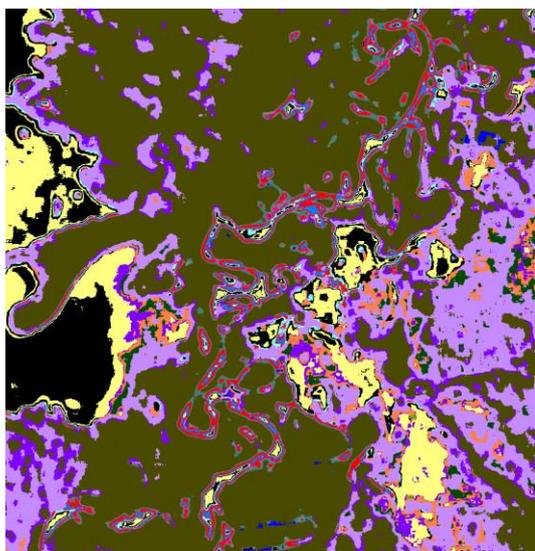
При  $k > 0,75$  согласованность считается высокой, при  $0,4 < k < 0,75$  – хорошей, иначе – плохой.



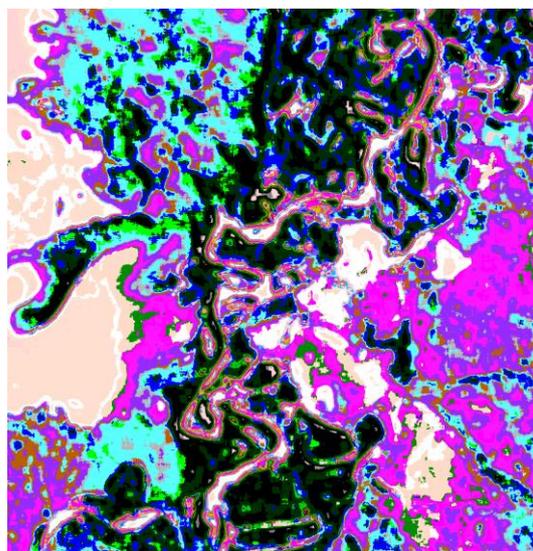
*а*



*б*



*в*



*г*

**Рисунок. Исходный снимок (а); карта, представленная лесоводами (б); компьютерная карта, построенная кластерным алгоритмом, 7 этапов иерархии (в); тем же алгоритмом с 14 этапами (г)**

На рисунке, *а* представлено исходное эквализованное черно-белое изображение лесного ландшафта, полученное с самолета, масштаба 1:50 000. Эквализация оставила 30 уровней из 256. На рисунке, *б* – карта, полученная с применением наземной таксации. Каждому выделу с номером на карте рисунка, *б* соотносится его описание по преобладающей породе. Здесь представлены кедровники и сосняки различных возрастных фаз, а также березняки II фазы развития, болота и немного (две 27 и 20) вырубок. Кедровники окрашены синими тонами, сосняки коричневыми и розовыми, березняки белыми, болота и вырубки черными. Сверху вниз протекает речка, сопровождаемая старицами (красные).

Известно, что естественные леса характеризуются ярко выраженной текстурой при данном масштабе съемки. Вот в качестве признаков используются три признака системы SAR: средний тон, среднее отклонение, и признак, характеризующий зернистость текстуры [8]. Эти три признака используются в гистограммном иерархическом алгоритме, описанном выше. На рисунке, *в* при заданной отделимости кластера  $d = 0,15$  (всегда  $0 < d < 1$ ) представлена кластеризация 7 этапов иерархии. Получено восемь кластеров. На этом этапе иерархии кластеры, относящиеся к соснякам и кедровникам, полностью разделились. Также выделились березняки и болота.

Каппа Коэна, характеризующая степень соответствия классификаций, равна 0,91, что считается очень хорошим показателем согласованности. На рисунке, *г* изображена полученная карта для 14 этапов иерархии. Здесь кластеры разделились по возрастам сообществ. Каппа Коэна равна 0,83.

*Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы 1.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).*

#### **Список литературы**

1. Narendra P. M. and Goldberg M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT // Pattern Recognition. 1977. 9. P. 207–215.
2. Sidorova V. S. Detecting Clusters of Specified Separability for Multispectral Data on Various Hierarchical Levels // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014. V. 24, № 1. P. 151–155.
3. Сидорова В. С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом // Автометрия. 2007. Т. 43, № 1. С. 37–43.
4. Halkidi M., Batistakis Y. and Vazirgiannis M. // Journal of Intelligent Information Systems. 2001. № 17 (2–3). P. 107–132.
5. Sidorova V. S. Hierarchical Clusterization by Predetermined Cluster Separability // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. V. 25, № 3. P. 541–546.
6. Сидорова В.С. Иерархический гистограммный кластерный алгоритм с выбором размерности пространства спектральных признаков для данных дистанционного зондирования Земли. Сокращение размерности данных кластерным алгоритмом // Перспективные направления развития современной науки. Евразийское Научное Объединение. 2016. Т. 1, № 3 (15). С. 58–61.
7. Грауэр Л. В., Архипова О. А. // Непараметрические критерии независимости. 2014. Санкт-Петербург – CS Center, 1/30. URL: [https://compscicenter.ru/media/slides/.../2014\\_03\\_28\\_math\\_stat\\_2014\\_spring\\_1.pdf](https://compscicenter.ru/media/slides/.../2014_03_28_math_stat_2014_spring_1.pdf).
8. Sidorova V. S. Unsupervised Classification of Forest's Image by Texture Model Features // Pattern Recognition and Image Analysis. 2009. V. 19, № 4. P. 698–703.

Д. Н. Тимофеев<sup>(1, 2)</sup>, В. А. Кочнев<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>ООО фирма «Космическая Технология», Железногорск

<sup>(2)</sup>НПОПИМ, Железногорск

e-mail: timofeev.dmitriyy@rambler.ru

<sup>(3)</sup>Институт вычислительного моделирования Красноярского научного центра  
Сибирского отделения Российской академии наук, ИВМ СО РАН, Красноярск

e-mail: kochnev@icm.krasn.ru

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РЕГИОНАЛЬНОГО СОБЫТИЯ ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА 30 ИЮНЯ 1908 ГОДА

Ряд явлений, определяемых ранее как падения космических тел, произошли от выбросов из глубин Земли и взрывов природного газа. Такие явления неоднократно наблюдались и описаны в научной литературе. Поскольку явления опасны, необходим постоянный спутниковый контроль таких выбросов.

*Ключевые слова:* взрыв, Тунгусский метеорит, зондирование, газ, болид.

Анализ Тунгусского события показал, что это был взрыв природного газа. Такая концепция была опубликована в 1984 году [1]. В статье было сделано предположение, что в районе Тунгусского события в глубинах Земли залегают месторождения газа, который частично был выброшен на поверхность и произвел наблюдавшиеся явления. Наблюдавшийся в событии болид являлся волной детонации проходящей по шлейфу смеси газа с воздухом. С тех пор эта концепция подтвердилась [2].

В последующие десятилетия в районе Тунгусского события были найдены месторождения природного газа (рис. 1).



**Рис. 1. Месторождения нефтегазоконденсата и места Тунгусских взрывов:**

**1 – Куликовский вывал; 2 – вывал на хребте Чувар;**

**3 – Шишковский вывал [3] доработано**

Ранее наблюдались самопроизвольные выбросы природного газа, сопровождавшиеся явлением болида, когда по шлейфу проходит огненный фронт реакции взаимодействия газа с воздухом, что отражено в научной литературе.

Очевидцем события был геолог Абих, который наблюдал и сам выброс, и болид детонации, перемещавшийся по шлейфу [4].

Впоследствии геологом Скубловым было доказано, что из воронок, обнаруженных в районе Тунгусских событий, действительно происходили выбросы газа. Это происходит периодически уже на протяжении нескольких тысяч лет [5–7].

За прошедшие со времен Тунгусских событий годы происходили множество аналогичных событий. Эти события ошибочно принимались за падение космических тел. Болиды от детонации шлейфов газов отличаются от болидов, вызванных падением космических тел отсутствием пылевого следа от уноса частиц с падающего раскаленного объекта, траекторией, у газовых болидов траектории практически параллельна поверхности Земли, а также отсутствием самого упавшего метеорита. К таким явлениям относятся Витимский болид, Чулымский болид, Челябинский болид, рис. 2.



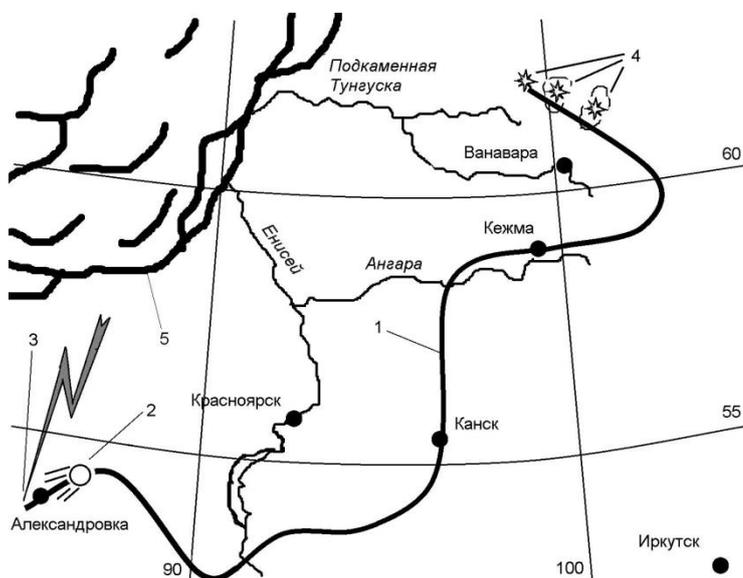
**Рис. 2. Болиды: 1, 2 – фотографии Челябинского газового болида; 3 – падение реального космического тела, Сихотэ-Алинского метеорита 12 февраля 1947 года в 10 ч 38 мин, г. Иман, Приморский край. Рисунок художника П. И. Медведева – очевидца этого события. Масса осколков 31 тонна**

При поднятии газа из глубин Земли, сопровождающегося его расширением от снижения давления, газ в случае пород с малой проницаемостью образует пустоты значительного объема. Своды таких пустот постепенно обрушаются, и пустота поднимается к поверхности. Газ в пустоте под большим давлением и способен или лавинообразно выбрасываться на поверхность, или медленно просачиваться. На месте лавинообразного выброса газа из глубин Земли образуются воронки, а в случае медленного просачивания газа происходят обрушения сводов покрывки и провалы. Лавинообразные выбросы газа наблюдались 12.04.1991 у города Сасово Рязанской области (<http://insiderblogs.info/ekspedicii-v-sasovo-sasovskiy-fenomen/>), в марте 1999 года в Курской области ([http://esoreiter.ru/index.php?id=0504/140504\\_8.htm&dat=news&list=05.2004](http://esoreiter.ru/index.php?id=0504/140504_8.htm&dat=news&list=05.2004)), а в 2014 году на Ямале ([http://www.gazeta.ru/science/2015/03/04\\_a\\_6429325.shtml](http://www.gazeta.ru/science/2015/03/04_a_6429325.shtml)).

Из воды выбросы газа наблюдались 1927 году в процессе Ялтинского землетрясения, 11 ноября 2014 – на Азовском море, 2 августа 2007 года – в море у Сахалина после Невельского землетрясения.

В случае Тунгусского явления газ вырвался из глубин Земли в районе Куликовского болота, образовав несколько воронок. Шлейф газа за несколько суток протянулся до Алтайского края, а 30 июня 1908 года инициировалась детонация шлейфа, возможно, ударом молнии. Волна детонации, повторяя изгибы шлейфа, прошла в район Тунгуски, инициировав там взрывы скоплений газа (рис. 3). Перемещение яркого фронта волны детонации по газовому шлейфу и наблюдали как болид на протяжении от Алтая до Тунгусской котловины.

Явления газовых детонационных болидов ошибочно называют падением космических тел, поднимают ажиотаж и на таком неверном обосновании получают деньги для проведения «исследовательских работ», что до настоящего времени происходит как с Тунгусским явлением, так и Челябинским болидом. На базаре в Челябинске продавали камни, называя их обломками метеорита, из бюджета Челябинска освоили несколько миллионов за извлечение большого камня из озера, а более крупные комбинаторы на ошибочных основаниях получают деньги из бюджета страны для наблюдения за небом в поисках астероидов.



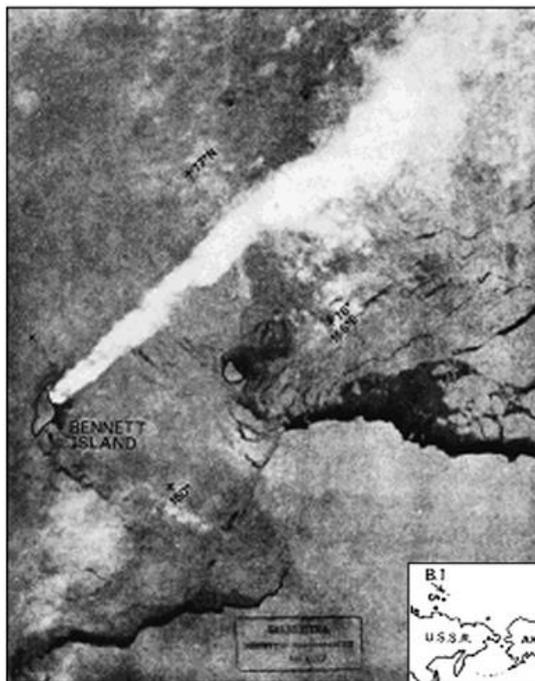
**Рис. 3. Траектория перемещения волны детонации по шлейфу (газового болида) и места Тунгусских взрывов: 1 – шлейф газа; 2 – болид (фронт детонационной волны); 3 – место инициирования шлейфа молнией; 4 – места основных взрывов; 5 – грозовой фронт**

Обязанностью ученых является донести людям информацию, откуда им угрожает реальная опасность. За последние 25 миллионов лет не было падений космических объектов на Землю, вызвавших катастрофические последствия. В то же время выбросы природных газов из глубин Земли привели к многочисленным жертвам. В числе этих жертв можно назвать сгоревшие города Садом и Гоморра на Мертвом море, город Мохенджо Дарро в Индии. В 1984 году в Камеруне на озере Ниос погибли 1 800 человек на озере Моноус – 37 человек. Под Уфой в 1989 году поезда Новосибирск-Адлер и Адлер Новосибирск попали в облако выброса газового конденсата из аварийного продуктопровода. Погибли 575 человек. В Курской области выброс газа в марте 1999 года произошел, образовав восемь воронок, одна из которых образовалась в 20 километрах от Курской АЭС. На месте восьмого выброса образовалась воронка диаметром около 40 и глубиной примерно 8 метров! Но такой выброс может произойти и под реакторным залом АЭС, и под плотиной ГЭС, под жилым домом вызвав катастрофические последствия. Не исключено, что ряд непонятных крушений самолетов произошел от попадания их в газовые шлейфы и произошедших из-за этих взрывов. Площадь вывала леса в тунгусской котловине в 1 250 км<sup>2</sup>, что показывает возможный масштаб катастрофы от взрыва облака газа вырвавшегося из глубин Земли.

Явление выхода газов опасное как для наземных объектов, так и для самолетов, поэтому газовые скопления и шлейфы необходимо своевременно обнаруживать и принимать меры, как это сейчас делается с обнаружением шлейфов вулканических газов, когда курсы самолетов меняют для облета опасных зон.

Одной из перспективных возможностей является установление контроля за распространением газовых шлейфов из космоса. Так, в 1983 году из космоса был обнаружен газовый шлейф на острове Беннета Россия.

Возможно, из космоса можно будет выявлять и техногенные аварии выброса газа из хранилищ или газопроводов.



**Рис. 4. Шлейф газа у острова Беннетта 18. 2. 1983 год. 10:48:46, (8535, NOAA-7)**

### **Заключение**

Системные космические наблюдения за выбросами газов позволят предотвратить возможные многочисленные жертвы.

### **Список литературы**

1. Тимофеев Д. Н. Космос или земля // Красноярский рабочий: газ. Красноярск. 01.09.1984. № 202 (19693).
2. Тимофеев Д. Н. Кочнев В.А. Геологические доказательства газовой природы Тунгусского взрыва 1908 г. // Седьмые научные чтения Ю. П. Булашевича Геодинамика, глубинное строение, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. ИГ УрО РАН Екатеринбург 2013. С. 263–265
3. Иванов Г. А. Кометный ледоход над Евразией // Тр. юбилейной междунар. науч. конф. «90 лет тунгусской проблемы». Россия 30 июня – 2 июля 1998 г. Красноярск: «Сиб. Центр», 2001. С. 104–110.
4. Раст Х. Вулканы и вулканизм. М.: Мир, 1982. С.344.
5. Геологические и минерало-геохимические особенности рыхлых и коренных пород из эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г. / Г. Т. Скублов, Ю. Б. Марин, С. Г. Скублов, Б. Ф. Бидюков, Л. Н. Логунова, В. В. Гембицкий, Е. С. Нечаев // Записки российского минералогического общества. 2010. № 1. С. 111–135.
6. Минерало-геохимические особенности коренных пород рыхлых отложений и катастрофных мхов участка Северное болото (район Тунгусской катастрофы 1908 г.) / Г. Т. Скублов, Ю. Б. Марин, С. Г. Скублов, Л. Н. Логунова, Е. С. Нечаев, А.А. Савичева // Записки российского минералогического общества. 2011. № 3. С. 120–138.
7. Скублов Г. Т. Криптовулканическая модель Тунгусского феномена: некоторые проблемы и дискуссионные вопросы. Феномен Тунгуски: на перекрестке идей. Второе столетие изучения Тунгусского события 1908 г. Новосибирск: ООО «Сити-пресс Бизнес», 2012. С. 306.

**С. В. Фомин<sup>(1)</sup>, А. В. Сорокин<sup>(1, 2)</sup>, Д. В. Харламов<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт физики им. акад. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

<sup>(2)</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск  
e-mail: rds@ksc.krasn.ru, sorav@iph.krasn.ru

## **КАЛИБРОВКА СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS В МОНИТОРИНГЕ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ**

Представлен метод калибровки прямых сигналов ГЛОНАСС и GPS вблизи поверхности Земли в мониторинге растительных и снежно-ледовых покровов. Дано описание базы калибровочных данных. Приведен пример использования метода калибровки в измерениях погонного коэффициента ослабления навигационных сигналов в лесном массиве.

*Ключевые слова:* сигналы, ГЛОНАСС, GPS, калибровка, база данных, мониторинг, земные покровы.

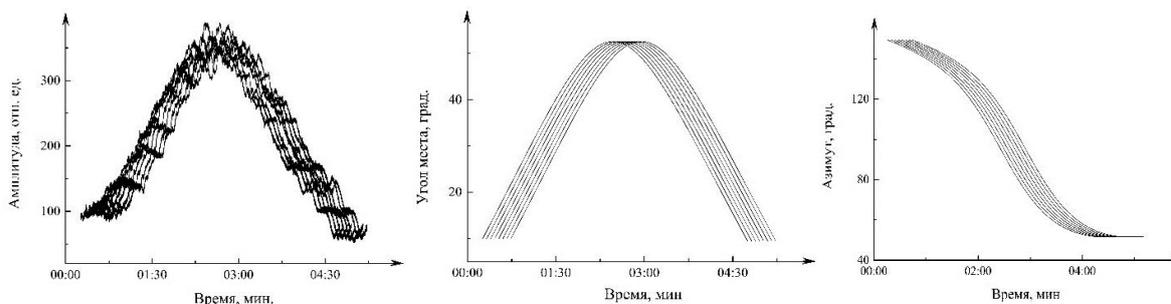
### **Введение**

Сигналы навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS активно используются в мониторинге земных покровов. Исследования в данном направлении определяют реальную перспективу создания эффективных методик и аппаратуры для непрерывного мониторинга океана, почвы и растительности на основе эффективного измерительного ресурса глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1].

Особенность регистрации изменений сигнала ГНСС в рефлектометрических измерениях и внутри лесных массивов заключается в зависимости амплитуды прямого сигнала от угла возвышения (угла места) спутника над горизонтом. Обработка данных измерений сигналов ГНСС после взаимодействия с земными покровами требует их калибровки на входе. Полный набор калибровочных функции для каждого спутника целесообразно получать непосредственно в процессе измерений дополнительной антенной либо использовать базу калибровочных данных (БКД) прямых сигналов, сформированную заранее. Оба подхода предполагают корректировку непосредственно в процессе проведения сеанса измерений, связанную с временной эволюцией характеристик трассы прохождения сигнала и приемо-передающей аппаратуры.

### **Калибровка сигналов ГНСС с использованием БКД**

Период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, и повторяемость трасс происходит раз в сутки с накоплением запаздывания прохождения по времени в 4 минуты. Зависимость амплитуд от времени  $A(T)$  принятых сигналов (рис. 1) подобны.



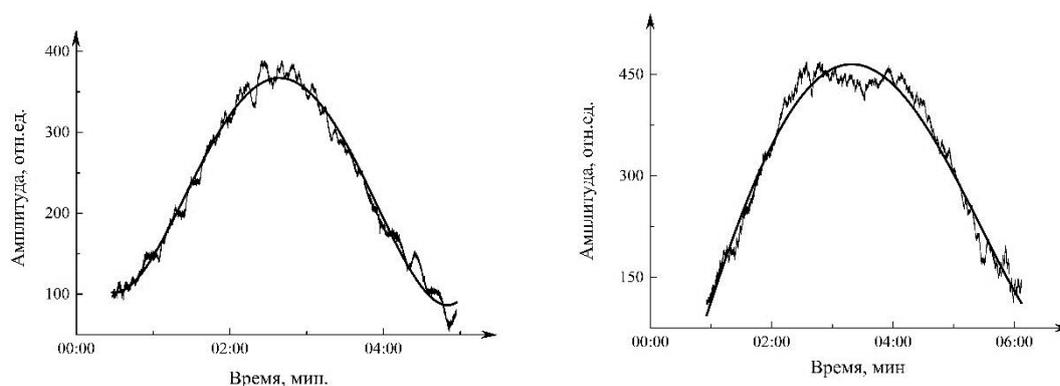
**Рис. 1. Временные зависимости характеристик сигналов GPS 1**

Повторяемость трасс движения аппаратов ГЛОНАС с периодом обращения 11 часов 46 минут составляет 7 суток 23 часа 27 минут более редкая. Создание БКД для группировки ГЛОНАСС более длительно, чем для группировки GPS. Действующие спутники обеих систем в период повторяемости имеют свой базовый набор одинаковых трасс.

Возможна аппроксимация временной зависимости амплитуды  $A(T)$  многочленами:

$$\text{GPS: } A(T) = 173,40 - 7577,31 * T + 235236,60 * T^2 - 1,81787 * 10^6 * T^3 + 4,10143 * 10^6 * T^4;$$

$$\text{ГЛОНАСС: } A(T) = -175,87 + 6919,13 * T + 11930,85 * T^2 - 288534,61 * T^3 + 598561,72 * T^4.$$



**Рис. 2. Графики функций  $A(T)$ : GPS 1 (слева); ГЛОНАСС 22 (справа)**

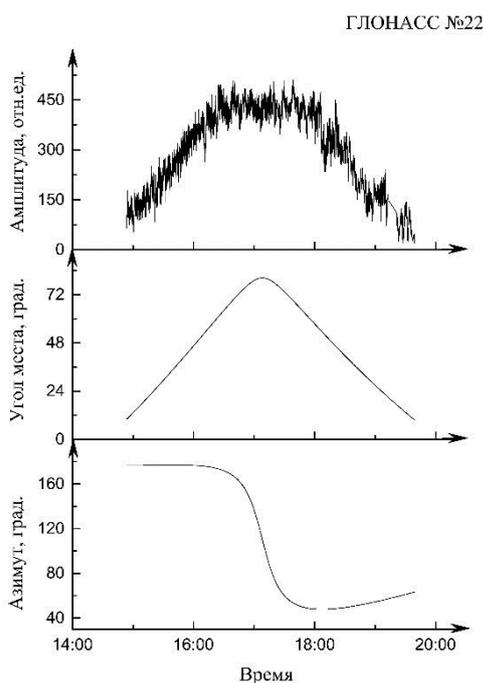
Временные зависимости амплитуд прямых сигналов учитывают особенности приемо-передающих систем GPS и ГЛОНАСС. На рис. 2 представлены примеры кривых для спутников GPS 1 и ГЛОНАСС 22. Численное представление этих функций с частотой регистрации сигналов в 1 Гц дает возможность проводить калибровку в цифровом формате. Создаваемые БКД не статичны и требуют периодического обновления, постоянного контроля орбитальных характеристик аппаратов, стабильности параметров приемника и уровня мощности сигналов ГНСС вблизи поверхности Земли.

В частности, при измерении ослабления сигнала в лесном пологом дипольной антенной с вертикальным расположением диполя или патч-антенной, ориентированной диаграммой направленности вертикально вверх, возможна регистрации сигнала с пространственной селекцией трасс зондирующего сигнала.

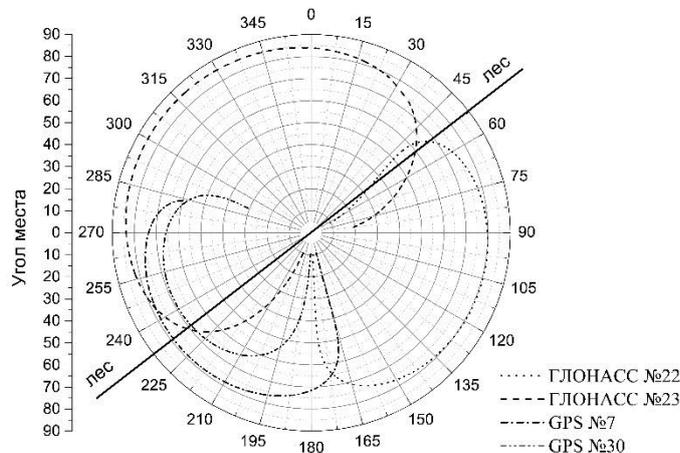
На рис. 3 и 4 представлены записи временной зависимости амплитуды, угла возвышения, азимута спутника ГЛОНАС 22 и полярная диаграмма угловых координат спутников ГЛОНАСС 22, 23, GPS 7 и GPS 30 для реального массива посадок сосны вблизи Института физики ФИЦ КНЦ СО РАН. В центре полярной диаграммы расположена антенна, направление границы лесного массива имеет азимут  $47^\circ$ . Расположение траекторий спутников демонстрирует вариант последовательной регистрации сигнала в открытом пространстве и лесном массиве.

Графическая иллюстрация алгоритма калибровки состоит из трех этапов. Первый: функция  $A(T)$  последовательной записи прямого сигнала (азимута  $170^\circ$ - $52^\circ$ ) и зондирующего лес – (азимут  $52^\circ$ - $46^\circ$ - $52^\circ$ ) по точке экстремума графика угла места совмещается с аппаратной функцией  $A_{22}(T)$  прямого сигнала из БКД. В предположении сохранения временной зависимости функций  $A(T)$  и  $A_{22}(T)$  находим разность  $\delta A(T) = A_{22}(T) - A(T)$ . Второй: минимизация величины  $\delta A(T)$  для отсчетов в азимуте  $170^\circ$ - $52^\circ$  позволяет выбранную в БКД запись аппаратной функции  $A_{22}(T)$  прямого сигнала соотнести с записью  $A(T)$  для подобной траектории спутника ГЛОНАСС 22. Третий: вычисление отношения  $\delta A(T)/A_{22}(T)$  для интервала углов азимута  $52^\circ$ - $46^\circ$ - $52^\circ$

позволяет получить значение коэффициента ослабления для сигнала единичного отсчета на трассе контролируемой длины [2; 3].



**Рис. 1. Записи амплитуды и угловых координат ГЛОНАСС 22**



**Рис. 2. Полярная диаграмма угловых координат спутников ГЛОНАСС 22, 23 и GPS 7 и GPS 30**

### Заключение

Сформирован блок базы данных прямых сигналов навигационных спутников в открытом пространстве. Сформулированы условия использования пространственно-временных зависимостей амплитуды прямых сигналов в калибровке измерений поглощения и рассеяния излучения в лесных массивах и рефлектометрии земной поверхности. Описан алгоритм использования базы данных. Представлен пример использования базы данных в определении коэффициента погонного ослабления сигналов ГНСС с координатной привязкой в лесном массиве посадок сосны.

### Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing - Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London, 2014. 286 p.
2. Кашкин В. Б., Кокорин В. И., Миронов В. Л., Сизасов С. В. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 7. С. 825–830.
3. Метод измерения ослабления микроволнового излучения в лесном пологом с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов, А. В. Сорокин, М. И. Михайлов и др. // Вестн. СибГАУ. 2013. Т. 51, № 5. С. 123–126.

# Секция «МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»

---

УДК 336.77:338.43

**Л. Н. Абрамовских<sup>(1)</sup>, А. В. Бабенко<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>(2)</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск

## **РОЛЬ АГРОМОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОЦЕНКЕ КРЕДИТОСПОСОБНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

В статье поднимаются вопросы формирования новых подходов к оценке кредитоспособности сельхозпроизводителей на основе агромониторинга с использованием космических технологий, предлагается развивать оценку и управление земельными ресурсами, совершенствовать показатели специализации с учетом региональных особенностей

*Ключевые слова: специализация, показатели и факторы специализации, кредитоспособность, оценка земли сельхозназначения, агромониторинг с использованием космических технологий.*

В последние годы российская экономика испытывает снижение экономического роста и социально-экономического благосостояния населения. По-прежнему сложное положение наблюдается в сельской местности, где население по большей части не имеет работы и переезжает в город, вследствие этого постепенно деградирует инфраструктура села.

Преодоления трудностей как в городе, так и в сельской местности, безусловно, связывают с развитием производства, но для этого требуются значительные капитальные затраты. Источниками инвестиций в развитии не только сельскохозяйственного производства, но и сельской местности могли бы стать банковские кредиты. Но банки сегодня отказываются от кредитования реального сектора [1]. «Хронический кредитный голод», определяющий состояние реального сектора экономики, отличается тем, что российские банки в сравнении с европейскими (выдающими в среднем кредиты по отношению к ВВП государства на 250–500 %), предлагают не более 42–51 % [2].

Главной причиной «кредитного голода» называют высокую цену кредита, при этом предоставляя кредиты преимущественно экспортным производствам, банки тем самым влияют на развитие внутреннего потребления, сохранение высокого уровня цен на продукты первой необходимости. В то же время население нищает, поэтому нет платежеспособного спроса на качественные потребительские товары, так как они дороги [3]. Снижение цен на потребительские товары возможно лишь при условии увеличения производства, роста производительности труда – именно это способно придать ускорение импортозамещению.

Необходимость избегать кредитных рисков для банков становится первоочередной задачей, поэтому оценивать кредитоспособность заемщика, устанавливать лимиты кредитования и ставки процента, ограничивать сроки кредита – все это позволяет использование скоринговых методов. Экспресс-оценка индивидуального кредитования требует минимум документов, но повышает экспертную составляющую процедуры. С таким индивидуальным подходом банки на время уменьшают проблемы кредитования, но увеличивают спрос на квалифицированных специалистов-экспертов, к тому же скоринговая методика дает поверхностное представление о деятельности и положении предприятия. Поэтому разрабатывать новые индивидуальные схемы кредитования в зависимости от уровня кредитоспособности субъекта, использовать не только количественные, но и качественные показатели, отражающие региональную специфику, становится необходимостью ближайшего времени. Подобные задачи за рубежом включают региональную специфику влияния факторов, отражающихся в специализации сельскохозяйственного производства [4].

В современной России проблема специализации решается без учета региональных различий природно-климатических условий, географического положения. В показателях специализации отсутствуют факторы, связанные с качеством земли и ее местоположением, природно-климатическими особенностями. При определении кредитоспособности предприятия банками практически не учитываются эти региональные особенности субъекта сельскохозяйственного производства. Учет этих факторов позволяет развиваться всем регионам, находящимся в различных почвенно-климатических условиях. При этом даже не всегда требуются дополнительные затраты для относительно быстрого развития, необходимо только перераспределить финансы. В настоящее время случается, что земли, которые используются для зернового хозяйства, по своему качеству мало соответствуют этому назначению. В то же время пастбища и фермы создаются на землях, не соответствующих данному направлению хозяйственной деятельности.

При существенных различиях природно-климатических условий России и Красноярского края в том числе с целью повышения эффективности и роста производительности труда необходимо развивать узкую специализацию сельскохозяйственного производства, то есть производить продукцию в наиболее благоприятных климатических зонах, где можно получить максимальную урожайность сельскохозяйственных культур. Определение и регламентирование зон (ареалов, поясов) производства пшеницы, мяса, молока, картофеля и пр. продукции позволит развить специализацию районам, находящимся в различных почвенно-климатических условиях, повысить производительность труда целенаправленно, снизить себестоимость и увеличить объемы продукции, при этом не потребуются больших финансовых затрат [5]. Нужно только перераспределить финансы, в том числе и средства государственной поддержки сельхозпроизводителей, в соответствии с каждой определенной специализацией.

Отвечая на вызовы времени, Россия пытается решить возникшие проблемы, копирует готовые западные образцы развития, но они не способствуют прогрессу своей страны. Враждебное отношение Запада и социальная напряженность внутри страны «подталкивают» правительство к выработке собственной стратегии развития, национальной по существу. Объединяющим центром в этом процессе должно выступить государство, а какая форма развития будет создана, как свидетельствует практика, должна найти сама страна, опираясь на национальные особенности и внутренние возможности, не перенимая чужого, приводящего к потере ее суверенитета [6].

Мировая практика показывает, что развитые страны добиваются, во-первых, вытеснения менее развитых стран с мирового рынка как экспортеров продукции и, во-

вторых, вызывают у них соблазн покупать продукцию за рубежом в ущерб собственному производству. Страна, «идущая на поводу» у развитых стран, лишается также основы для дальнейшего экономического развития, что ведет к превращению ее в придаток этих государств. Такая перспектива есть и у России.

Развитие специализации в АПК – довольно сложный процесс, но сулящий высокие результаты. Существуют различные методики оценки и управления земельными ресурсами. Ученые СФУ разработали основы ранжирования сельскохозяйственных земель на основе агромониторинга с использованием космических технологий. Они рассмотрели архитектуру интеллектуальной информационной системы, предложили модель и методику оценки качества земли, которая может быть использована для определения специализации и цены земли [7]. В этих исследованиях оценку земли сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) авторы рассматривают через следующие факторы влияния: экономические, физические, социальные, характеристики местоположения (удаленность от населенных пунктов, наличие водоемов и др.), развития транспортных сетей. Влияние этих факторов, учтенное в оценке земли, увеличивает или уменьшает спрос на земельные участки и регулирует рыночную цену на них. Исследования показывают, что сельскохозяйственное производство даже в рамках отдельного предприятия АПК является достаточно сложной системой. Оценка и управление земельными ресурсами в сельском хозяйстве позволяют целенаправленно повысить уровень их использования и повысить экономическую эффективность производства.

Опыт управления сельскохозяйственными ресурсами существует в Канаде, США, Китае, ЕС и других государствах. Сегодня использование подобного опыта в России становится необходимостью. Для оценивания земли следует сформировать две группы показателей.

Первая группа – показатели интегральной оценки текущего состояния земельного участка, основанные на натуральных измерениях, знании о предыстории его использования, состоянии его инфраструктуры и значимых факторов его применения, среди которых может быть оценка рыночной либо кадастровой стоимости, присвоение балла бонитета, ранга в системе сравнительного анализа земель и др.

Вторая группа – показатели частной оперативной оценки состояния растительного покрова, хода агротехнических мероприятий, мониторинга для принятия управленческих решений, контроля эффективности мероприятий, расходования бюджетных средств, прогнозирования урожайности, формирования отчетности. Эти показатели позволят банкам учитывать региональные факторы определения кредитоспособности субъектов. Под контролем специалистов банка может протекать вся деятельность сельхозпроизводителей, включая закупки определенных пород скота, оборудования, развитие инфраструктуры хозяйства, территорию для проживания. Все это может быть предоставлено в долгосрочное пользование хозяйствам на условиях кредитования (под гарантии государства и при его поддержке в виде компенсации процента по кредиту, отсрочки платежей, страховых выплат и гарантий приобретения продукции, в том числе для экспорта).

К примеру, в Россельхозбанке можно создать специализированные отделы, которые под гарантии правительства будут не просто выдавать финансовые средства, но с учетом зональных (региональных особенностей, качества земли) предоставлять строительным организациям возможность обустройства и закрепления на соответствующих землях семейных, фермерских и коллективных хозяйств, включающих земельные участки, водоемы, энергоснабжение, жилую зону и пр. Это позволит также принимать обоснованные решения управленцами в автоматическом режиме без включения экспертов в цикл решения задач.

Нынешняя форма государственной поддержки сельского хозяйства, основанная на погектарном и товарном критериях, не обеспечивает устойчивого и стабильного его развития, а также не способствует обоснованному перераспределению ограниченных финансовых средств. По этой причине исследование новых методов, разрабатываемых учеными в междисциплинарном пространстве (методов оценки и управления земельными ресурсами), представляется перспективным направлением в развитии управления сельским хозяйством. Эти методы не могут осуществляться без учета региональных различий природно-климатических условий, географического положения и показателей качества земли. При определении кредитоспособности предприятия банки должны учитывать и использовать на практике показатели, отражающие региональные особенности субъекта сельскохозяйственного производства. Это позволяет не только развивать специализацию, но и рационально перераспределять ресурсы национальной экономики, в том числе и финансовые.

### Список литературы

1. Объем займов, выданных предприятиям в 2016 году, по сведениям ЦБ, упали на 9,5 %. Как следствие объем резервов банков сократился с 1,352 трлн руб. до 186 млрд руб., в результате прибыль банковского сектора повысилась в 5 раз до 930 млрд руб. // О динамике развития банковского сектора Российской Федерации и в декабре и итогах 2016 года. URL: [http://www.cbr.ru/analytics/bank\\_system/din\\_razv\\_16\\_12.pdf](http://www.cbr.ru/analytics/bank_system/din_razv_16_12.pdf).

2. По оценке экспертов российской академии народного хозяйства и государственных служащих, активы банков России превысили объем ВВП страны и составили к настоящему времени 72 трлн руб, что в 2,5 раза больше государственных финансов и в 5 раз – федерального бюджета. Такие огромные средства можно было бы использовать для экономического развития. // Банковская система России 2017 год. URL: <http://global-finances.ru/bankovskaya-sistema-rossii-2017/>.

3. За последние два года доходы граждан снизились более чем на 16 %, черту бедности переступили более 20 млн человек, прогнозы роста реальных доходов на 2017–2018 гг. Минэкономразвитием снижены до 0,3–0,4 % (это в 2,3–3,3 раза ниже чем в предыдущий год) // Тотальная нищета населения – главный вызов для российского государства. URL: <http://www.liveinternet.ru/users/3790905/post406122138>.

4. Для каждой группы предприятий необходимо формировать (создавать) собственную схему кредитования, которая снизит кредитные риски. Определение кредитоспособности предприятий за рубежом решается на основе учета региональных факторов, отражающихся в специализации производства, прежде всего сельскохозяйственного, которая на практике тесно связана с ценообразованием на продукцию.

5. Ведь одна тонна пшеницы, выращенная при различной урожайности, имеет разную себестоимость, при этом существует разная производительность труда и объем произведенного продукта. Экономически выгодней привезти продукцию туда, где ниже урожайность, а выращивать там, где она выше. Развитие транспорта, дорог также способствует совершенствованию специализации, и в этом большую роль может сыграть государство, финансируя и определяя перспективы дорожного строительства.

Часто случается так, что государство датирует продукцию, идущую на экспорт, а другие товары закупаем за рубежом за валюту, тем самым оказываемая государством поддержка сельхозпроизводителей с точки зрения национальных интересов не эффективна. Если же страна, не имея развитой современной экономической базы (устаревшая техника), вывозит продукцию сельского хозяйства на экспорт, то тем самым она повышает земельную ренту и цену земли в странах, обладающих лучшими условиями производства и транспортировки сельскохозяйственных продуктов. Эти страны получают большую ренту (прибыль), что позволяет им ускорить прогресс (модернизацию производства) и применить временно ценовой демпинг по отношению к товарам менее развитой страны (такое уже было в России в XIX и в конце XX столетия).

6. Как писал П. Струве, способы достижения поставленной цели многообразны, но «дух, которым нация должна проникнуться, для того чтобы в области хозяйственной создать

"Великую Россию", ясен. Это дух – национального строительства на общечеловеческих началах, ... необходимо понять, что ... для этого нужен свободный, творческий подвиг всего народа, ... нельзя уже ничего достигнуть простым приказом власти. Из скорбного исторического опыта последних лет народ наш вынес понимание того, что государство есть личность "соборная" и стоит выше всякой личной воли. Это огромное неопределимое и неистребимое приобретение и оправдание пережитых нами "великих потрясений"». Струве П. Великая Россия. Из размышлений о проблеме русского могущества. Русская мысль. 1908. Кн. 1. С. 143–157.

7. Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Зенков И. В. Управление использованием продуктивных земель агропромышленного Комплекса Красноярского края на основе показателей Агроэкономического потенциала // Вестн. ИрГТУ. 2016. № 3(110). С. 57–66; Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Зенков И. В. Разработка системы поддержки принятия решений в управлении использованием земельного сектора агропромышленного комплекса в регионах Сибири // Вестн. ИрГТУ. 2016. № 3 (113). С. 89–98; Раевич К. В., Зенков И. В. Интеллектуальная система поддержки принятия управленческих решений в задачах оценки земель сельскохозяйственного назначения // Вестн. ИрГТУ. 2016. № 5 (112). С. 95–104.

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

Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Армении,  
Ереван; e-mail: aza.hovsepyan@gmail.com

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ LANDSAT 8 OLI/TIRS ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДЫ ОЗЕРА СЕВАН В АРМЕНИИ**

Рассматривается возможность применения спутниковых снимков LANDSAT 8 OLI/TIRS для оценки экологического состояния озера Севан. Результаты, полученные для поверхностной температуры воды, мутности воды и биомассы фитопланктона на основе данных дистанционного зондирования Земли, показывают, что несмотря на то, что полученные первичные результаты носят качественный характер, тем не менее, снимки LANDSAT 8 OLI/TIRS можно использовать для получения достоверной информации для оценки экологического состояния озера Севан.

*Ключевые слова: спутниковые снимки, Landsat 8 OLI/TIRS, экологическое состояние озера, температуры воды, мутности воды, биомасса фитопланктона.*

### **Введение**

Проблема загрязнения и изменения трофического статуса пресноводных озер с экологической и социально-экономической (питьевая вода, рыбная промышленность и т. д.) точек зрения очень актуальна и требует пристального внимания.

Озеро Севан – самый большой пресноводный резервуар Армении и Южного Кавказа, имеет огромное экологическое и экономическое значение не только для страны, но для всего региона. До 50-х годов прошлого века озеро было олиготрофным, но искусственное снижение воды привело к количественным и качественным изменениям экологического состояния и к нарушению экологического баланса, что впоследствии привело к активации процессов эвтрофикации озера. В 2010-х годах удалось поднять уровень воды на 6,5 м, но экологическое состояние осталось нестабильным. Последнее говорит о необходимости оценки экологического состояния озера и по возможности создания современной мониторинговой системы с обязательным дистанционным компонентом [1; 6].

Важными характеристиками качества воды озера являются температура, мутность и цветение воды, которые можно оценить разными показателями: такими как количества взвешенных твердых частиц (ВТЧ), биомасса фитопланктона (БФ) и т. д. Изменения этих параметров влияют на спектральную отражательную способность воды, что можно использовать для качественной и количественной оценки данных параметров методами дистанционного зондирования (ДЗ) [3; 12].

Итак, целью данной работы являлась оценка применимости космических снимков Landsat 8 OLI/TIRS для оценки экологического состояния воды озера Севан.

### **Объект исследования**

Озеро Севан находится в Гегаркуникском марзе (регионе) Армении (40°23'N, 45°21'E). Водное зеркало находится на высоте 1 900 м над уровнем моря. С морфологической точки зрения озеро Севан состоит из двух частей – Большой Севан и Малый Севан. В озеро стекаются 28 рек, и только река Раздан вытекает из озера [1].

## Материалы и методы

**Полевые данные.** Мутность воды измерялась путем измерения общего количества взвешенных твердых частиц (ВТЧ) по Standard Method 2540 D (N = 7) [11].

Температура воды измерялась системой Hach Lange Sension 156 Meter (N = 14).

Данные БФ были предоставлены Научным центром зоологии и гидроэкологии НАН РА (N = 109). Измерялось общее количество диатомитов, сине-зеленых, зеленых и желто-зеленых водорослей. Точки, находящиеся на облачных участках спутникового снимка были исключены (N = 48), после чего данные были подвергнуты статистической обработке (обнаружение и удаления статистических выбросов). Расчет параметров описательной статистики имеет следующий вид ( $\text{г/м}^3$ ) – N = 50, Min = 0,05, Max = 1,52, Mean = 0,56, SD = 0,44.

**Спутниковые данные.** В исследовании были использованы спутниковые снимки Landsat 8 OLI/TIRS с мая по октябрь 2016 года. Снимки Landsat 8 имеют некоторые преимущества по сравнению с предыдущими снимками серии Landsat. Качество данных (отношение сигнал-шум) и радиометрическое разрешение (12 бит) снимков выше (8 бит для TM и ETM+), что дает значительное преимущество для обнаружения изменений на поверхности Земли. Еще одним из преимуществ снимков Landsat 8 является наличие двух термальных каналов, что позволяет получать более точные данные о температуре без дополнительных вспомогательных данных [9].

В работе атмосферная коррекция снимков Landsat 8 OLI была проведена с использованием инструмента ATCOR. Коррекция солнечного блика была проведена по методу Hedley (2005) [7]. Пространственное преобразование снимков проводилось с использованием фильтра низких частот (3×3 пикселя) [10]. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

## Статистический анализ данных

Оценка точности модели проводилась с использованием RMSE (Root Mean Square Error),  $R^2$  и RPD (Ratio of Performance of Deviation). Чем выше значение  $R^2$ , тем сильнее существующая взаимосвязь между измеренными и прогнозированными данными, в то время как RMSE и RPD указывают на (погрешность).

В литературе модели с  $R^2$  ниже 0,5 и RPD ниже 1,4 не рассматриваются как непригодные. Значения  $R^2$  между 0,50 и 0,80 и RPD между 2,0 и 1,4 считаются моделями среднего качества, пригодными для грубых количественных прогнозов.  $R^2$  выше 0,80 и RPD между 2 и 2,5 соответствуют высокой точности прогнозирования [8].

## Результаты

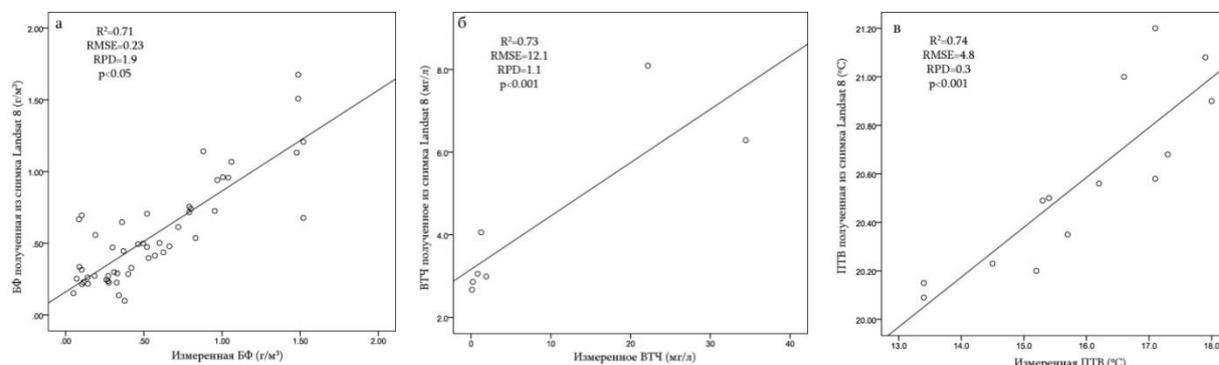
**Биомасса фитопланктона (БФ).** Для выявления и оценки пространственно-временного распространения БФ в озере Севан были использованы полевые данные и модель множественной нелинейной регрессии с применением следующих каналов снимка Landsat 8: B1 (побережья и аэрозоли), B2 (синий), B3 (зеленый), B4 (красный), B5 (ближний ИК) и их соотношения (синий/красный, красный/зеленый и т. д.). Были выбраны каналы, наиболее широко используемые для определения БФ [3; 5].

Как видно на рис. 1, а, нелинейная регрессионная модели характеризуется относительно низким значением RMSE (0.23), высокими  $R^2$  (0.71) и RPD (1.9),  $p < 0,05$ . Полученная модель оценивается как модель среднего качества и может быть использована для грубого количественного прогнозирования БФ в озере Севан (рис. 2).

**Мутность воды (ВТЧ).** Для оценки ВТЧ была использована модель Деккера [4]. В результате сопоставления данных полевых работ с данными ДЗ были получены следующие статистические характеристики: RMSE = 12,1,  $R^2 = 0,73$ , RPD = 1,1,  $p < 0,001$ , из чего следует, что на данном этапе невозможно проводить количественную оценку ВТЧ в озере Севан (рис. 1, б). Несмотря на это, высокое значение  $R^2$  указывает

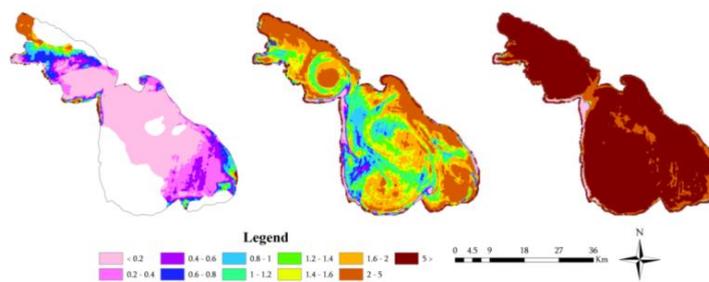
на высокую линейную корреляцию между измеренными и прогнозированными значениями [8].

**Температура (ПТВ).** Для получения поверхностной температуры воды (ПТВ) озера Севан были использованы два канала термального спектра снимков Landsat 8 – В10 (10.60–11.19 нм) и В11 (11.50–12.51 нм), полученных в период с апреля по сентябрь 2016 года. Измерение поверхностной температуры воды проводилось на основе уравнения Планка [2].

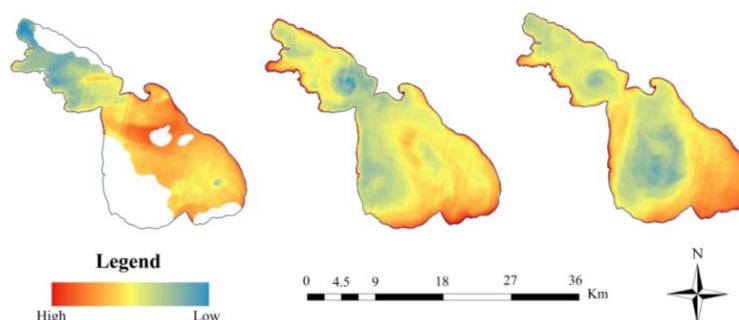


**Рис. 1.** а – корреляция между измеренными и прогнозированными данными БФ; б – корреляция между измеренными и прогнозированными данными ВТЧ; в – корреляция между измеренными и прогнозированными данными ПТВ

Полученные результаты показывают, что начиная с мая до второй половины августа температура воды увеличивается, снижается – начиная с второй половины августа (рис. 3). Кроме того, ПТВ в Малом Севане ниже, чем в Большом Севане, что соответствует результатам предыдущих исследований [1].



**Рис. 2.** Карты БФ для озера Севан, полученные со снимков Landsat 8 (май, август, сентябрь)



**Рис. 3.** Карты ПТВ для озера Севан, полученные со снимков Landsat 8 (май, август, сентябрь)

Для оценки точности результатов спутниковые данные были сопоставлены с полевыми данными. В разных местах озера намечается разница между наземными данными поверхностной температуры воды и данными ДЗ, которая может быть обусловлена временной разницей полевых работ и съемки. Тем не менее методом линейной регрессии выявлена значительная корреляция:  $R^2 = 0,74$  ( $p < 0,001$ ), которая указывает на значительную линейную зависимость между измеренными и прогнозированными значениями и, следовательно, модель дает возможность изучать закономерности пространственной вариации ПТВ в озере (рис. 1, в).

### **Заключение**

Полученные на данном этапе работы результаты свидетельствуют, что спутниковые снимки Landsat 8 могут быть использованы для оценки экологического состояния озера Севан, однако нуждаются в дальнейшей доработке с проведением широкомасштабных полевых работ.

*Авторы благодарят Научный центр зоологии и гидроэкологии НАН РА и «Фонд восстановления запасов севанской форели и развития рыбоводства» за содействие в полевых работах и предоставленные данные.*

### **Список литературы**

1. Оганесян Р. О. Озеро Севан вчера, сегодня... Изд-во «Гитутюн» НАН РА, 1994. 478 с.
2. Barrett D., & Frazier A. Automated Method for Monitoring Water Quality Using Landsat Imagery // Water. 2006. № 8(6), 257. URL: <http://doi.org/10.3390/w8060257>.
3. Brivio P. A., Giardino C. and Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images // Int. J. Remote Sensing. 2001. № 22 (2). P. 487–502.
4. Dekker A. G., Vos R. J. and Peters S. W. M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes // The Science of the Total Environment. 2001. № 1 (3). P. 197–214.
5. Hambaryan L., Mamyan A., Khachikyan T. The characteristic of horizontal distribution of phytoplankton community in littoral part of Lake Sevan // Biological journal of Armenia. 2016. № 3. P. 6–11.
6. High-resolution satellite remote sensing of littoral vegetation of Lake Sevan (Armenia) as a basis for monitoring and assessment / J. Heblinski, K. Shmieder, T. Heege, T. K. Agyemang, H. Sayadyan, L. Vardanyan // Hydrobiologia. 2011. № 661. P. 97–111.
7. Hedley J. D., Harborne A. R. and Mumby P. J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos // International Journal of Remote Sensing. 2005. № 26 (10). P. 2107–2112.
8. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review / B. M. Nicolai, K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K.I. Theron and J. Lammertyna // Postharvest Biology and Technology. 2007. № 46. P. 99–118.
9. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research / D. P. Roy, M. A. Wulder, T. R. Loveland, C. E. Woodcock, R. G. Allen, M. C. Anderson, D. Helder, J. R. Irons, D. M. Johnson, R. Kennedy, T. A. Scambos, C. B. Schaaf, J. R. Schott, Y. Sheng, E. F. Vermote, A. S. Belward, R. Bindchadler, W. B. Cohen, F. Gao, J. D. Hipple, P. Hostert, J. Hutington, C. O. Justice, A. Kilic, V. Kovalsky, Z. P. Lee, L. Lymburent, J. G. Masek, J. McCorkel, Y. Shuai, R. Trezza, J. Vogelmann, R. H. Wynne, Z. Zhu // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.
10. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3rd ed., Burlington Academic Press. 2006. 560 p.
11. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. / A.E. Greengerg, L.S. Clesceri and A. D. Eaton Editors. 18<sup>th</sup> ed. 1992. 541 p.
12. A Landsat 8 Oli satellite data-based assessment of spatio-temporal variations of lake Sevan phytoplankton biomass / G. Tepanosyan, V. Muradyan, A. Hovsepian, L. Minasyan, Sh. Asmaryan // Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series. 2017. № 17 (1). P. 83–89.

**А. А. Аюржанаев, Б. В. Содномов,  
Ж. Б. Алымбаева, Б. З. Цыдыпов, Е. Ж. Гармаев**  
Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ

## **ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ СТЕПНЫХ СООБЩЕСТВ ЗАБАЙКАЛЬЯ**

В работе представлены предварительные результаты исследования по оценке трендов длины вегетационного периода с 2000 по 2016 годы в Забайкалье. Исследования проведены для двух тестовых участков со степной растительностью, характеризующихся отрицательным и положительным трендами NDVI за рассматриваемый период. Выявлено, что для участка с положительным трендом NDVI наблюдается увеличение длины вегетационного периода и, наоборот, для участка с отрицательным трендом NDVI – его уменьшение.

*Ключевые слова: степная растительность, NDVI, фенология, длина вегетационного периода, Забайкалье.*

### **Введение**

Степные ландшафты Забайкалья, расположенные в межгорных котловинах, понижениях и низкогорьях, характеризуются засушливым климатом и подвержены негативным процессам, в том числе деградации растительного покрова [1]. Помимо климатического влияния, причиной деградации являются перевыпас скота и распашка почв легкого гранулометрического состава в ходе аграрного землепользования позднего советского периода [2].

Анализ долговременных вариаций (с 2000 по 2016 годы) вегетационного индекса (ВИ) NDVI, по данным MODIS Terra, выявил негативный тренд NDVI для степных ландшафтов Западного Забайкалья [3]. Однако для степей юго-восточной части Забайкалья наблюдаются положительные значения тренда NDVI. Межгодовые вариации NDVI и пространственной структуры растительности хорошо коррелируют с количеством осадков – основным фактором, лимитирующим вегетацию в засушливых регионах (показано нами на примере тестового участка) [4].

Одним из чувствительных индикаторов влияния климатических изменений на растительность является продолжительность или длина вегетационного периода (ДВП), которая определяется как разность между наступлением конца (КВП) и начала (НВП) вегетации растительности [5]. Подходы к определению ДВП с помощью спутниковой информации заключаются в использовании различных аналитических функций для аппроксимации сезонного хода вегетационных индексов, при этом НВП и КВП определяются по достижении ВИ экспериментально выявленного порогового значения или как точки с максимальным значением второй производной функции, то есть максимальным ускорением роста или спада NDVI. Как правило, исходными данными служат многодневные временные композиты, главным достоинством которых является минимальное влияние облачности на конечное изображение.

Целью данной работы является оценка временных вариаций ДВП для степных растительных сообществ Забайкалья, которые имеют разнонаправленные тренды NDVI.

### **Материалы и методы исследования**

Исходными данными исследования послужили 16-дневные композиты NDVI спутника Terra с 2000 по 2016 годы (продукт MOD13Q1) [6]. Для создания композита

используется метод максимального значения MVC (Maximum Value Compositing). Композит формируется из максимальных значений NDVI за 16 дней, таким образом минимизируется влияние атмосферной составляющей. Кроме того, для сокращения оптической дистанции выбираются данные со спутника, находящегося ближе надиру, что также уменьшает атмосферное влияние. Для удаления некорректных значений проведено сглаживание временных рядов.

Предпринята попытка оценки дат НВП и КВП по точкам перегиба двойной логистической и асимметричной гауссовой функций, аппроксимирующих временные ряды NDVI. Выявлено, что полученные значения неадекватно отражают НВП, КВП и ДВП. Поэтому за начало и конец вегетационного периода приняты значения, когда NDVI становится соответственно выше и ниже порогового значения, равного 0,2.

### Результаты и обсуждение

Для исследования выбраны две области с распространением степной растительности, расположенные в одной широтной зоне в регионе Забайкалья (рис. 1). По данным MODIS Terra выявлено, что для первого участка наблюдаются преимущественно отрицательные тренды NDVI (с 2000 по 2016 годы), для второго участка – положительные.

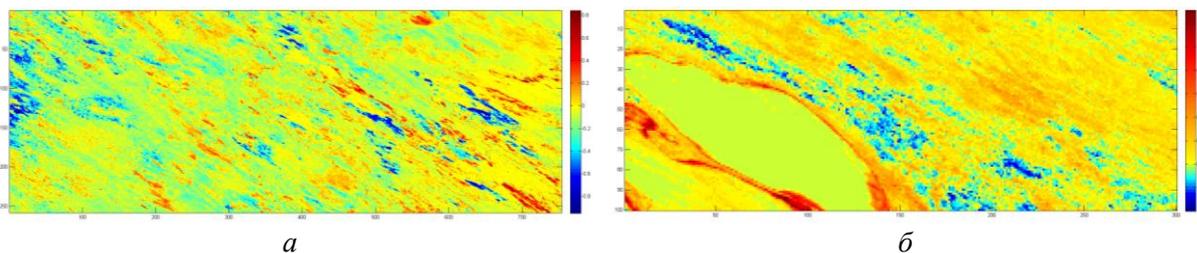


**Рис. 1. Расположение участков исследования (I – участок в Селенгинском среднегорье, вблизи озера Гусиного; II – участок вблизи Торейских озер)**

Модельный участок вблизи озера Гусиного характеризуется преимущественно разнотравно-злаковыми и злаковыми степями южносибирских формаций. Здесь преобладают типчаковые и мятликовые вариации мелкодерновиннозлаковых степей в сочетании с зарослями степных кустарников. Отмечаются небольшие по площадям сообщества сосновых лесов в сложении с закустаренными степями и песчаными псаммофитными ценозами на движущихся эоловых образованиях.

Участок вблизи Торейских озер представлен центральноазиатскими формациями травяных и злаковых сухих степей. Большее распространение имеют караганново-вострещово-тырсовые степи в сочетании с типчаковыми и змеевковыми сообществами. Увлажненные местообитания занимают пижмовые степи в сочетании с кустарниками и

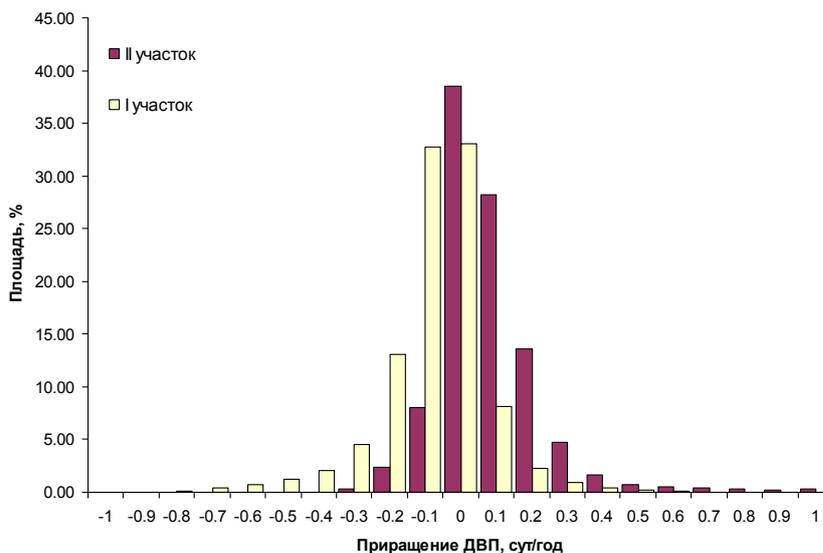
остепененными лугами. На юго-востоке участка отмечаются сообщества многокорешково луковые наряду с тонконоговыми, змеевковыми и вострцовыми степями.



**Рис. 2. Карта длины вегетационного периода для I и II участков (синусоидальная проекция)**

На рис. 2 представлены карты трендов ДВП для I (рис. 2, а) и II участков (рис. 2, б).

Для обоих участков большая часть площади подвержена незначительным флуктуациям ДВП от  $-0,05$  до  $0,05$  суток в году:  $33,08\%$  площади для I участка,  $38,49\%$  – для второго. На I участке наблюдается снижение ДВП на  $0,1$  сут/год для  $32,7\%$ , для  $0,2$  сут/год для  $13,08\%$  и более чем на  $0,35$  сут/год для  $9,13\%$ . На II участке наблюдается увеличение ДВП на  $0,1$  сут/год для  $28,19\%$ , для  $0,2$  сут/год для  $13,64\%$  и более чем на  $0,35$  сут/год для  $8,88\%$ . Установлено, что увеличение ДВП для II участка происходит за счет задержки КВП, а уменьшение ДВП для I участка – за счет раннего наступления КВП.



**Рис. 3. Распределение приращения ДВП для I и II участка**

### Заключение

Полученные результаты настоящего исследования носят предварительный характер. Выявлено, что ДВП степной растительности в Западном Забайкалье уменьшается, а в Восточном Забайкалье – увеличивается, что согласуется с трендами NDVI и количеством осадков. Для более точной оценки дат наступления фенологических фаз степной растительности в засушливых районах необходимо учитывать температуру поверхности и влажность почвы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-01059.*

#### **Список литературы**

1. Современные исследования засушливых геосистем Забайкалья / А. Л. Волошин, А. К. Тулохонов, С. Г. Андреев, А. Н. Бешенцев, Ю. А. Рупышев // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006. С. 301–312.
2. Дамбиев Э. Ц. Степные ландшафты Бурятии. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2000. 199 с.
3. Аюржанаев А. А., Содномов Б. В., Цыдыпов Б. З. Оценка трендов NDVI в Забайкалье по данным MODIS Terra // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.) / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 208–211.
4. Vegetation cover dynamics of the Mongolian semiarid zone according to multi-temporal LANDSAT imagery (the case of Darkhan test range) / М. А. Zharnikova, Zh. B. Alymbaeva, А. А. Ayurzhanayev and E. Zh. Garmaev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [The electronic resource] IOP Publishing, 2016. V. 48, № 1. 012015.
5. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным / М. А. Медведева, В. В. Елсаков, И. Ю. Савин, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 1. С. 319–329.
6. Huete A., Justice C., Van Leeuwen W. MODIS Vegetation Index: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Version 3.0. 1999. URL: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf).

**С. Д. Бабой, Д. В. Голубев, М. Н. Ягунов**

Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «ЦЗЛ Красноярского края», Красноярск

## **МОНИТОРИНГ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ**

В данной статье описывается уникальный опыт проведения мониторинговых работ массовой вспышки вредителя леса – сибирского шелкопряда – при помощи данных дистанционного зондирования земли (ДДЗЗ).

*Ключевые слова: ГИС, ДДЗЗ, мониторинг, повреждение леса.*

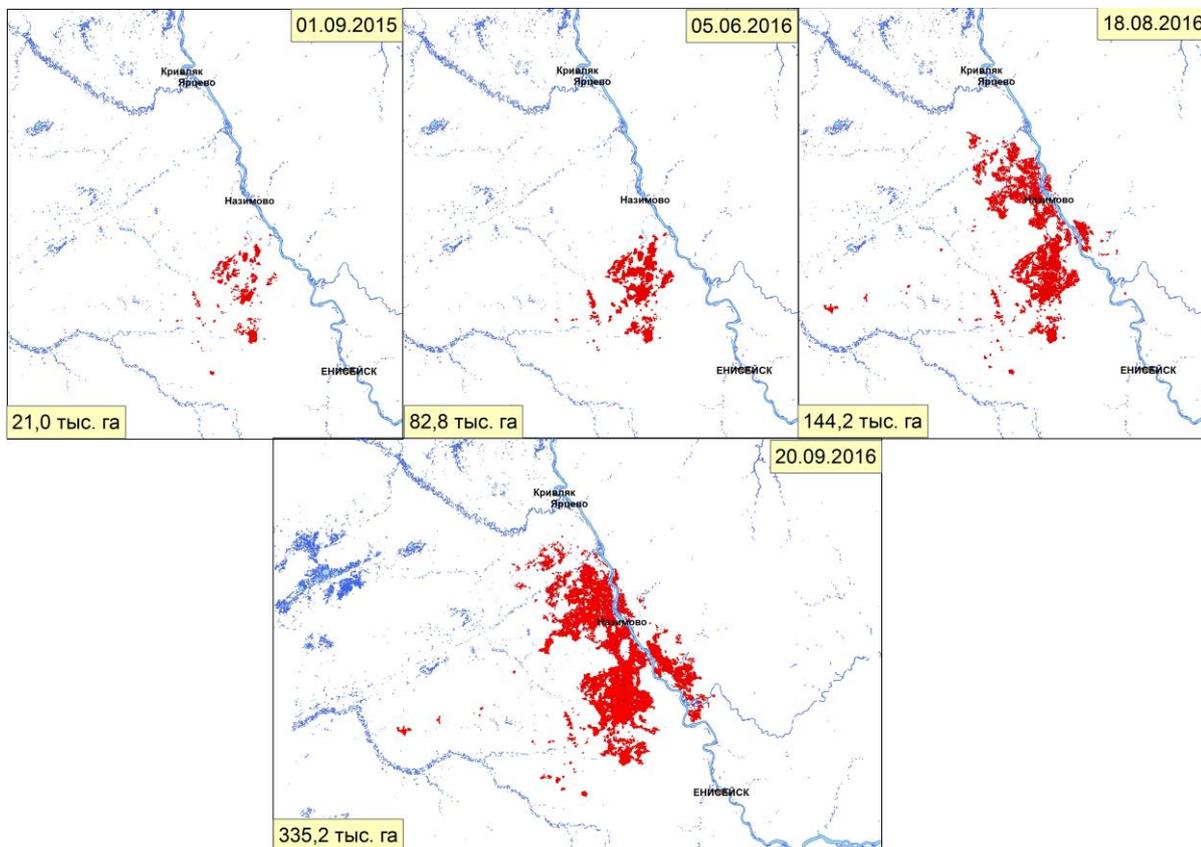
Государственный лесопатологический мониторинг является частью государственного экологического мониторинга и включает в себя сбор, анализ и использование информации о санитарном и лесопатологическом состоянии лесов, в том числе об очагах вредных организмов, отнесенных к карантинным объектам. В первую очередь источниками информации для осуществления государственного лесопатологического мониторинга лесов являются данные дистанционного зондирования Земли [1].

Основная цель ведения лесного мониторинга – информационное обеспечение органов управления лесным хозяйством оперативной и точной информацией о состоянии и происходящих изменениях в лесном фонде России для сохранения устойчивого развития лесного сектора экономики как существенной составляющей развития общества в целом [2]. Дистанционный лесопатологический мониторинг на территории Красноярского края ведут сотрудники отдела ДЛПМ и ГИС филиала ФБУ «Рослесозащита» Центра защиты леса Красноярского края. При всем многообразии методов и подходов в процессе обработки ДДЗЗ мы придерживаемся базовых подходов, которые включают 4 этапа [3]:

- предварительная обработка спутниковых изображений;
- детектирование с помощью адаптивных порогов изменений спектральных яркостей древесной растительности между спутниковыми изображениями разных лет;
- тематическая идентификация выявленных изменений с использованием дополнительных признаков и информационных источников;
- формирование картографического продукта с очагами насекомых-вредителей леса.

В данной работе приведены результаты дистанционного мониторинга на основе данных космической съемки Landsat, Sentinel и Ресурс для определения состояния и изменения лесного покрова в связи с массовым размножением шелкопряда сибирского на территории Красноярского края. Сибирский шелкопряд – наиболее опасный вредитель хвойных лесов Сибири. Эволюционно обусловленные и циклично повторяющиеся вспышки массового размножения сибирского шелкопряда определяют направленность и ритмику экологических сукцессий в таежных лесах, способствуя широкому распространению березы и осины за счет сокращения площади темнохвойных и светлохвойных насаждений. С 1878 по 1998 год в Красноярском крае действовали очаги девяти крупномасштабных вспышек массового размножения сибирского шелкопряда на площади свыше 8 млн га [4]. Наибольший ущерб причинил шелкопряд темнохвойным лесам Ангаро-Енисейского района в 1953–1957 годы, когда

площадь очагов превышала 2,3 млн га [5]. Последняя крупная вспышка вредителя в темнохвойных лесах Енисейского района и Нижнего Приангарья реализовалась в 1989–1997 годы на площади 479,9 тыс. га. Очередной подъем численности вредителя в этом регионе начался спустя 13 лет в 2011–2012 годы. Причиной, обусловившей выход популяции сибирского шелкопряда из депрессивного состояния, была недостаточная влагообеспеченность мая 2011 года и особенно сильная засуха июня–июля 2012 года на фоне повышенных среднемесячных температур.



**Рисунок. Динамика распространения поврежденных древостоев в результате обьедания сибирского шелкопряда**

Формирование очагов сибирского шелкопряда произошло в труднодоступной местности с отсутствием дорог, пригодных для использования колесной техники в летний период. В связи с этим ведущую роль в выявлении очагов приобретают дистанционные методы.

В ноябре 2015 года была получена информация о наличии повреждений лесных насаждений сибирским шелкопрядом на территории Енисейского района. В результате дешифрирования были выявлены повреждения шелкопрядом на площади 21 тыс. га. После проведения наземных учетов численности вредителя и контрольного лесопатологического обследования в мае 2016 года площадь поврежденных насаждений уточнилась и составила 35,0 тыс. га. Анализ погодных условий 2015 года выявил значительный дефицит влагообеспеченности и превышение средней многолетней нормы температур в мае, что способствовало ускоренному развитию гусениц шелкопряда и более раннему вылету бабочек. Затяжная теплая осень 2015 года способствовала увеличению периода питания гусениц и позволила им уйти на зимовку в пятом возрасте, в результате чего летом 2016 года произошел лет бабочек и переход популяции в эруптивную фазу (скачкообразное увеличение численности) вспышки

массового размножения. В результате скачка численности шелкопряда площадь выявленных повреждений в 2016 года к июню составила 82,8 тыс. га, в августе – 144,2 тыс. га, а к сентябрю – 335,2 тыс.га. Выявленные контуры повреждений сибирским шелкопрядом неоднократно подтверждались выборочными наземными обследованиями. В результате наземных работ было оценено, что те контуры, которые были выделены в качестве поврежденных, имели дефолиацию от 50 % и более. Это дает основание полагать, что используемые данные космосъемки Landsat дает надежные результаты, но в то же время не позволяют выявлять повреждения древостоев на более ранних этапах развития массового размножения вредителя.

В последнее время все чаще вовлекается в процесс дешифрирования космоснимки Sentinel, которые, несомненно, повысят качество обнаружения и определения причины повреждения древостоя.

В настоящее время накопленные материалы по ДЦЗ поврежденных древостоев служат основой для реализации мер авиационной борьбы и мониторинга очагов массового размножения сибирского шелкопряда.

### **Список литературы**

1. Об утверждении порядка организации и осуществления государственного лесопатологического мониторинга: приказ № 340 от 4.08.2015.
2. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под общ. ред. В. К. Тузова. М.: ВНИИЛМ, 2004. 200 с.
3. Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. г. Железногорск, 2014 г. / сост. : А. А. Мельник, А. Н. Батуро, А. Е. Давиденко, Ж. С. Калюжина. Железногорск, 2014. 80 с.
3. Кондаков Ю. П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // Энтомологические исследования в Сибири. Вып. 2. Красноярск. 2002. С. 25–74.
4. Кондаков Ю. П. Сибирский шелкопряд в лесах Красноярского края // Защита лесных насаждений от вредителей и болезней. М., 1963. С. 81–84.
5. Деградация древостоев в таежных шелкопрядниках / Д. Л. Гродницкий, В. Г. Разнобарский, В. В. Солдатов, Н. П. Ремарчук // Приложение к Сибирскому экологическому журналу. 2002. Т-IX, № 1. С. 3–11.
6. Сухинин А. И., Павличенко Е. А. Пожары в таежных шелкопрядниках. Приложение к «Сибирскому экологическому журналу». 2002. Т. 9, № 1.

**Н. В. Барановский<sup>(1)</sup>, М. Ю. Беликова<sup>(2)</sup>,  
С. Ю. Каранина<sup>(2)</sup>, Е. П. Янкович<sup>(1)</sup>, К. С. Янкович<sup>(3)</sup>,  
В. С. Шерстнев<sup>(1)</sup>, М. В. Жарикова<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup>Томский политехнический университет, Томск

<sup>(2)</sup>Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск

<sup>(3)</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

<sup>(4)</sup>Херсонский национальный технический университет, Украина

e-mail: firedanger@narod.ru

## **ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГЕОМОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ОТ ГРОЗ**

Рассматриваются основные принципы построения региональной системы оценки лесной пожарной опасности от гроз. Для количественной оценки лесной пожарной опасности используется подход детерминировано-вероятностного прогнозирования. Визуализация прогнозной информации осуществляется в геоинформационной системе. В качестве исходной информации используются данные спутниковых платформ Landsat и Terra/Aqua в совокупности с данными глобальной сети пеленгации грозовых разрядов.

*Ключевые слова:* лесная пожарная опасность, прогнозирование, оценка, вероятность, детерминированная модель, спутниковая платформа.

### **Введение**

Лесные пожары, несмотря на усилия служб охраны лесов и сотрудников МЧС РФ, ежегодно приводят к экологическому и экономическому ущербу, а порой и к разрушению населенных пунктов и гибели людей [1]. Существуют различные причины возникновения возгораний в лесных массивах, но грозовая активность является основной среди природных факторов [2]. Особенно эта проблема актуальна для России и Канады, где в среднем до 37 % лесных пожаров обусловлено действием грозовых разрядов класса «облако – земля» [3]. Только в летние месяцы 2016 года в России возникало до 60 % возгораний из-за грозы (согласно данным Рослесхоза). Томская область является типичным регионом бореальной зоны лесов [4]. В области наблюдаются как весенние, так и летние, осенние лесные пожары. Особую проблему такие возгорания создают на удаленных территориях. Достаточно вспомнить пожароопасный сезон 2012 года в Томской области, когда смог от лесных пожаров достиг и других регионов. Практика показывает, что технологии тушения настоящего времени не способны решить проблему ликвидации лесных пожаров. Необходимо ориентироваться на методы прогнозирования, оценки и мониторинга лесной пожарной опасности, в том числе обусловленной грозовой активностью [5]. Территория Тимирязевского лесничества Томской области является опытной территорией для разработки технологий прогнозирования и мониторинга лесных пожаров от гроз.

Цель настоящей работы – создание комплексного метода прогнозирования и мониторинга лесной пожарной опасности, обусловленной грозовой активностью, на региональном уровне с использованием данных различных систем контроля окружающей среды (спутниковые и геоинформационные технологии, грозопеленгация).

### **Структура регионального центра мониторинга**

Предлагается использовать распределенные вычислительные технологии и удаленные сенсоры для сбора и обработки исходной информации по условиям окружающей среды. Центральное звено должно состоять из высокопроизводительного компьютера, например, вычислительный кластер [6]. Параллельная архитектура вычислительной системы обеспечит обработку исходных данных и генерацию прогноза в режиме, опережающем реальное время развития катастрофической лесной пожарной опасности. Спутниковые и наземные сенсоры обеспечат поступление информации, необходимой для генерации прогноза по контролируемой территории лесного массива. Заинтересованные организации и службы могут получить доступ к прогнозной информации посредством сети Интернет [7].

### **Вероятностное прогнозирование**

Анализ существующих методик и систем прогноза, оценки лесных пожаров [8–11] показывает, что большинство разработок в качестве индекса пожарной опасности используют абстрактные шкалы. Необходимо же ориентироваться на вероятностные шкалы оценки уровня лесной пожарной опасности. Разработана формула вероятностного критерия лесной пожарной опасности, которая включает такие характеристики, как длительность пожароопасного сезона, количество дней с грозами, длительность грозы, число разрядов класса «облако – земля», лесотаксационные описания и ряд других характеристик. Важным компонентом является детерминированная составляющая, которая представлена математической моделью зажигания деревьев наземным грозовым разрядом [12]. Таким образом, стохастический компонент позволяет определить вероятность определенного сценария, а детерминированная математическая модель просчитать этот сценарий.

### **Исходные данные**

Для обеспечения компьютерных моделей исходными данными следует организовать их импорт из различных систем контроля окружающей среды. Данные по лесной растительности могут быть получены при импорте лесотаксационных описаний и дешифрировании спутниковых снимков высокого разрешения Landsat [13]. Параметры приземного слоя атмосферы могут быть получены из тематических продуктов по прибору MODIS со спутниковой платформы Terra/Aqua цепочки A-Train [14]. Информация по грозовым разрядам доступна в системе глобальной пеленгации грозовых разрядов World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [15]. В ГИС-системе также следует организовать визуализацию подслоев с исходными данными.

### **Обсуждение**

Следует отметить, что ряд разработок уже был апробирован и в других лесопокрытых регионах. Например, вероятностная оценка лесных пожаров от гроз проведена для Цюрупинского лесничества Херсонской области Украины. Для данной территории разрабатывается веб-ориентированная геоинформационная система оценки рисков от лесных пожаров. Следует ожидать, что использование обсуждаемой распределенной аппаратно-программной системы позволит существенно повысить эффективность борьбы с лесными пожарами. Следует отметить, что ранее более простые формулы были использованы в «Авиалесоохране» при ретроспективном анализе пожаров в 2010 году. Авторы [11] получили хорошие результаты по числу детектированных очагов.

### **Заключение**

В настоящей работе предложена модель регионального центра прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности, обусловленной грозовой активностью.

Предложено в качестве центрального звена использовать высокопроизводительный компьютер параллельной архитектуры. Взаимосвязанное использование спутниковых данных и инструментальных методов оценки грозовой активности позволит проводить прецизионную оценку лесной пожарной опасности на контролируемой территории.

*Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-41-700831 p\_a).*

#### **Список литературы**

1. Baranovskiy N. V., Kuznetsov G. V. Forest fire occurrences and ecological impact prediction: monograph. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2017. 259 p.
2. Podur J., Martell D.L., Csilagg F. Spatial patterns lightning-caused forest fires in Ontario 1976–1998 // Ecological Modelling. 2003. V. 164, № 1. P. 1–20.
3. Pew K. L., Larsen C. P. S. GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada // Forest Ecology and Management. 2001. V. 140, № 1. P. 1–18.
4. Паневин В. С. Леса и лесное хозяйство Томской области: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 126 с.
5. Барановский Н. В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2007. 153 с.
6. Baranovskiy N. V. Algorithms for parallelizing a mathematical model of forest fires on supercomputers and theoretical estimates for the efficiency of parallel programs // Cybernetics and Systems Analysis. 2015. V. 51, № 3. P. 471–480.
7. Baranovskiy N. V., Zharikova M. V. A Web-Oriented Geoinformation System Application for Forest Fire Danger Prediction in Typical Forests of the Ukraine // Lecture Notes in Geoinformation and Cartography – LNG&C. Thematic Cartography for the Society. 2014. P. 13–22.
8. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B. J. Stocks, M. E. Alexander, R. S. McAlpine et al. Canadian Forestry service, 1987. 500 p.
9. Deeming I. E., Lancaster I. W., Fosberg M. A., Furman R. W., Schroeder M. J. The National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service Research Paper RM-84 February, 1972. 165 p.
10. Fire danger rating in the European Forest Fire Information System (EFFIS): Current developments / A. Camia, P. Barbosa, G. Amatulli, J. San-Miguel-Ayanz // Forest Ecology and Management. 2006. V. 234, suppl. 1. P. S20.
11. Подольская А. С., Ершов Д. В., Шуляк П. П. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 118–126.
12. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. Mathematical simulation of heat transfer at coniferous tree ignition by cloud-to-ground lightning discharge // EPJ Web of Conferences. 2014. V. 76, art. no. 01028, 6 P.
13. Chemura A., Mutanga O. Developing detailed age-specific thematic maps for coffee (*Coffea arabica* L.) in heterogeneous agricultural landscapes using random forests applied on Landsat 8 multispectral sensor // Geocarto International. 2017. V. 32, № 7. P. 759–776.
14. Focused sunlight factor of forest fire danger assessment using Web-GIS and RS technologies / N. V. Baranovskiy, V. S. Sherstnyov, E. P. Yankovich, M. V. Engel, V. V. Belov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. V. 9688, art. no. 968823, 6 P.
15. WWLLN data cluster analysis methods for lightning-caused forest fires monitoring / N. Baranovskiy, S. Krechetova, M. Belikova, A. Perelygin // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2016. V. 6, № 6. P. 3112–3120.

**У. А. Будник, С. Т. Им**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения  
Российской академии наук, Новосибирск  
e-mail: ulyshenka@mail.ru

## **ДИНАМИКА ВСПЫШКИ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА НА СЕВЕРНОЙ ГРАНИЦЕ ЕГО ОБИТАНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ И ГИС**

Цель работы – анализ пространственно-временной динамики повреждения темнохвойных лесов сибирским шелкопрядом во время вспышки его массового размножения в 2015 году на северной границе его обитания в Центральной Сибири. Для проведения анализа использовались многоспектральные изображения Landsat высокого разрешения, данные среднего разрешения MODIS Aqua.

*Ключевые слова:* многоспектральные данные Landsat, MODIS Aqua, повреждения лесов сибирским шелкопрядом, NDVI, EVI, пространственно-временная динамика вспышки.

### **Введение**

Периодические вспышки насекомых-вредителей влияют на рост лесов, в результате вызывая лесную смертность на обширных территориях, а для быстрого выявления гибели лесов и для анализа распространения поврежденных лесов применяется спутниковый мониторинг.

Цель данного исследования – анализ пространственно-временной динамики распространения повреждений темнохвойных лесов сибирским шелкопрядом во время вспышки его массового размножения в 2014 году на северной границе его обитания в Центральной Сибири.

### **Задачи:**

– провести анализ временной серии вегетационного индекса нормированной разности (NDVI), улучшенного вегетационного индекса (EVI), валовой первичной продуктивности (GPP) и индекса листовой поверхности (LAI) для поврежденных и фоновых территорий по данным MODIS Aqua;

– оценить связь пространственно-временной динамики вспышки массового размножения шелкопряда с влажностью почвогрунтов.

### **Обработка данных для анализа**

Для того чтобы оценить временную изменчивость характеристик NDVI, EVI, GPP и LAI для здоровых и поврежденных лесов, было необходимо использовать маску темнохвойных лесов и результат классификации с выделенными поврежденными территориями, полученными при помощи классификации снимков Landsat. Эти данные были получены в Институте леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук.

Генерация маски темнохвойных древостоев до начала вспышки (2013) на основе экспертного дешифрирования снимков Landsat и Worldview. К темнохвойным относились древостои с преобладанием (> 70 %) пихты и кедра. Классификационная

картосхема генерирована методом максимального правдоподобия с применением процедуры Threshold (с пороговым значением  $p = 0,05$ ).

Необходимые продукты MODIS Aqua были получены на сайте <http://glovis.usgs.gov>. Работа осуществлялась в программе ERDAS Imagine 2014. Из полученных данных были извлечены необходимые слои NDVI, EVI, GPP и LAI. Далее была изменена проекция на WGS 84 (UTM 46 зона). Были собраны многослойные изображения с 2010 по 2016 год, каждое из которых включает композиты с мая (121 день) по ноябрь (329 день).

Далее были получены и обработаны данные MERRA, которые содержат информацию по влагосодержанию почвы на верхнем (0–2 см) и корнеобитаемом слое (0–100 см) почвогрунтов. Подготовка данных осуществлялась в программе ArcGIS 2010. Из полученных данных были извлечены необходимые каналы ROOT и TOP и были собраны многослойные изображения с 2010 по 2016 год с апреля по октябрь.

### Анализ временных серий NDVI, EVI, GPP и LAI

Для того чтобы извлечь числовые характеристики NDVI, EVI, GPP и LAI данных, необходимо векторные слои повреждений 2015 года и здоровых насаждений наложить на каждый полученный слой продуктов MODIS Aqua, и выполнить операцию извлечение данных для каждого композита отдельно. В результате были получены характеристики данных с 2010 по 2016 года с мая по ноябрь, вычислена дельта как разность между фоновыми значениями леса и поврежденными и посчитан доверительный интервал. Все результаты отображены на рис. 1–4.

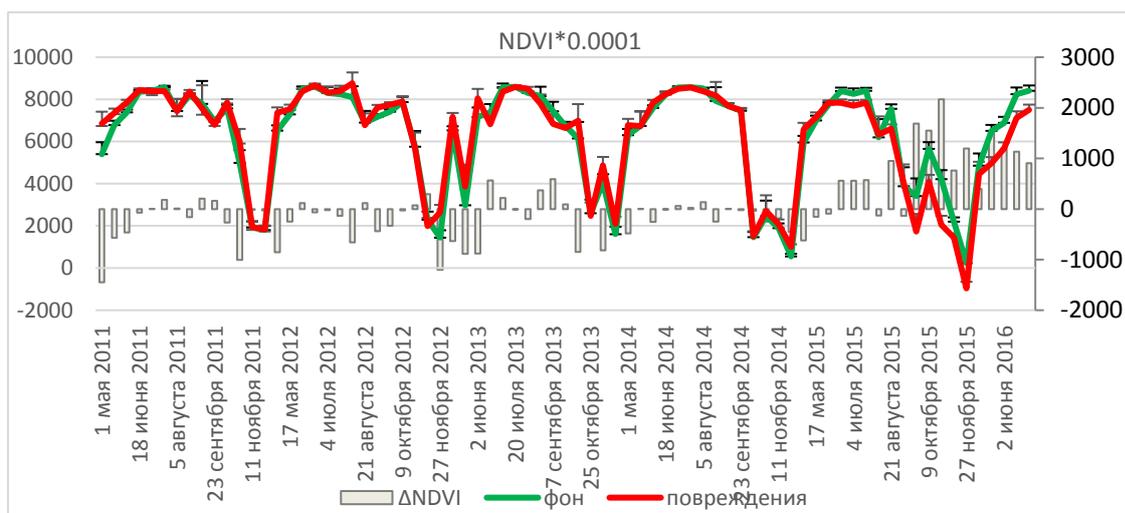


Рис. 1. График временной изменчивости NDVI с 2011 по 2016 год

На рис. 1 представлены значения вегетационного индекса нормализованной разности (NDVI) для поврежденных и фоновых лесов. Можно отметить, что до 2015 года значения NDVI стабильны и начинают расти в вегетационный период. В 2015 и 2016 годы наблюдается разница между поврежденными и фоновыми участками леса, максимум которой составляет 25 %. На рис. 2 представлены значения улучшенного вегетационного индекса (EVI) для поврежденных и фоновых лесов. Здесь можно отметить, что дельта проявляется в 2014 году, когда обнаружили небольшие очаги поврежденных участков леса, далее в 2015 максимум между значениями для повреждений и фона составляет 31 %. На рис. 3 отображены значения валовой первичной продуктивности (GPP). Наблюдается снижение значений в 2015 и 2016 годах, существенное снижение проявляется в 2016 году, которое составляет 39 %. И на рис. 4 представлены значения

индекса листовой поверхности, который также показывает разницу между значениями для фоновых и поврежденных территорий, начиная с 2014 года на раннем обнаружении небольших очагов поврежденных территорий.

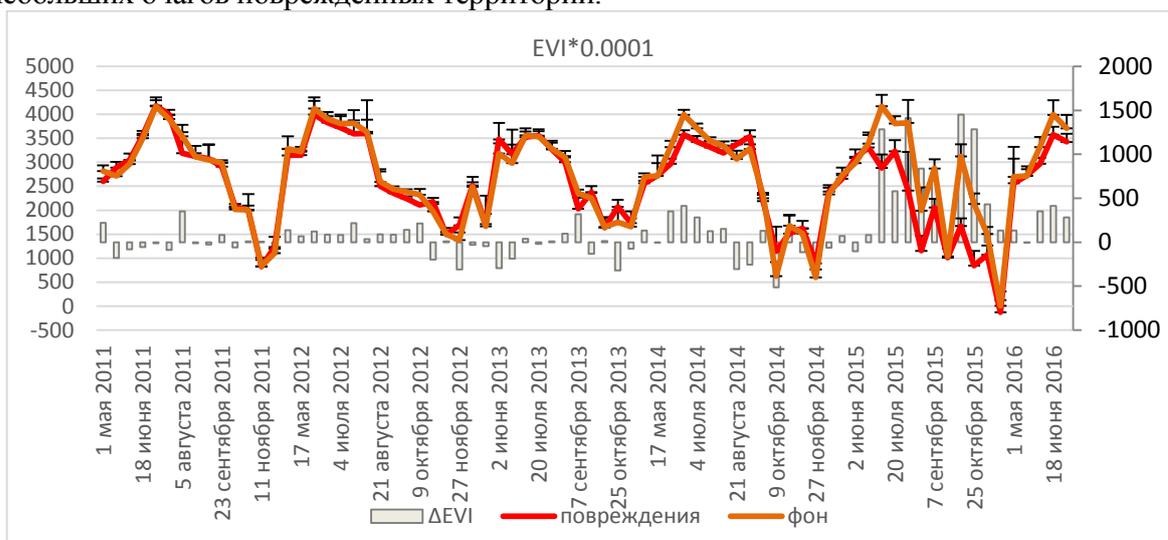


Рис. 2. График временной изменчивости EVI с 2011 по 2016 год

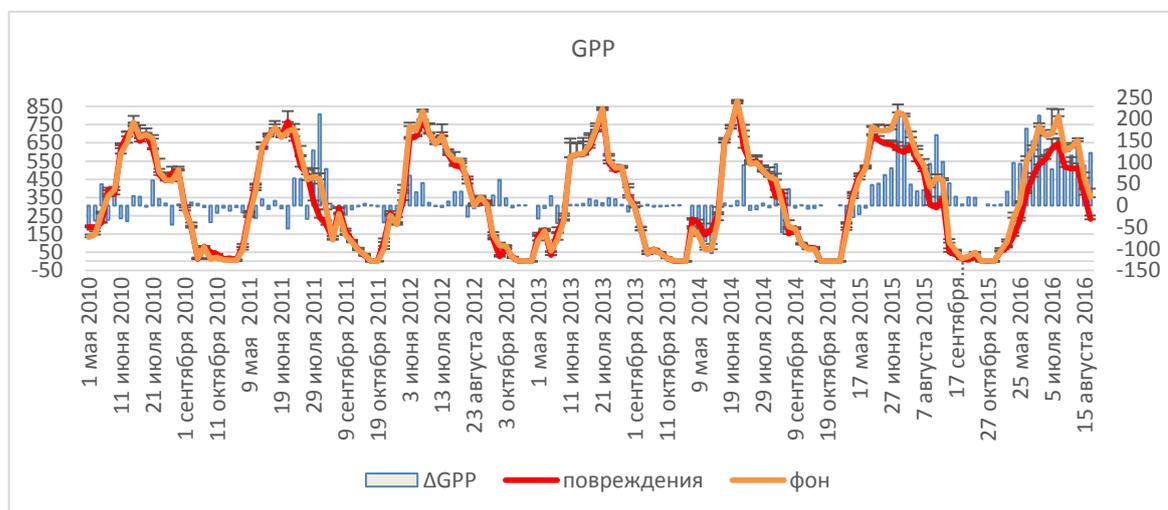


Рис. 3. График временной изменчивости GPP с 2010 по 2016 год

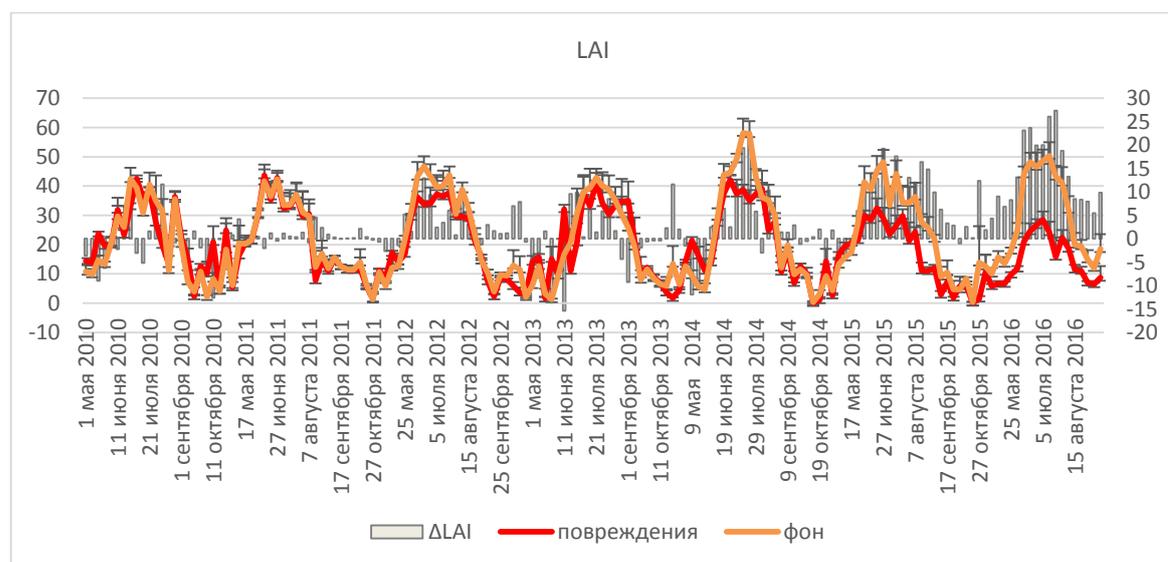


Рис. 4. График временной изменчивости LAI с 2010 по 2016 год

### Взаимосвязь вспышки активности шелкопряда с влажностью почвогрунтов

Для того чтобы извлечь числовые характеристики данных MERRA, необходимо векторные слои повреждений 2015 года и здоровых насаждений наложить на каждый полученный слой и выполнить операцию извлечение данных для каждого композита отдельно. В результате были получены характеристики данных с 2010 по 2016 год с апреля по октябрь и вычислена дельта как разность между фоновыми значениями леса и поврежденными. На рис. 5 можно отметить, что площадь повреждений находится на менее влажном почвогрунте относительно фонового леса, заметно засушливый год отмечается в 2012 году, что могло послужить причиной проявления активности сибирского шелкопряда в 2014 году.

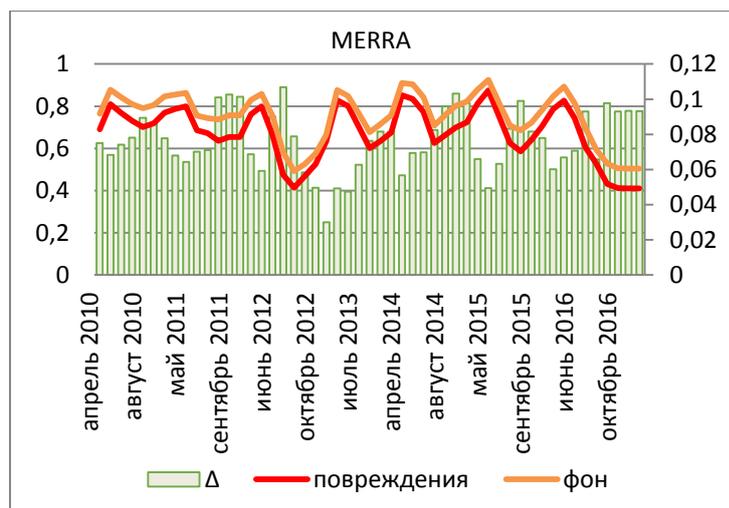


Рис. 5. График временной изменчивости по данным MERRA

### Заключение

Данные MODIS Aqua позволяют обнаружить гибель лесов на ранних стадиях вспышки насекомых-вредителей, это проявляется на данных EVI (продукт MYD13Q1) и LAI (продукт MYD15A2H). По данным NDVI, начало гибели лесов зафиксировано на 2 июня 2015 года, а по данным GPP – начало вспышки 11 июня 2015 года. По данным EVI и LAI, начало гибели фиксируется в 2014 году, когда и была обнаружена вспышка сибирского шелкопряда по данным Landsat. В результате анализа данных MERRA выявлено, что 2012 год послужил благоприятным условиям для активности сибирского шелкопряда, что привело к его вспышке в 2014 году.

### Список литературы

1. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Алтая / В. И. Харук, М. Л. Двинская, Д. А. Демидко, Е. В. Федотова, У. А. Будник // Сиб. экол. журн. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. РАН, 2016. С. 843–854.
2. Им С. Т., Федотова Е. В., Харук В. И. Спектрорадиометрическая космосъемка в анализе зоны вспышки массового размножения сибирского шелкопряда // Журн. Сиб. федер. ун-та, 2008. С. 346–358.
3. NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmoth outbreaks in eastern Siberia / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, A. G. Kozuhovskaya, Y. P. Kondakov, L. A. Pestunov // INT. J. REMOTE SENSING. 2004. V. 25, № 24. P. 5543–5555.
4. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. Siberian silkmoth outbreak pattern analysis based on SPOT VEGETATION data // International Journal of Remote Sensing. 2009. № 30 (9). P. 2377–2388.

**Е. В. Варламова, В. С. Соловьев**

Институт космических исследований и аэронавтики  
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск  
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ NDVI И ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

По данным радиометра AVHRR/NOAA (1982–2014) проведено исследование пространственно-временных вариаций вегетационного индекса NDVI и фенологических параметров растительности Восточной Сибири. Построены карты распределения, графики линейных трендов NDVI и фенологических параметров растительности тестового участка. Рассчитаны корреляции NDVI тестового участка с фенологическими показателями, приземной температурой воздуха и атмосферными осадками.

*Ключевые слова:* AVHRR, NDVI, фенологические параметры, глобальное потепление, Восточная Сибирь.

### **Введение**

Результаты мониторинговых наблюдений за последние несколько десятков лет показывают, что наибольшее потепление климата наблюдается на высоких широтах северного полушария, вызывая соответствующие изменения в природной среде [1]. Одним из индикаторов таких изменений является растительный покров [1–4]. Наиболее чувствительна к вариациям климатических параметров растительность экосистем Севера, которая обладает низким реабилитационным потенциалом, обусловленным суровыми природными условиями.

Целью работы является исследование пространственно-временных вариаций вегетационного индекса NDVI и фенологических параметров растительности Восточной Сибири в условиях глобального потепления климата по данным спутниковых и наземных наблюдений 1982–2014 годов.

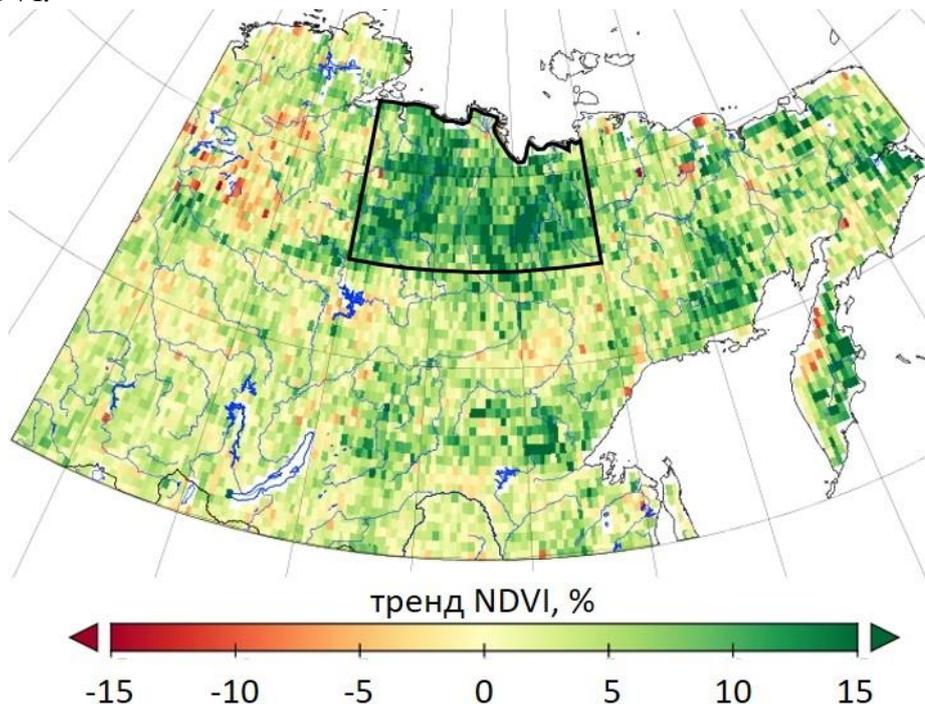
### **Данные и методика**

В работе использованы данные многоканального радиометра AVHRR/NOAA (1982–2014) проекта GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies), представляющие собой распределение 15-дневных значений NDVI с сеткой 0,5×0,5 град. [5]. Значения температуры приземного слоя воздуха и атмосферных осадков взяты из среднемесячного набора данных CRU TS v.3.23 [6]. Среднесуточная приземная температура воздуха рассчитывалась по данным реанализа ERAInterim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>). Для определения фенологических дат вегетационного сезона использована методика [7; 8], согласно которой начало и окончание сезона вегетации определяются временем устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через + 5 °С, соответственно, весной и осенью.

### **Результаты и обсуждения**

На основе данных проекта GIMMS были рассчитаны средние за сезон (май – сентябрь) значения вегетационного индекса NDVI и построена карта линейного тренда

NDVI растительности Восточной Сибири за период 1982–2014 годов, которая представлена на рис. 1. Цветовой кодировкой (см. легенду карты) с шагом 5 % в диапазоне от –15 до +15 % показаны области с различными значениями прироста тренда NDVI.



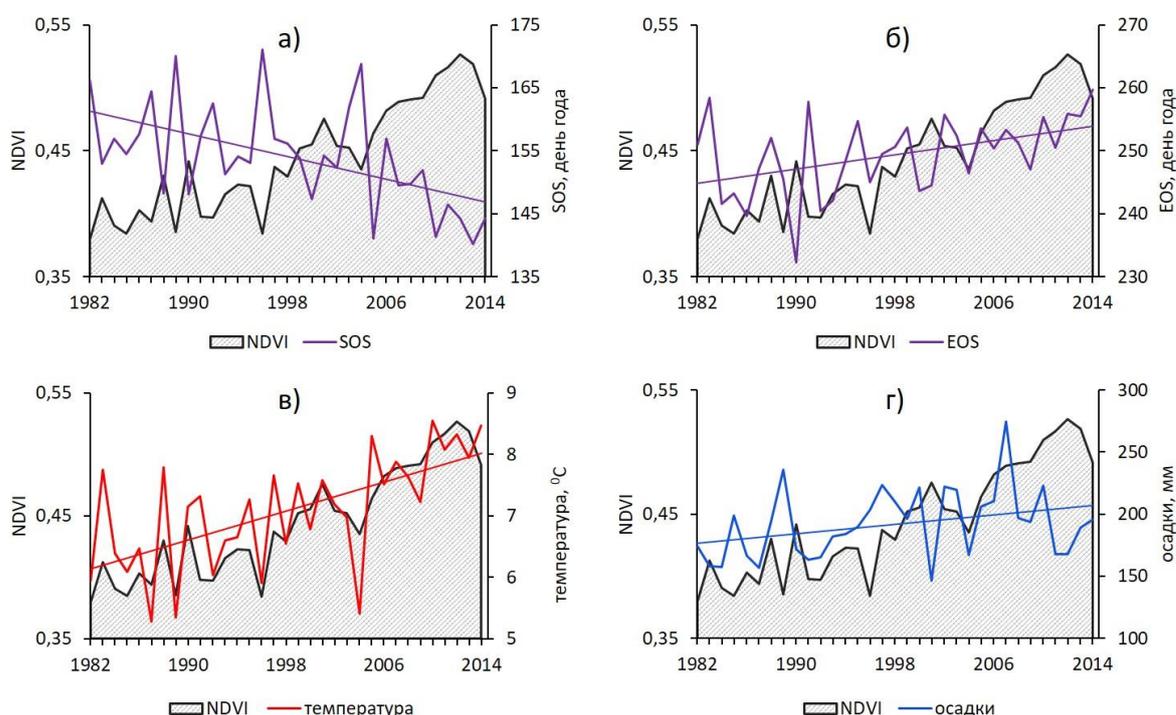
**Рис. 1. Карта тренда NDVI растительности Восточной Сибири за период 1982–2014 годов. Черной линией обозначена граница тестового участка**

Как следует из рис. 1, на севере Якутии (выше 64-й параллели) расположена обширная область с высокими значениями роста NDVI (~10–15 %). Наряду с положительными и/или околонулевыми значениями прироста тренда NDVI наблюдаются небольшие участки с отрицательным (~ –5 – –10 %) приростом NDVI. Тем не менее в целом на территории Восточной Сибири преобладает тенденция роста вегетационного индекса со средним показателем прироста тренда NDVI около 4 %.

Отметим, что за рассматриваемый период (1982–2014) в целом на территории Восточной Сибири преобладает тенденция увеличения длительности сезона вегетации LOS (Length Of growing Season). Средний показатель увеличения LOS составил ~13 дней. Наиболее значительное увеличение длительности сезона вегетации (~30 дней) также наблюдается выше 64-й параллели на севере Якутии.

Для оценки связи роста NDVI с метеопараметрами (приземной температурой воздуха, атмосферными осадками) и фенологическими характеристиками, такими как начало SOS (Start of Growing Season) и окончание EOS (End of Growing Season) вегетационного сезона, на севере Якутии был выбран тестовый участок, на территории которой наблюдается наиболее обширная область с высокими значениями (>10 %) прироста тренда NDVI (рис. 1). Для тестового участка были построены вариации тренда NDVI и фенологических показателей (рис. 2, а–г). Графики указанных параметров имеют изменчивый характер, но в целом описываются выраженными трендами. Из рис. 2, а видно, что SOS растительности тестового участка имеет тенденцию к снижению, что говорит о более раннем начале сезона вегетации. Напротив, EOS (рис. 2, б) имеет положительный тренд, что означает более позднее завершение сезона вегетации. На тестовом участке также наблюдаются рост температуры воздуха (рис. 2, в) и осадков (рис. 2, г).

Значения трендов вариаций параметров, показанных на рис. 2, *а–г*, и коэффициента корреляций NDVI с этими параметрами показаны в таблице. Из таблицы видно, что тренд SOS составляет  $-15$  дней и выше тренда EOS почти в  $\sim 1,5$  раза. Тренды этих параметров указывают на увеличение длительности сезона вегетации (LOS) за счет более раннего начала и позднего завершения сезона вегетации. Также наблюдается значимый рост температуры воздуха, который составил  $\sim 1,90$  C. Рост осадков незначительный  $\sim 32$  мм. Значения коэффициента корреляций NDVI с метеопараметрами и фенологическими характеристиками показывают на тесную связь вариаций NDVI с началом вегетационного сезона SOS ( $R = -0,7$ ) и температурой воздуха ( $R = 0,8$ ). Таким образом, формирование положительного тренда среднесезонных значений NDVI на тестовом участке за исследуемый период обусловлено тенденцией более раннего начала сезона вегетации и ростом температуры воздуха.



**Рис. 2. Вариации сезонных значений NDVI, фенологических сроков и графики линейных трендов растительности и метеопараметров на тестовом участке за 1982–2014 годы: а – NDVI и SOS; б – NDVI и EOS; в – NDVI и температура приземного слоя воздуха; г – NDVI и годовые осадки**

Таблица

**Значения трендов и коэффициента корреляций (R) параметров для тестового участка за 1982–2014 годы**

№	Параметр, ед. изм.	Тренд	R (с NDVI)
1	NDVI, %	14	
2	SOS, дни	$-15$	$-0,7$
3	EOS, дни	9	0,4
4	температура, °C	1,9	0,8
5	осадки, мм	32	0,2

### Заключение

Карта распределения тренда NDVI растительного покрова Восточной Сибири за период 1982–2014 годы неоднородна: присутствует заметная градиация

положительных и отрицательных значений. Однако в целом преобладает положительная динамика со средним ростом тренда NDVI около 4 %. Область с наиболее высоким приростом тренда NDVI (10–15 %) наблюдается на севере Якутии.

Одновременно с ростом NDVI наблюдается увеличение продолжительности сезона вегетации. Средний рост тренда длительности сезона вегетации составил ~13 дней. Наиболее сильное увеличение (~30 дней) длительности сезона вегетации также наблюдается на севере Якутии.

Оценка связи роста NDVI с метеопараметрами (приземной температурой воздуха, атмосферными осадками) и фенологическими характеристиками (SOS, EOS) на тестовом участке показала значимую связь вариаций NDVI с началом сезона вегетации SOS и температурой воздуха. Коэффициент корреляции NDVI с SOS и температурой воздуха составил –0,7 и 0,8 соответственно. Корреляция NDVI с EOS ниже и составила 0,4. Таким образом, увеличение продолжительности вегетационного сезона в основном обусловлено более ранним началом сезона вегетации (SOS).

Тренд осадков за рассматриваемый период незначительный, а коэффициент корреляции с NDVI низкий (0,2). Следовательно, доминирующее влияние на положительную динамику растительности Восточной Сибири оказывает температура воздуха при незначительном влиянии атмосферных осадков.

#### **Список литературы**

1. Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades / J. Zhao, H. Zhang, Z. Zhang, X. Guo, X. Li, C. Chen // *Remote Sensing*. 2015. № 7. P. 10973–10995.
2. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability / A. W. R. Seddon, M. Macias-Fauria, P. R. Long, D. Benz, K.J. Willis // *Nature*. 2016. № 531. P. 229–232.
3. Varlamova E. V., Solovyev V. S. Study of NDVI Variations in Tundra and Taiga Areas of Eastern Siberia (Yakutia) // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. V. 28, № 1. P. 64–67.
4. Varlamova E. V., Solovyev V. S. Research of spatio-temporal variations of vegetation phenological parameters in East Siberia. Climate and permafrost ecosystems: “C/H<sub>2</sub>O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with special emphasis on Eastern Eurasia”. Proceedings of IX<sup>th</sup> International Symposium. Yakutsk. 1–4 November. 2016. Nagoya: Nagoya University Publishing House, 2016. P. 106.
5. Tucker C. J., Pinzon J. E., and Brown M. E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies. NA94apr15b.n11-VIg, 2.0. Global Land Cover Facility. University of Maryland. College Park. Maryland. 04/15/1994. 2004.
6. Jones P. D., Harris I. University of East Anglia Climatic Research Unit, CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-Month Variation in Climate (Jan. 1901–Dec. 2013). NCAS British Atmospheric Data Centre: Didcot. UK, 2014. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>.
7. Jones P. D., Briffa K. R. Growing season temperatures over the former Soviet Union // *International Journal of Climatology*. 1995. V. 15. P. 943–959
8. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century / P. Frich, L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, T. Peterson // *Climate Research*. 2002. V. 19. P. 193–212.

**Г. С. Высоцкая<sup>(1)</sup>, А. И. Волкова<sup>(2)</sup>, И. Ю. Ботвич<sup>(1)</sup>,  
Ю. Д. Иванова<sup>(1)</sup>, Н. А. Кононова<sup>(1)</sup>, А. П. Шевырнов<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

<sup>(2)</sup> Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан  
e-mail: g\_vys@rambler.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА БИОРАЗНООБРАЗИЯ ТРАВЯНИСТЫХ СООБЩЕСТВ**

В настоящей работе рассмотрены возможности использования спектральных данных травянистых сообществ Хакасии и юга Красноярского края, полученных при использовании полевого спектрофотометра, для мониторинга растительного биоразнообразия. Решалась задача поиска метода дифференциации различных травянистых растительных сообществ по их спектральным портретам. Наряду с этим изучалась зависимость спектра растительного сообщества от фенологической стадии развития во время вегетационного сезона.

*Ключевые слова:* полевая спектрометрия, подспутниковые полигоны, травянистое растительное сообщество.

На сегодняшний день данные спутникового зондирования Земли занимают ведущее место в арсенале средств, применяемых при проведении мониторинга окружающей среды. Перечень тематических задач, решаемых по данным дистанционного зондирования Земли, очень разнообразен. Широкое использование изображений, полученных из космоса, часто создает обманчивое представление о легкости получения надежной информации при их применении. К сожалению, приходится констатировать тот факт, что для серьезных исследований и прогнозов получить достоверные данные о состоянии природных объектов и их динамике, используя только данные космических наблюдений, довольно сложная и не всегда решаемая задача [1]. Надежность информации, извлеченной из данных космического зондирования, в наибольшей степени зависит от количества и качества знаний о свойствах изучаемых объектов, находящихся на поверхности Земли. Изучение космических изображений высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, а также гиперспектральных изображений требует адекватного уровня точности наземных измерений, которые лежат в основе интерпретации изображений.

Целью данной работы являлось изучение травянистых растительных сообществ Хакасии и Красноярского края на выбранных подспутниковых полигонах с помощью полевого спектрометра в течение вегетационного сезона для дешифрирования и анализа информации со снимков среднего и низкого разрешения. Основная гипотеза исследований состоит в том, что в спектральном образе растительного сообщества будут качественно и количественно отражаться видовой состав фитоценоза, содержание влаги, фенологическое состояние, условия произрастания и другие факторы. Существенные различия спектральных образов различных по составу видов растительных сообществ позволяют говорить о возможности интерпретации их по материалам дистанционного зондирования, причем даже на уровне степени участия отдельного вида в формировании результирующей яркости пикселя [2]. Многолетние

исследования многих авторов свидетельствуют о способности растительности избирательно отражать падающую солнечную радиацию в зависимости от ее видового состава и состояния растений [3; 4].

**Описание района исследований.** Исследования проводились в центральном районе Красноярского края в пределах Красноярской лесостепи (Емельяновский район) и в центральной части Ширинского района Республики Хакасии в пределах степной и лесостепной зон. Красноярская лесостепь располагается в пределах Приенисейской денудационной равнины, в которой почвенно-растительный покров характеризуется концентрической зональностью, являющейся частным проявлением вертикальной поясности. Ширинский район, согласно геоботаническому районированию геоботаническому районированию, относится к Июсо-Ширинскому (Северо-Хакасскому) степному геоботаническому округу провинции Минусинской котловины. Общий рельеф территории холмисто-равнинный. Равнинные участки отделены друг от друга моноклинальными куэстовыми грядами с резко ассиметричными склонами и широкими плоскими ложбинами между гряд. В ходе исследований изучены растительные сообщества луговых, настоящих крупнодерновинных и мелкодерновинных степей, а также остепненных злаково-разнотравных суходольных лугов (таблица).

Таблица

Основные параметры исследуемых растительных сообществ

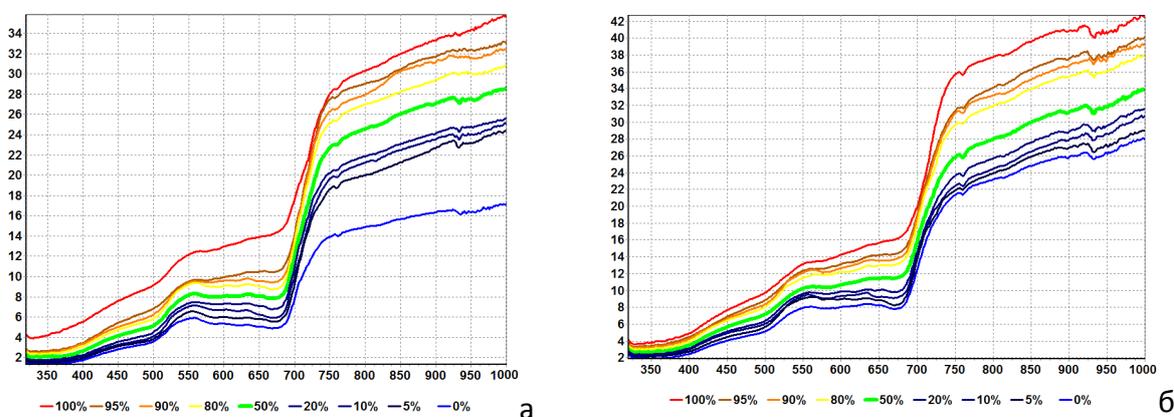
№ участка	Растительное сообщество
1	<b>Настоящие степи:</b> разнотравно-злаковое ( <i>Festuca valesiaca</i> + <i>Koeleria cristata</i> – <i>heteroherbae</i> ), разнотравно-типчачковое ( <i>Festuca valesiaca</i> + <i>heteroherbae</i> ), злаково-типчачковое с ирисом ( <i>Festuca valesiaca</i> +мелкодерновинные злаки– <i>Iris biglumis</i> ), разнотравно-осоково-ковыльное с караганой ( <i>Stipa capillata</i> + <i>Caragana rugmaea</i> – <i>Carex pediformis</i> + <i>heteroherbae</i> ), разнотравно-злаково-ковыльное с караганой ( <i>Stipa capillata</i> + <i>Caragana rugmaea</i> –мелкодерновинные злаки+ <i>heteroherbae</i> , разнотравно-злаково-пикульниковое ( <i>Iris biglumis</i> –мелкодерновинные злаки+ <i>heteroherbae</i> )
2	<b>Луговые степи:</b> Злаково-ирисово-разнотравное ( <i>Heteroherbae</i> + <i>Iris ruthenica</i> +мелкодерновинные злаки), разнотравно-злаковое с курильским чаем ( <i>Stipa capillata</i> + <i>Pentaphylloides fruticosa</i> –крупнодерновинные злаки+ <i>heteroherbae</i> ). <b>Остепненные суходольные луга:</b> злаково-разнотравное ( <i>Heteroherbae</i> – <i>Phleum phleoides</i> + <i>Festuca pratensis</i> )
3	<b>Настоящие степи:</b> полынно-злаковое ( <i>Festuca valesiaca</i> + <i>Koeleria cristata</i> – <i>Artemisia frigida</i> ), осочково-злаковое ( <i>Festuca valesiaca</i> + <i>Koeleria cristata</i> + <i>Carex pediformis</i> ), разнотравно-злаковое с караганой ( <i>Caragana rugmaea</i> –мелкодерновинные злаки+ <i>heteroherbae</i> , злаково-ковыльное ( <i>Stipa capillata</i> – <i>Festuca valesiaca</i> + <i>Koeleria cristata</i> )
4	<b>Луговые степи:</b> (нарушенные): разнотравно-злаковое ( <i>Helictotrichon hookeri</i> + <i>Poa pratensis</i> – <i>Potentilla multifidi</i> + <i>Heteroherbae</i> )

**Приборная база.** Для создания базы спектральных данных использовался полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрофотометра PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и программного обеспечение DARWin SP и DARWin Compact 1.2. Благодаря портативности и автономности при высоких технических характеристиках, спектрофотометр PSR-1100F успешно применяется для полевых спектральных измерений при подспутниковых

экспериментах. Данный спектрофотометр принимает и хранит до 2500 спектров, имеет автоматическую экспозицию и съемку. Полученные спектры имеют GPS привязку, данные о высоте местности, фото и голосовые заметки. Спектрофотометр совместно с приложением DARWin позволяет проводить измерения темновых токов, абсолютных энергетических значений излучения объекта и спектров отражения.

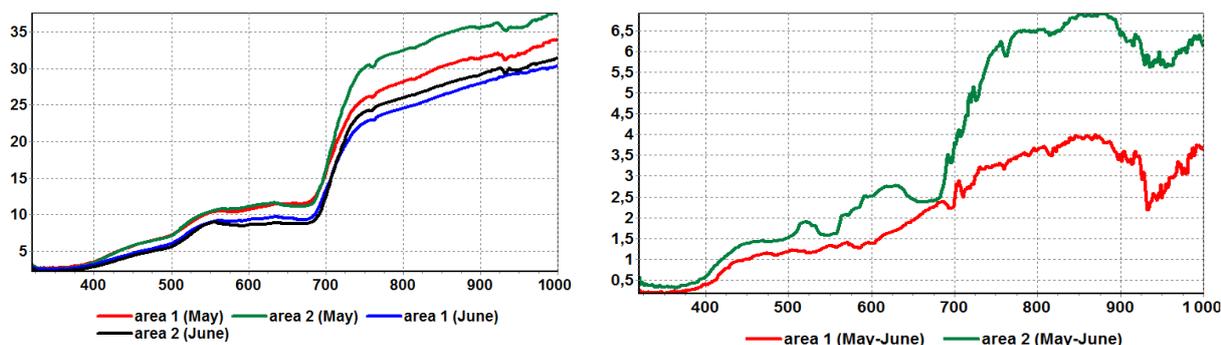
**Метод и результат исследований.** Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать коэффициентом спектральной яркости (КСЯ). КСЯ – это фотометрическая функция, которая характеризует структуру отраженного поверхностью излучения, как по длинам волн, так и по условиям наблюдения и освещения. Условия наблюдения определяются (надирным углом сканирования и азимутальным углом между вертикалями сканирования и источника освещения (Солнца), который отсчитывается от направления на источник. Условия освещения обычно определяются углом высоты Солнца.

По определению, КСЯ есть отношение спектральной плотности энергетической яркости исследуемой поверхности к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей эталонной поверхности. Смешанный видовой состав растительности и ее различная плотность на выбранных участках приводит к значительной вариабельности измеренных КСЯ. На рис. 1, а приведены графики процентилей для участка № 1, расположенного в районе озера Шира. N-й перцентиль – это число, ниже которого находится N % всех наблюдений. Значения перцентили 50 % соответствуют медиане, перцентиль 100 % показывает максимальные значения выполненных измерений, 0 % – минимальные. Даже если отбросить крайние значения, разброс внутри выборки слишком велик. Поэтому для дифференциации различных сообществ необходимо выполнять измерения КСЯ в различные моменты времени. На рис. 1, б приведены графики процентилей для одного из участков подспутникового полигона в районе в районе с. Погорелка, пригород г. Красноярска (29.5.2017 г.), где также наблюдается существенная внутренняя вариабельность КСЯ.



**Рис. 1. Перцентили распределения значений коэффициентов спектральной яркости:**  
**а** – на одном из участков подспутникового полигона в районе озера Шира (8.6.2017);  
**б** – на одном из участков подспутникового полигона в районе в районе с. Погорелка, пригород г. Красноярска (29.5.2017)

На рис. 2, а приведены средние значения КСЯ на смежных участках подспутникового полигона в районе с. Погорелка, пригород г. Красноярска. Измерения проводились 29 мая и 15 июня 2017 года. Средние значения КСЯ для июня практически совпадают. Более информативным показателем является разность между майскими и июньскими средними значениями коэффициентов спектральной яркости. На рис. 2, б также хорошо виден различный характер динамики КСЯ для длин волн в интервале 500–680 нм, который практически незаметен на рис. 2, а.



а

б

**Рис. 2. а** – средние значения коэффициентов спектральной яркости на смежных участках подспутникового полигона в районе с. Погорелка, пригород Красноярск. Измерения проводились 29 мая и 15 июня 2017 года; **б** – разность между майскими и июньскими средними значениями коэффициентов спектральной яркости

### Заключение

Травянистые растительные сообщества Республики Хакасия и юга Красноярского края чутко реагируют на изменения условий местопроизрастания и эта реакция, в первую очередь, отражается в качественном изменении видового состава и количественном соотношении между собой видов, составляющих растительное сообщество. Рассмотренные растительные сообщества подвергаются модифицирующему влиянию, как естественных факторов (климатические тренды, приводящие к изменению условий увлажнения, продолжительности вегетационного периода, количеству солнечных дней и т. п.), так и антропогенному воздействию (механическое воздействие на растительное сообщество, выпас скота, загрязнение воздуха, почв и водных объектов). Таким образом, предлагаемый в работе метод дифференциации различных травянистых растительных сообществ по их спектральным образам можно успешно использовать для мониторинга растительного биоразнообразия. В дальнейшем, данное исследование позволит создать основу для более точного дешифрирования динамики биоразнообразия изученных растительных сообществ на основе космических данных.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта № 17-05-41012.*

### Список литературы

1. Larko A. A., Ivanova Ju. D., Shevyrnogov A. P. Technology to Detect Anomalies of Net Primary Production of Vegetation Dynamics on the Basis of Non-Linear Trends (MODIS NPP) // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2017. 10 (1). P. 113–125.
2. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков / М. В. Зимин, О. В. Тутубалина, Е. И. Голубева, Г. У. Рис // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. No 4. С. 34–41.
3. Полевое наземное спектрометрирование луговой растительности полигона «Сатино» / Г. Н. Огуреева, И. М. Микляева, О. В. Вахнина, О. В. Тутубалина // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. № 6. С. 71–77.
4. Ground-based hyperspectral characterization of Alaska tundra vegetation along environmental gradients / M. Buchhorn; D. A. Walker; B. Heim; M. K. Raynolds; H. E. Epstein; M. Schwieder // Remote Sens. 2013. 5. 3971–4005.

**О. В. Григорьева, А. В. Марков, А. Г. Саидов, В. В. Терентьева**

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург  
e-mail: mysnow@mail.ru

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ  
ЛЕСНЫХ ФОРМАЦИЙ ПО СЕРИИ  
РАЗНОСЕЗОННЫХ ДАННЫХ  
МНОГО- И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

**O. V. Grigoryeva, A. V. Markov, A. G. Saidov, V. V. Terentyeva**

Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Saint-Petersburg  
e-mail: mysnow@mail.ru

**THE DETECTION OF THE MAIN CLASSES  
OF FOREST USING MULTISPECTRAL  
AND HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING DATA**

Представлен алгоритм классификации лесных массивов по основным типам формаций, отличительной особенностью которого является использование серии разновременных данных много- и гиперспектральной съемки, полученных в разные фенологические периоды. Алгоритм основан на использовании оригинальной системы признаков, учитывающей сезонные вариации спектральных свойств различных пород деревьев.

*Ключевые слова: многоспектральная и гиперспектральная съемки, лесные массивы, спектральные признаки, фенологические периоды, разновременные данные.*

К одной из актуальных практических задач, эффективно решаемых с помощью современных космических оптико-электронных средств многоспектральной (МС) и гиперспектральной (ГС) съемки, относится мониторинг лесных массивов. При обработке МС и ГС данных, используя эталонные спектральные признаки древесной растительности, возможно в автоматизированном режиме осуществлять разделение лесных и нелесных земель, инвентаризацию лесов, обнаружение повреждений лесных насаждений вследствие пожаров, деградации или лесопатологических изменений [1].

Среди задач, относящихся к инвентаризации лесов, наиболее сложной является классификация лесных массивов по породному составу, так как спектральные свойства различных лесных формаций могут существенно варьироваться в зависимости от периода вегетации, условий произрастания, сомкнутости крон и других факторов. Это обстоятельство в ряде случаев обуславливает при решении данной задачи низкую эффективность традиционно используемых методов классификации изображений (максимального правдоподобия, спектрального угла, опорных векторов, искусственных нейронных сетей и т. д.). Особенно значительные погрешности наблюдаются при обработке одиночных реализаций МС или ГС данных, так как в пределах одного вегетационного периода, как правило, нельзя достоверно расклассифицировать все многообразие породного состава деревьев (в особенности лиственных), которые могут иметь близкие спектральные характеристики (СХ).

Существенное повышение результативности определения классов лесных формаций возможно при совместном анализе МС или ГС данных, полученных в разные

фенологические периоды (фенофазы). При этом даже использование материалов всего двух одновременных сеансов съемки может обеспечить значительно лучшие результаты классификации по сравнению с обработкой одиночного МС или ГС снимка.

Следует учитывать, что важным условием успешного решения рассматриваемой задачи является выбор для съемки периодов, в которых наблюдается наилучшая спектральная различимость породного состава деревьев. Такие информативные периоды определяются природно-климатическими условиями исследуемого региона [2]. Например, анализ закономерностей изменения СХ лесных насаждений, характерных для северо-западного региона России, показывает, что для их классификации рекомендуется использовать данные, полученные на временном интервале от субсезона весенней вегетации до основного периода осени (листопада), в пределах которого выделяют четыре фенофазы растительности.

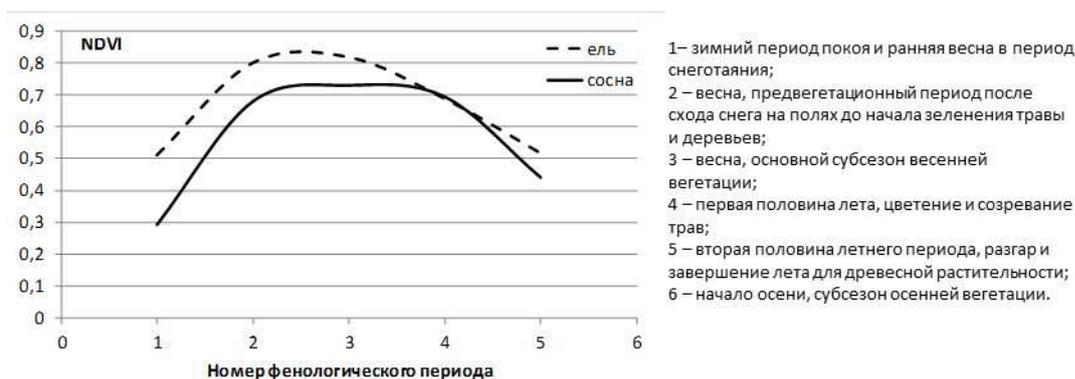
Представленный в статье алгоритм определения породного состава лесов по разновременным данным состоит из двух основных этапов и обеспечивает обработку материалов МС и ГС съемки, относящихся к любому количеству фенологических периодов.

На первом этапе выполнения алгоритма осуществляется исключение из процесса дальнейшей обработки фрагментов изображения (фона), не относящихся к лесу, на основе анализа сезонных изменений вегетационного индекса NDVI, который является индикатором, характеризующим физиологическое состояние растительных ценозов на различных стадиях их вегетации.

Решение о принадлежности пикселя изображения к древесной растительности принимается на основе следующего правила: если сезонные колебания NDVI можно аппроксимировать квадратичной функцией с достоверностью  $P = 0,95$  и его значение в наиболее активную фазу вегетации больше или равно пороговой величине  $NDVI_{пор}$ , рассчитанной по эталонному спектру для соответствующей фенофазы, то пиксель относится к участку леса или травянисто-кустарниковой растительности. Например, для осины временной ряд сезонных изменений NDVI (см. рисунок) может быть описан функцией

$$NDVI = -0,1F^2 + 0,4F + 0,35,$$

где  $F$  – номер фенологического периода.



**Рисунок. Сезонные изменения вегетационного индекса хвойных пород**

В случае, когда распознавание ведется по данным только для двух фенофаз, используется следующее правило: если величина корреляции между спектрами двух фенофаз достаточно высока  $k \geq 0,97$  и значение NDVI в наиболее активный период вегетации меньше  $NDVI_{пор}$ , то пиксель относится к фону и исключается из дальнейшей обработки.

На втором этапе производится анализ изменений спектральных сигнатур, исследуемых классов лесных формаций и формирование набора спектральных признаков, по которым будет производиться классификация. К этим признакам, рассчитываемым на МС или ГС изображениях в окне сканирования заданного размера, относятся:

- разница между средними значениями спектральной яркости  $r(\lambda)$  в окне сканирования для каждой пары  $(i, j)$  фенологических периодов  $\Delta_{F_i F_j}^\lambda = r_{F_i}(\lambda) - r_{F_j}(\lambda)$ ;
- коэффициент корреляции между спектральными сигнатурами для каждой пары  $(i, j)$  фенологических периодов  $k_{F_i F_j}$ ;
- функция взаимной корреляции

$$R(m, n) = \frac{1}{MN} \frac{\sum_{\lambda=1}^M \sum_{F=1}^N r'(\lambda, F) r'(\lambda + m; F + n)}{\sigma_r(\lambda, F) \sigma_r(\lambda + m, F + n)},$$

где  $N$  – количество анализируемых фенологических периодов;  $M$  – число спектральных каналов;  $r(\lambda, F)$  – функция КСЯ от длины волны  $\lambda$  и фенологического периода  $F$ ;  $r'(\lambda, F) = r(\lambda, F) - s_r(\lambda, F)$  – центрированная реализация точки  $(\lambda, F)$  для функции  $r(\lambda, F)$ ;  $s_r(\lambda, F)$  и  $\sigma_r(\lambda, F)$  – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение функции  $r(\lambda, F)$ ;  $n$  – величина смещения относительно фенологического периода;  $m$  – величина смещения относительно спектрального канала;

– длина волны  $\lambda$  и значения яркости  $r(\lambda)$  на этой длине, соответствующие области пересечения спектральных сигнатур для каждой пары фенологических периодов.

При расчете  $\Delta_{F_i F_j}^\lambda$  получают  $M$  диагональных матриц  $\Lambda_\lambda$  размером  $N \times N$ , а при определении  $k_{F_i F_j}$  – одну матрицу  $K$  размером  $N \times N$ :

$$\Lambda_\lambda = \begin{bmatrix} 0 & \Delta_{F_2 F_1}^\lambda & \Delta_{F_3 F_1}^\lambda & \dots & \Delta_{F_N F_1}^\lambda \\ & 0 & \Delta_{F_3 F_2}^\lambda & \dots & \Delta_{F_N F_2}^\lambda \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & \Delta_{F_N F_{N-1}}^\lambda \\ & & & \dots & 0 \end{bmatrix} \text{ и } K = \begin{bmatrix} 1 & k_{F_2 F_1} & k_{F_3 F_1} & \dots & k_{F_N F_1} \\ & 1 & k_{F_3 F_2} & \dots & k_{F_N F_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & k_{F_N F_{N-1}} \\ & & & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

где  $k_{F_i F_j}$  – коэффициент корреляции между спектральными сигнатурами, полученными в фенологические периоды  $i$  и  $j$ .

Далее с помощью созданной построенной системы спектральных признаков осуществляется классификация изображения. При этом в зависимости от используемого метода сравнение построенных полей спектральных изменений с эталонными производится с помощью следующих критериев:

- метрики Махаланобиса  $M$  [3], где матрица  $\Lambda_\lambda$  представляет собой выборку в спектральном канале  $\lambda$ , а коэффициент ковариации в матрице ковариации рассчитывается по следующей формуле:

$$c_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{1}{(N-1)^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \Delta_{F_i F_j}^{\lambda_1} - \Delta_{cp}^{\lambda_1} \right) \left( \Delta_{F_i F_j}^{\lambda_2} - \Delta_{cp}^{\lambda_2} \right),$$

где  $\Delta_{cp}^{\lambda_1}$  и  $\Delta_{cp}^{\lambda_2}$  – средние значения элементов матрицы  $\Lambda_{\lambda_1}$  и  $\Lambda_{\lambda_2}$  соответственно;

- Евклидова расстояния для оценки близости матриц корреляции  $K$ :

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (k_{FF_j} - k_{FF_j}^y)^2},$$

где  $k_{FF_j}$  и  $k_{FF_j}^y$  – значения элементов матрицы  $K$  изображения и эталона соответственно;

– критерия соответствия функции взаимной корреляции  $R$  изображения и эталона в виде различных метрик.

В результате пиксель в окне сканирования относится к тому классу древесной породы, расстояние  $M$  или  $E$  до которой минимально, а критерий соответствия для функций  $R$  достигает максимума.

При анализе данных только за две фазы вегетации в качестве критерия отнесения пикселя к одному из эталонов предлагается использовать:

– метрику Теребижа между векторами  $\Delta_{F_1 F_2}^{\lambda_1} \dots \Delta_{F_1 F_2}^{\lambda_M}$  для изображения и эталона [4];

– область пересечения  $(\lambda, r(\lambda))$  спектральных сигнатур, соответствующих разным фенофазам, полученную по эталонным спектрам с учетом допустимой погрешности, (по длине волны можно принять 10 нм; по значению КСЯ – 0,1).

Верификация рассмотренного алгоритма при обработке данных, зарегистрированных МС и ГС камерами космического аппарата «Ресурс-П», показала, что использование предложенного методического подхода позволяет по динамике спектральной яркости лесных формаций судить не только о физиологическом состоянии и фенологической фазе развития древостоев, но и определять их тип. При этом уменьшается ошибка классификации, а сегментация лесных формаций становится более детальной по сравнению с результатами обработки одиночных космических снимков. Практическая значимость алгоритма определяется также возможностью использования его как для целей лесной инвентаризации, так и для определения устойчивости экосистемы территории, одним из основных адаптационных показателей которой является динамика изменения состава и состояния лесов [5; 6].

### Список литературы

1. Григорьева О. В. Наблюдение деградации лесов по данным гиперспектрального аэро- и космического зондирования // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 43–48.
2. Григорьева О. В., Чапурский Л. И. Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9, № 3. 2012. С. 18–25.
3. Роберт А. Шовенгердт. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
4. Теребиж В. Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
5. Совершенствование информационного обеспечения строительства и эксплуатации космодрома «Восточный» на основе использования данных аэрокосмической съемки и мобильных геоинформационных технологий / В. А. Зеленцов, А. В. Пузанов, О. В. Григорьева, С. А. Потрясаев, В. Ф. Мочалов, Б. В. Соколов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 2. С. 45–56.
6. Возможности данных аэрокосмической съемки для анализа динамики изменения экологического состояния военных объектов Крайнего Севера / О. В. Григорьева, В. В. Терентьева, М. О. Иванец, Д. В. Жуков // Материалы III Всерос. науч. конф. «Экология и космос» имени академика К. Я. Кондратьева. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. С. 76–83.

**М. Ю. Грищенко<sup>(1, 2)</sup>, А. В. Устюхина<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>(2)</sup> Государственный природный заповедник «Курильский»,

Сахалинская область, поселок Южно-Курильск

e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

## **КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ И ПОСТВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

**M. Y. Grishchenko<sup>(1, 2)</sup>, A. V. Ustyukhina<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>M. V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography

<sup>(2)</sup>State nature reserve «Kurilskiy», Sakhalin oblast, Yuzhno-Kurilsk

e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

## **MAPPING THE VOLCANIC AND POSTVOLCANIC ACTIVITY USING THERMAL INFRARED SATELLITE IMAGES**

В статье представлены результаты разработки методики картографирования проявлений вулканической и поствулканической активности и связанных с ними процессов на основе дешифрирования тепловых космических снимков. Результаты дешифрирования таких снимков позволяют составлять карты пепловых полей, тепловых аномалий, динамики лавовых потоков, температуры земной поверхности и др.

*Ключевые слова: тепловые космические снимки, географическое дешифрирование, вулканическая активность, поствулканическая активность, тематические карты.*

### **Введение**

Одной из целей географической картографии является отображение и исследование геосистем. Вулканическая активность оказывает значительное влияние на геосистемы, а также на населенные пункты, расположенные в непосредственной близости к проявлениям вулканической активности. Существенно и влияние, оказываемое на геосистемы проявлениями поствулканической активности, – фумарольными и сольфатарными полями, термальными водотоками и источниками, термальными озерами. Очевидно, существует необходимость детального изучения и картографирования рассматриваемых явлений. Одним из методов изучения вулканической и поствулканической активности является дешифрирование материалов дистанционного зондирования. Так как вулканическая и поствулканическая деятельность связана с выбросами большого количества тепла, которое позволяет регистрировать съемка в тепловом инфракрасном диапазоне [1], то материалы дистанционного зондирования преимущественно в тепловом диапазоне и результаты их дешифрирования являются ценным и в некотором роде перспективным источником данных для картографирования рассматриваемых объектов и процессов. Преимуществом дистанционного метода изучения проявлений вулканической и поствулканической активности является также удобство его применения для труднодоступных районов. К настоящему времени разработана методика создания карт вулканической активности на основе метода радиолокационной интерферометрии [2];

в данной работе рассмотрена методика создания карт вулканической тематики на основе космических снимков в тепловом диапазоне.

### **Материалы и методика**

Основная изучаемая территория в настоящей работе – Курильские острова. Как вспомогательные рассмотрены вулканы полуострова Камчатка и острова Исландия, для которых характерны схожие явления, расположенные в схожих по климатическим параметрам районах.

В ходе исследования использованы снимки, полученные съемочными системами ТМ (спутник Landsat 5), ЕТМ+ (спутник Landsat 7), ТИРС (спутник Landsat 8), АСТЕР (спутник Тетра). Снимки со спутников Landsat 5, 7, 8 находятся в свободном доступе на портале Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS). Основными критериями выбора снимков стали пространственный охват, пространственное разрешение, покрытие облаками, сопоставимость. Еще одним фактором, влияющим на выбор космических снимков, является дата съемки. Предпочтение отдавалось снимкам, дата съемки которых совпадала с датами крупных извержений, которые рассматривались в работе.

Помимо космических снимков в работе использованы текстовые источники (статьи и монографии), топографические карты и цифровые модели местности.

В процессе исследования применялись такие методические приемы, как визуальное дешифрирование одиночных тепловых снимков, с целью выявления тепловых аномалий – визуальное дешифрирование синтезированных снимков и расчет значений температуры земной поверхности по тепловым снимкам.

### **Результаты**

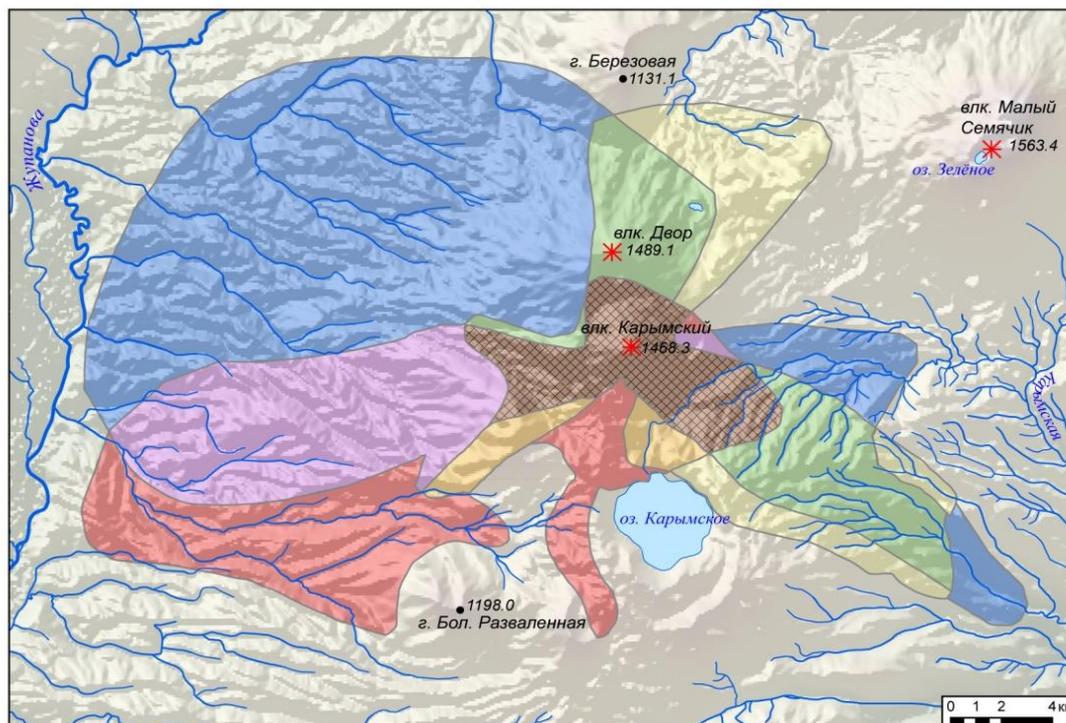
Результатом работы является разработанная методика создания на основе дешифрирования тепловых космических снимков следующих видов карт:

- пепловых полей;
- тепловых аномалий;
- динамики лавовых потоков;
- значений температуры земной поверхности;
- расположения проявлений вулканической и поствулканической активности.

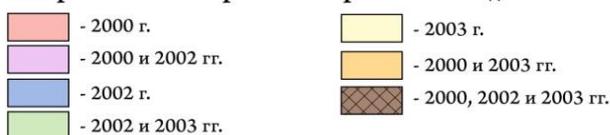
Ниже на рисунке приведен пример созданной карты пепловых полей. Карта иллюстрирует участки, которые были покрыты пепловыми полями в течение различных промежутков времени в период извержения вулкана Карымский (Камчатка) в 2000–2003 годах. На основе анализа карты можно сделать вывод, что пепловые поля распространялись во всех направлениях от вершинного кратера вулкана, однако самая маленькая площадь (относительно других направлений от кратера) была покрыта пеплом в северо-западном и южном направлениях от вершинного кратера. Площадь участка, засыпанного пеплом в ходе извержения, составляет 40 км<sup>2</sup>, наиболее обширные по площади пеплопады происходили в 2002 году – пеплом были покрыты долины некоторых притоков рек Жупанова и Карымская, конус вулкана Двор.

Примерами карт температуры земной поверхности являются карты температуры земной поверхности: до извержения 2014–2015 годов вулкана Баурдарбунга (Исландия); в разные периоды извержения. Карта иллюстрирует, что в течение извержения значительно менялся характер распределения значений температуры. 6 сентября 2014 года, когда наблюдался пик активности вулкана, площадь территории со значениями температуры 100 °С и выше составила 50,1 км<sup>2</sup>, а 3 января 2015 года – 10,7 км<sup>2</sup>, что в 4,7 раза меньше, чем 6 сентября 2014 года. С 6 сентября 2014 года по 3 января 2015 года изменился характер распределения значений температуры: 6 сентября 2014 года изотермы расположены параллельно трещине, из которой

происходило излияние лавы, область со значениями температуры земной поверхности выше 80 °С является единым полигоном, а 3 января 2015 года наблюдаются лишь локальные повышения значений температуры.



**Территории, покрытые пепловыми полями в ходе извержения влк. Карымский в различные годы:**



**Рисунок. Пепловые поля вулкана Карымский в 2000–2003 годы**

В качестве иллюстрации применения методики создания карт положительных тепловых аномалий составлена карта этого же извержения вулкана Баурдарбунга. Карта иллюстрирует, что границы тепловых аномалий сильно менялись в ходе извержения, однако существует небольшой участок площадью 8 км<sup>2</sup>, где положительные тепловые аномалии наблюдаются на протяжении всего извержения. На этом участке зафиксированы самые высокие значения температуры земной поверхности. Наибольшие по площади положительные тепловые аномалии зафиксированы в сентябре и октябре 2014 года, что связано с тем, что в это время наблюдались наиболее крупные выбросы лавы из главной трещины извержения. Наименьшие по площади тепловые аномалии наблюдались в декабре 2014 года и январе 2015 года, когда извержение уже заканчивалось.

### Методические выводы

В ходе разработки методики составления карт указанной выше тематики были сформулированы следующие методические выводы.

1. Для дешифрирования парогазовых облаков синтез каналов средний инфракрасный – ближний инфракрасный – зеленый подходит лучше, нежели варианты синтеза, в которых используются только снимки оптического диапазона. В предлагаемом варианте синтеза отчетливо выделяется пепловый шлейф, в то время

как на снимках в других диапазонах он может плохо дешифроваться или не дешифроваться вовсе. По тепловым космическим снимкам можно отделять парогазовые облака от атмосферной облачности.

2. По тепловым космическим снимкам можно определять типы извержений (эксплозивные или эффузивные). С эффузивными извержениями связаны крупные по площади тепловые аномалии, приуроченные к лавовым потокам; при эксплозивных извержениях тепловые аномалии существенно более локализованные.

3. Тепловые снимки могут быть ценным источником информации о динамике вулканической и поствулканической активности. Так, в ходе работы была подтверждена теория, состоящая в том, что вулканы Карымский и Малый Семячик (Камчатка) действуют в противофазе – периоды активности вулкана Карымский совпадают с периодами спада активности вулкана Малый Семячик.

4. На основе карт, составленных по космическим снимкам, можно выявить пространственно-временную изменчивость тепловых полей исследуемых территорий. Карты лавовых потоков позволяют судить о динамике эффузивных процессов в ходе извержений вулканов, выявлять изменения площадей, покрытых лавой в различные периоды извержений. Карты расположения вулканических и поствулканических проявлений позволяют классифицировать проявления и наглядно визуализировать их характеристики.

#### **Список литературы**

1. Шилин Б. В. Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 247 с.

2. Михайлюкова П. Г., Тутубалина О. В. Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 153–163.

**А. В. Дергунов, В. Б. Кашкин, К. В. Краснощеков,  
Р. В. Одинцов, Т. В. Рублева**

Институт инженерной физики и радиоэлектронники  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
e-mail: kraspeed1994@gmail.com, rtcvbk@rambler.ru

## **ИЗУЧЕНИЕ ОЗОНОВЫХ АНОМАЛИЙ НАД ПИКОВЫМИ СЕЙСМОАКТИВНЫМИ ЗОНАМИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Исследовалось поле общего содержания озона (ОСО) над пиковыми сейсмическими зонами землетрясений в Турции, Китае, Таджикистане и Японии по спутниковым данным. Во время подготовки землетрясений обнаружены озоновые аномалии, время жизни которых составило 2–4 дня. Построены карты разности поля ОСО для невозмущенной и возмущенной атмосфер в период сейсмособытий, которые характеризуют атмосферные эффекты над сейсмоактивными районами.

*Ключевые слова:* космический мониторинг, спутниковые данные, озон, атмосферные возмущения, геодинамика, землетрясения, дегазация Земли.

Для решения задач геомониторинга сейсмически опасных территорий наиболее перспективным и эффективным направлением является комплексное использование данных наземных геофизических измерений и систем дистанционного зондирования. Спутниковая информация может использоваться для анализа глобальных и региональных изменений в системе «литосфера – атмосфера», наблюдаемых во время землетрясений. С помощью методов космического мониторинга в период сейсмособытий изучают: деформации земной поверхности; облачный покров и вариации вертикальных профилей температуры и влажности в тропосфере; вариации электронной концентрации в ионосфере; изменение концентрации озона, других газов и аэрозоля в атмосфере. Так, наблюдения газового состава осуществляют с помощью системы спутников EOS (Aqua и Terra) и ENVISAT, на которых измеряют концентрации CO и CH<sub>4</sub> в атмосфере [1]. С помощью спектрометров TOMS (КА «Nimbus-7», «Метеор-3», «Earth Probe») и OMI (КА «Aura»), по измерениям уходящего солнечного УФ излучения определяют общее содержание озона (ОСО) [2]. Для определения ОСО используются спектральные диапазоны 320–380 нм (TOMS) и 307–383 нм (OMI), пространственное разрешение для TOMS – 50×50 км, для OMI вариации – 13×24 км. Полученные значения общего содержания озона представлены на сайте NASA за каждый день для области от 89.5° с.ш. до 89.5° ю.ш. и от 179.5° з.д. до 179.5° в.д. [3].

В настоящее время активизировались исследования аномальных явлений в атмосфере над сейсмоактивными зонами, эти явления потенциально могут считаться признаками подготовки землетрясения. В данной работе изучались атмосферные аномалии, образовавшиеся во время сейсмических событий, произошедших в различные сезоны в отдельных районах: Турции (Измит, 17.08.1999), Китая (Сычуань, 12.05.2008), Таджикистана (Мургаб, 07.12.2015) и Японии (о. Кюсю, 15.04.2016). По данным каталога Национального центра информации Геологической службы США (USGS, United States Geological Survey), изучаемые землетрясения являются

нормальными с глубиной возникновения от 10 до 22 км и магнитудой  $M > 7$  [4]. Под глубиной возникновения (гипоцентром) понимается условно выделенная точка в центре очага землетрясения. Магнитуда – безразмерная величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясением.

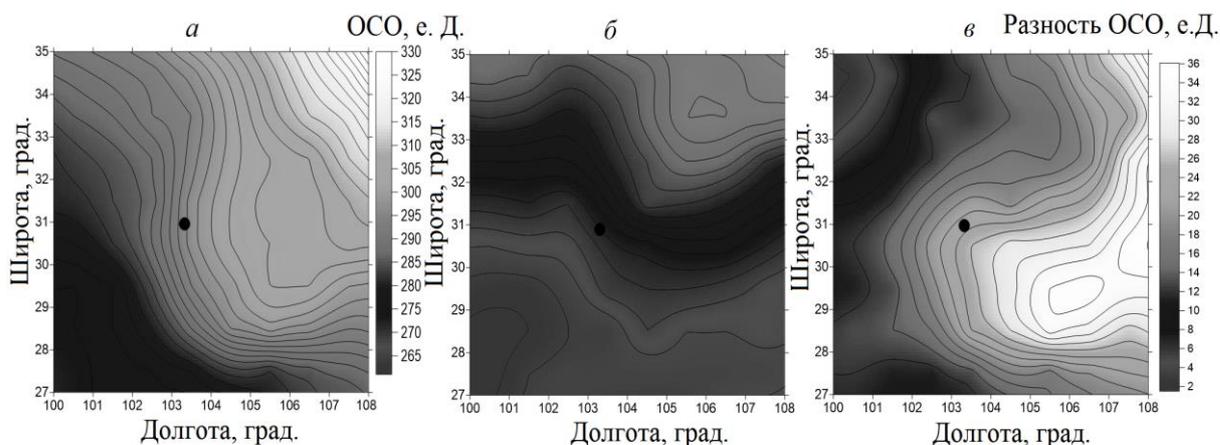
Землетрясение магнитудой  $M = 7.6$  вблизи турецкого г. Измит произошло 17.08.1999 (UTC 00:01), его эпицентр имел координаты  $40.760^\circ$  с.ш. и  $29.970^\circ$  в.д. Сейсмособытие в китайской провинции Сычуань зарегистрировано 12.05.2008 (UTC 06:28), координаты –  $31,002^\circ$  с.ш. и  $103,322^\circ$  в.д.,  $M = 7.9$ . Землетрясение 7.12.2015 (UTC 06:50)  $M = 7.2$  произошло в 104 км от г. Мургаб (Таджикистан), координаты эпицентра составили  $38.211^\circ$  с.ш.,  $72.780^\circ$  в.д. Землетрясение 15.04.2016 было зафиксировано к северу от г. Куамото (о. Кюсю, Япония) в UTC 16:25. Координаты эпицентра –  $32.79^\circ$  с.ш. и  $130.75^\circ$  в.д.,  $M = 7.0$ . Информация о геодинамических особенностях данных сейсмических территорий представлена на сайте USGS [4].

В качестве атмосферного объекта, состояние которого изменяется во время землетрясений над сейсмоактивными зонами в нижней стратосфере, был выбран озон. На основе спутниковой информации TOMS и OMI [3] сформирована база данных. Для изучения атмосферных возмущений, наблюдаемых во время подготовки землетрясения, во время основных подземных толчков и колебаний земной поверхности после сейсмических событий использовалась методика анализа озоновых спутниковых данных, которая достаточно подробно описана в [2].

Обнаружено, что над пиковой сейсмической зоной турецкого землетрясения «озоновое облако» с повышенными значениями ОСО появилось 13 августа и просуществовало 3 дня. За день до сейсмического события, 16 августа, количество озона уменьшилось до 295 е.Д. ( $1 \text{ е.Д.} = 10^{-5} \text{ м}$ ). Снижение ОСО в нижней стратосфере данного региона продолжалось до 18 августа (276 е.Д.). Во время подготовки Китайского землетрясения со 2 по 9 мая над пиковой сейсмической зоной наблюдалась озоновая аномалия с пониженными значениями ОСО, изменяясь от 263 до 271 е.Д. Увеличение озона в данном регионе началось 10 мая. В течение двух следующих дней существовала озоновая аномалия с повышенным ОСО (до 297 е.Д.). С 4 по 6 декабря, во время подготовки Таджикского землетрясения, над эпицентральной областью обнаружено «озоновое облако» с пониженным ОСО (253–263 е.Д.). 7 декабря 2015 года в эпицентре количество озона стало повышаться и достигло 274 е.Д.. За 2 дня до Японского землетрясения в эпицентральной области сформировалось «облако» с повышенным ОСО (298–314 е.Д.). Мы предполагаем, что во время подготовки сейсмических событий понижение и повышение количества озона в сейсмоактивных зонах обусловлено выходом литосферных газов через образовавшиеся разломы и трещины на земной поверхности и активизацией атмосферных фотохимических процессов, которые приводят как к деструкции озона, так и к дополнительному образованию молекул  $O_3$ .

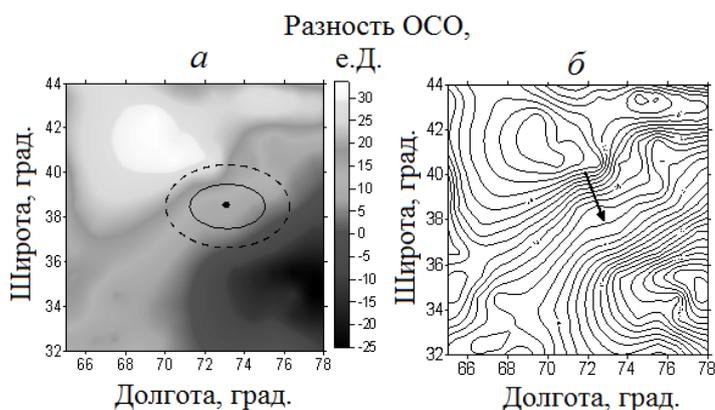
Для анализа структуры поля ОСО над пиковой сейсмоактивной зоной была разработана методика построения карты вариации ОСО в период сейсмособытий разностной карты, включающая выбор данных, вычисление разности поля ОСО между полем озона для возмущенной и невозмущенной атмосферы. Для «невозмущенной» («спокойной») атмосферы были выбраны озонные данные, когда сейсмическая активность в изучаемом регионе отсутствовала. Условия «возмущенной» атмосферы характеризуют состояние озонового слоя, когда в сейсмоопасных районах произошли землетрясения. Пример иллюстрирующий данную методику для района китайского землетрясения показан на рис. 1. Точкой здесь обозначен эпицентр. Рисунок 1, а показывает «возмущенное» поле ОСО над пиковой сейсмической зоной 12.05.2008. Рисунок 1, б характеризует «невозмущенное» поле ОСО 12.05.2007. На рис. 1, в представлена разностная карта.

Изолинии озона в «возмущённой» атмосфере (рис. 1, *а*) ориентированы на северо-запад. На рис. 1, *б* поле ОСО имеет широтную зональность в направлении запад – восток. Разностная карта ОСО (рис. 1, *в*) показывает, что перед эпицентральной областью (в левой части) сформировалась аномалия с пониженными значениями озона, а после эпицентральной области (в правой части) – аномалия с повышенными ОСО.



**Рис. 1. Поле ОСО над сейсмоактивной зоной за 12.05.2008 (*а*), 12.05.2007 (*б*), разностная карта (*в*)**

Примеры разностных карт, построенных для таджикского и японского землетрясений, представлены на рис. 2 и 3. Точками на рис. 2, *а* и 3, *а* обозначены эпицентры землетрясений. Внутренние эллипсы характеризуют границы пиковых сейсмических областей, внешние пунктирные эллипсы – зоны подготовки землетрясений. Справа на рис. 2, *б* и 3, *б* показаны карты изолиний поля ОСО над пиковыми сейсмоактивными зонами. Стрелками здесь обозначены изменения изолиний возмущенного поля ОСО в эпицентральной области.

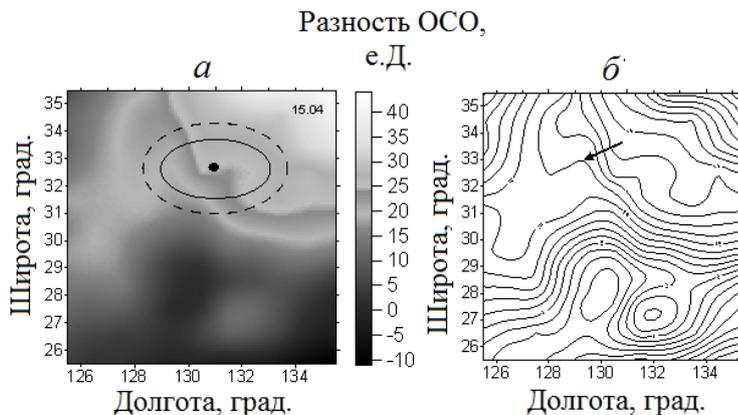


**Рис. 2. Разностные карты поля ОСО (*а*) и изолиний озона (*б*) над сейсмоактивной зоной в день Таджикского землетрясения 7 декабря 2015 года**

На рис. 2, *а* видно, что по разные стороны пиковой сейсмоактивной зоны сформировались две озоновые аномалии. Одна положительная аномалия с повышенными значениями ОСО находится в области широт 32–36° с.ш., а другая отрицательная аномалия с пониженными ОСО – в области широт 40–44° с.ш. Во время основного толчка в пиковой сейсмической зоне Таджикистана (рис. 2, *б*) видны сгущение и деформация изолиний поля ОСО в направлении северо-востока.

На рис. 3, *а* показано, что озоновая аномалия (с повышенными значениями ОСО) наблюдается над эпицентральной областью Японского землетрясения на широтах

31–36° с.ш. Вторая аномалия (с пониженными значениями ОСО) сформировалась в широтной области 27–30° с.ш. ниже пиковой сейсмозоны. Третья озоновая аномалия (с повышенными значениями ОСО) находится в области широт 26–28° с.ш. На карте изолиний поля ОСО (рис. 3, б) стрелкой показаны атмосферные возмущения в эпицентральной области. Отчетливо видны деформации изолиний озона в возмущенном поле ОСО над сейсмической зоной в направлении северо-востока.



**Рис. 3. Разностная карта поля ОСО (а) и карта изолиний озона (б) над сейсмоактивной зоной в день Японского землетрясения 15 апреля 2016 года**

В данной работе на основе анализа спутниковых данных TOMS и OMI были обнаружены озоновые аномалии как с пониженными, так и с повышенными значениями ОСО, образовавшиеся во время подготовки сильных землетрясений в сейсмоактивных зонах. Время существования озоновых аномалий варьируется от 2 до 4 дней. Вероятно, возникновение «озоновых облаков» обусловлено активизацией сейсмических процессов в литосфере и фотохимических реакций в тропосфере и нижней стратосфере. Изучение геофизической среды во время подготовки и после сейсмических событий требует дополнительных исследований.

#### Список литературы

1. Тронин А. А. Космические методы исследования землетрясений. Современное состояние и перспективы. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/0-03.pdf>.
2. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.
3. NASA. URL: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/>.
4. United States Geological Survey (USGS). URL: <http://www.usgs.gov/>.

**Е. А. Дунаева**

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь  
e-mail: water\_crimea@hotmail.com

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СНИМКОВ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА**

Рассмотрен ряд аспектов использования снимков среднего разрешения для решения задач сельскохозяйственного мониторинга, ориентированных на выявление вариации параметров вегетации, характеризующих тенденции изменения биопродуктивности, в том числе вызванные возможными деградационными почвенными процессами. В качестве пилот-участка рассматривалась территория бывших рисовых оросительных систем Крыма, построенных на ранее исходно засоленных почвах и в настоящее время используемых для выращивания полевых культур в богарных условиях. Проведен анализ эффективности и особенностей использования индекса NDVI, полученного по данным снимков среднего разрешения продуктов (MODIS, LANDSAT 8, SENTINEL-2) для решения задач данного класса с целью разработки дополнительного инструментария мониторинга динамики экосистемных процессов в зоне резкого изменения техногенной ситуации, в данном случае связанной с прекращением поступления дополнительных водных ресурсов на территорию по системе Северо-Крымского канала.

*Ключевые слова:* мониторинг, вегетационный индекс, MODIS, LANDSAT, BEGA-Science.

Для оценки состояния территории необходимо наличие информации, следовательно, сбор данных, их хранение и обработка, являются ключевыми элементами при проведении мониторинга систем с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ключевыми объектами в информационном поле сельскохозяйственного мониторинга являются Министерство сельского хозяйства, Министерство экологии и природных ресурсов, Министерство связи и массовых коммуникаций, Центры агрохимической службы, Гидрометцентр России и др.

Для оценки состояния агроценозов и определения количественных показателей динамики их развития необходим доступ к первичной информации. В настоящий момент существуют открытые публичные данные (данные LP DAAC, BEGA-Science, данные фактической погоды – NOAA, СНИИГМИ-МЦЦ, gr5.ru и др.), которые доступны для скачивания и обработки без оплаты.

Данные ДЗЗ являются объективным источником информации для решения задач мониторинга агроценозов. В работах С. А. Барталева, Е. А. Лупяна [1], В. И. Повха [2], С. Ф. Покровской [3] рассматриваются вопросы дистанционной оценки параметров сельскохозяйственных земель по данным спектрорадиометра MODIS (пространственное разрешение) и Landsat [4] (пространственное разрешение 250÷1000 м и 30 м соответственно). Достаточно много работ посвящено вопросам оценки состояния культур [5] и мелиоративных систем [6] с использованием снимков среднего разрешения.

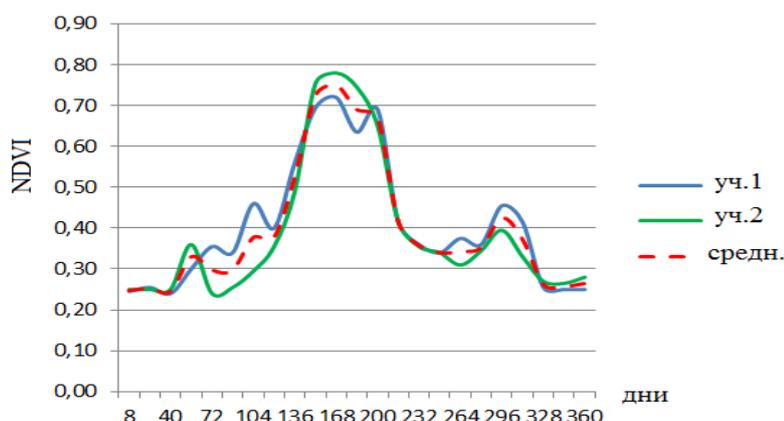
Одним из основных и наиболее часто используемых для анализа состояния развития растительности и, соответственно, косвенной оценки состояния почвенного плодородия как элемента экосистемы является нормализованный дифференцированный вегетационный индекс (NDVI), методология расчета которого основана на разной поглотительной/отражающей способности различных видов растительности и других

видов земной поверхности в различных диапазонах излучения, а отношение разности значений ближнего инфракрасного канала и красного к их сумме позволяет не только получать относительные/нормированные значения, но и максимально выделить значения показателя для интенсивной растительности, характеризуемой высоким поглощением энергии в красном диапазоне и отражением в ближнем инфракрасном.

**Материалы и методы.** Возвращение экосистемы в исходной состояние после прекращения промывного режима на бывших рисовых техногенных системах с проявлением процессов вторичного засоления является неизбежным. Основной задачей является оценка интенсивности этого процесса, насколько он будет продолжительным с учетом динамики погодных условий, используемых технологий возделывания и структуры посевов на этих землях, а также с учетом регулирующего влияния созданной инфраструктуры глубоких сбросных каналов, выполняющих и дренирующую функцию.

В исследованиях для учета территориального варьирования биопродуктивности по полям при анализе одиночных сцен снимков LANDSAT 8 использованы как методика расчета NDVI по данным числовых значений (DN), так и картированные значения NDVI, предоставляемые ИКИ РАН в сервисе BEGA-Science (MODIS, Landsat, Sentinel) [7] и данные USGS (MODIS, Landsat) для проведения сопоставимого во временном и пространственном плане анализа с использованием программного обеспечения QGIS 2.14 и ILWIS.

**Результаты и обсуждение.** На рисунке представлено графическое отображение динамики состояния растительности по индексу NDVI по данным сенсора среднего разрешения MODIS (250 м), выгруженные из базы данных сервиса USGS для соседних полей с посевами подсолнечника, расположенных на территории Ишуньского сельского поселения в Крыму (уч. 1 и уч. 2, координаты: 45.891° с.ш., 33.701° и 45.880° с.ш., 33.701° в.д. соответственно).



**Рисунок. Динамики NDVI за 2016 год по композитным 16-дневным данным сенсора MODIS (MOD44) для двух полей с вегетацией подсолнечника (уч. 1 и уч. 2)**

Несмотря на аномалию в значениях параметра по 1-му участку с 25 июня по 10 июля в целом период с середины мая до середины августа (основной период вегетации) достаточно хорошо описывается динамикой изменения вегетационного индекса для данной культуры.

В плане доступности временных рядов данных использование MODIS имеет преимущества перед LANDSAT и SENTINEL, так как данный сенсор имеет большую частоту съемки и более подходит для анализа динамики и трендов развития

сельскохозяйственной растительности. Вместе с тем его разрешающая способность 250, 500 и 1000 м существенно сужает возможности использования для мониторинга пространственных объектов, линейные параметры которых сопоставимы с минимальной разрешающей способностью сенсора (250 м). Например, более детальный анализ внутри полей бывших рисовых техногенных систем Крыма (технологически разбитых внутри полей на карты и чеки со средней длиной и шириной чека около 200 м) невозможен с использованием информации такого уровня точности, при том что максимальные значения параметра NDVI по данным сенсора MODIS (см. рисунок) близки по значению к параметрам, полученным по данным спутников Landsat и Sentinel (таблицу).

Таблица

Сравнение значений NDVI по данным разных спутников и сервисов

Спутник, сенсор	Источник данных	Параметр	Значения по видам землепользования						
			подсолнечник			стерня			
			уч. 1	уч. 2	средн.	уч. 3	уч. 4	средн.	
Landsat 8, OLI	USGS, Bands 4, 5 (DN)	NDVI <sub>ср.</sub>	0.531	0.527	0.529	0.144	0.159	0.152	
		$\sigma$ ndvi	0.022	0.036	0.029	0.030	0.035	0.032	
	USGS, NDVI <sub>SR</sub>	NDVI <sub>ср.</sub>	0.798	0.801	0.800	0.217	0.234	0.226	
		$\sigma$ ndvi	0.020	0.039	0.030	0.051	0.065	0.058	
	USGS, REFL <sub>ТОА</sub>	NDVI <sub>ср.</sub>	0.755	0.754	0.755	0.217	0.235	0.226	
		$\sigma$ ndvi	0.021	0.038	0.030	0.046	0.058	0.052	
	BEГА - Science	NDVI <sub>ср.</sub>	0.749	0.755	0.752	0.216	0.235	0.226	
		$\sigma$ ndvi	0.036	0.037	0.037	0.047	0.060	0.054	
	Sentinel-2	BEГА - Science	NDVI <sub>ср.</sub>	0.702	0.706	0.704	0.147	0.161	0.154
			$\sigma$ ndvi	0.033	0.037	0.035	0.052	0.063	0.058
Terra / Aqua, MODIS	USGS, Mod08	NDVI <sub>ср.</sub>	*	*	–	0.520	0.485	0.545	
		$\sigma$ ndvi	*	*	–	0.528	0.104	0.092	
	USGS, Mod16	NDVI <sub>ср.</sub>	0.635	0.745	0.690	0.350	0.375	0.363	
		$\sigma$ ndvi	0.162	0.070	0.116	0.100	0.062	0.081	

\* Файлы БД USGS для композитных 8-дневных снимков данного сенсора имеют для территории анализируемых участков за период с 25 июня по 18 июля 2016 года пиксели с маской некорректных данных (bad data).

Сенсоры спутников Landsat и Sentinel имеют более высокое разрешение (30 и 20 м соответственно) и могут быть более эффективно использованы для определения параметров вегетации и оценки уровня варьирования биопродуктивности на гораздо более мелких, чем с использованием MODIS участках, в том числе для полей бывших рисовых техногенных систем, на которых сохраняется ранее созданная структура чеков.

Дополнительный сервис, предлагаемый с 2017 года для продуктов Landsat 4, 5, 7 и 8, высокого уровня обработки и доступный по предварительной заявке [8], в том числе как для исходных данных сцен с соответствующими числовыми значениями (DN), так и уточненных, представленных с использованием единого методологического подхода материалами их обработки, такими как данными об уровне излучения на уровне поверхности и в верху атмосферы, а также значения вегетационных индексов, в том числе NDVI. В таблице представлено сравнение данных параметров NDVI (среднее и среднеквадратическое значение) для четырех участков с двумя соседними полями (уч. 1 и 2) одной и той же активно вегетирующей сельскохозяйственной культуры и двумя (3-й и 4-й) участками стерни за 08.07.2016, полученным из разных источников (средние значения и параметры варьирования получены с использованием открытой ГИС QGIS 2.14.

При сравнении данных за разные даты, различных сцен или данных различных сенсоров необходимо приведение их к сопоставимому виду с учетом физических

характеристик сенсоров, времени и условий съемки, в том числе это необходимо учитывать при использовании в регрессионных параметрах связи урожайности сельскохозяйственных культур с вегетационными индексами, так как ошибка прогноза в этом случае может дополнительно включать систематическую ошибку (до 15–20 %, при задействовании параметра NDVI, полученного при использовании различных алгоритмов расчета или разных сенсоров).

### **Заключение**

Временные ряды индекса NDVI, по данным MODIS, позволяют определять пиковый период развития биомассы посевов, однако имеет существенно более низкую чувствительность в картировании и оценке ее вариации за счет сравнительно низкого пространственного разрешения (сопоставимого с линейными размерами чеков внутри полей бывших рисовых техногенных систем Крыма).

Применение алгоритма расчета NDVI по данным числовых значений (DN) каналов спутника Landsat не оказывает влияния на анализ вариации внутри отдельных сцен в период активной вегетации посевов. Для повышения точности расчета параметров варьирования показателей биопродуктивности бывших рисовых техногенных систем на уровне поля необходимо создание векторного слоя полей с учетом их чековой структуры (при условии ее сохранения) и использования данных спутников с разрешающей способностью 20–30 м.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым в рамках научного проекта № 16-44-910779 p\_a.*

### **Список литературы**

1. Дистанционная оценка параметров с.-х. земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт, И. Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды: сб. науч. ст. Т. 2. М.: GRAND polygraph, 2005. С. 228–236.
2. Detailed monitoring of agricultural production based on the MODIS radiometer data/ V. I. Povkh, E. A. Vorobeychik, L. A. Shljakhova et al. // Proc. of SPIE. V. 5232. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology V. 2004. P. 548–552.
3. Покровская С. Ф. Выявление изменений в структуре с.-х производства и его размещении в дельте р. Меконг, Вьетнам, на основе оценки изображений, полученных со спутников, в системе MODIS за 2000–2007 гг. // Экономика сельского хозяйства. Реферативный журнал. 2011. № 1. С. 60.
4. Analysis of the Seasonal Dynamics of Vegetation on Remote Sensing Data / Elena V. Fedotova, Artem A. Zholudeva, Viktor G. Izosimova, Yuri D. Shpirukc, Yuri A. Maglinetsa and Gennadi M. Tsibul'skiia // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. V. 7, № 8. P. 976–983.
5. Терехин Э. А. Применение данных дистанционного зондирования для мониторинга посевов озимых культур Белгородской области // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 175–181.
6. Товкач В. А., Шкутов Э. Н. Перспективы и возможности дистанционного зондирования земли при организации мониторинга состояния мелиоративных систем полесья // Перспективы и возможности дистанционного зондирования земли при организации мониторинга состояния мелиоративных систем Полесья. Мелиорация. 2008. № 1. С. 14–25.
7. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, С. А. Барталев, В. А., Толпин В. О. Жарко, Ю. С. Крашенинникова, А. Ю. Оксюкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, №. 3. С. 215–232.
8. Портал архива USGS. URL: <https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>.

**В. В. Ермаков, О. Р. Баркова, А. А. Бран**

Самарский государственный технический университет, Самара  
e-mail: olga.barkova.91@mail.ru

## **ДВУХУРОВНЕВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБЪКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Рассмотрено применение двухуровневой системы дистанционного мониторинга состояния объектов размещения нефтесодержащих отходов. Для первичной локализации области интереса используется данные спутникового мониторинга. Мониторинг на местности проводится с применением БПЛА вертолетного типа. Предложен бюджетный вариант оборудования для спектральной съемки.

*Ключевые слова:* спутниковый мониторинг, БПЛА, двухуровневый мониторинг, гиперспектральные камеры, гиперспектральные изображения, нефтесодержащие отходы.

### **Введение**

Существуют отработанные технологии по выявлению участков загрязнения на поверхности водных объектов. Но до сих пор не внедрена в эксплуатацию полноценная методика определения наличия нефтепродуктов на поверхности земли. Идентификация таких участков имеет ряд затруднений.

В первую очередь это связано с тем, что нефтепродукты слабо отражают в видимом диапазоне. Для некоторых видов почв, например, богатых черноземом, присутствие нефти практически не изменяет интегральный коэффициент отражения, что делает спектр нефти трудно отличимым от темной почвы. В видимом диапазоне спектра отражения (400–750 нм) темный тон почвы может быть обусловлен высоким содержанием влаги, органического вещества или нефтепродуктов. Таким образом, различить эти объекты на снимках становится затруднительно.

Второй проблемой применения спутникового мониторинга является недостаток освещения, особенно в зимний период, в высоких географических широтах. Работа пассивных систем дистанционного мониторинга в таких условиях практически невозможна.

Третья проблема связана с низким пространственным разрешением гиперспектральных снимков. При том, что в настоящее время панхроматические снимки позволяют различить на снимках объекты с размером порядка 0,2 метра, гиперспектральные снимки имеют пространственное разрешение порядка 60 метров. Объекты меньшего размера практически не различимы даже при хорошем спектральном разрешении и большом числе спектральных каналов. Возможно только ориентировочное позиционирование объекта.

В этой связи одним из вариантов решения этих проблем может являться одновременное применение многоуровневой системы мониторинга состояния окружающей среды. Данная система включает в себя верхний уровень, обобщая позиционирование объекта размещения отходов с использованием спутникового мониторинга. В случае появления объекта интереса с присутствием спектральной сигнатуры близкой к нефтепродуктам на снимке появляется необходимость проверки правильности идентификации, уточнения позиции и размеров объекта. Для этих целей в зависимости от дальности расположения объекта выбирается авиационная или беспилотная методика получения снимков.

Второй уровень мониторинга с применением авиационной техники позволяет проводить съёмку с большим пространственным разрешением, чем со спутника. Разрешение гиперспектрального снимка может составлять порядка 1 метра. Небольшая высота проведения съёмки с установленной системой широкополосной подсветки позволяет решить множество проблем дистанционного зондирования. Съёмка возможна при отсутствии освещения, в том числе в зимнее и ночное время. Разрешение снимка может составлять до 1 см на пиксель.

Наземный уровень получения данных о состоянии накопителей в первую очередь завязан на возможности уточнения глубины накопителя и толщины слоев, присутствующих в нем, непосредственно при работе на накопителе. Основной же частью наземного уровня является лабораторный анализ состава и физических свойств отходов.

### **Постановка задачи и пути ее решения**

По причине того, что средняя плотность накопленных отходов, которые имеют практическую ценность, близка к единице, а глубина объектов в среднем составляет около двух метров, то основным определяющим параметром для ориентировочного определения ресурсного потенциала может являться площадь накопителя [1]. Достаточно перспективным является в случае оценки таких объектов применение двухуровневой съёмки. Например, космического зондирования и локального зондирования с использованием БПЛА и наземной съёмки. Применение трехуровневых систем, пример описания структуры приведён в работе Г. П. Аншакова «Многоуровневая система оперативного гиперспектрального мониторинга Земли» [2], не является в данном случае применения оптимальным вариантом. Объём информации, которую потребуется хранить и обрабатывать, может быть избыточен. Это вызывает дополнительную нагрузку на аппаратную часть оборудования для обработки информации и большие временные затраты. Так, один композитный снимок гиперспектральной аппаратурой может иметь размер файла порядка 1 гигабайта. Таким образом, убирая один из уровней мониторинга, мы на треть ускоряем получение результата.

Космическая аппаратура КА серии Landsat или Ресурс П в мульти- и гиперспектральном режиме, соответственно, позволяет получать снимки с пространственным разрешением порядка 60 метров на 1 пиксель изображения. Этого явно недостаточно для оценки потенциала конкретного объекта. Такие изображения могут использоваться только для ориентировочного позиционирования объекта размещения отходов.

Одним из способов решения данной проблемы для космических снимков может являться последовательный поиск объектов интереса с низкой отражательной способностью на панхроматическом изображении. Дальше данные участки обозначаются для проверки спектральных характеристик. В случае появления характеристик сходных с нефтяными отходами территория помечается как объект интереса для более низкого уровня мониторинга.

В свою очередь, когда доподлинно известно, что исследуемый накопитель содержит нефтесодержащие отходы пригодные к использованию, то локализация и оценка площади может осуществляться простым визуальным сканированием при съёмке в панхроматическом или традиционном цветном варианте. В случае отсутствия информации о составах и свойствах отходов наиболее информативной становится съёмка гиперспектральными камерами. В настоящее время на рынке появились сканирующие устройства, которые возможно установить даже на лёгкие БПЛА. К сожалению, цена данной аппаратуры достаточно высока. Как альтернатива данному варианту могут быть использованы спектрорадиометры, которые получают точечные спектры с поверхности под аппаратом. При этом гиперкуб данных формируется путём геопривязки спектров к конкретным точкам поверхности. Стоит отметить, что в

настоящее время не существует компактных устройств работающих в среднем инфракрасном диапазоне, который является наиболее информативным.

В то же время, гиперспектральные камеры, которые применяются для съёмки с БПЛА являются достаточно дорогостоящим оборудованием. В целях снижения стоимости оборудования для проведения спектрального мониторинга на местности были предложено решение. На имеющуюся стандартную камеру была изготовлена насадка, включающая дифракционную решётку и щель [3]. Конструкция предусматривает получение камерой изображения с присутствием видимого изображения в формате узкой полосы и участка расположения спектра. В зависимости от характеристик матрицы стандартной камеры возможно получить от 15 до 100 спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (рис. 1). Камера фактически используется в таком случае как сканирующее устройство с изображающим спектрометром.

Одним из этапов обработки полученного изображения является фиксирование яркости пикселей на соответствующих спектральным каналу участке с привязкой этих данных к координатам местности, которая отображается в настоящее время в видимой полосе. Особенностью изображения является присутствие двух полос отображения спектра на каждом снимке. Это позволяет усреднять значения по каждому из спектральных каналов для каждой точки. Так корректируются отклонения связанные с углом падения солнечного света на поверхность и отражения. За счёт этого повышается точность измерения.

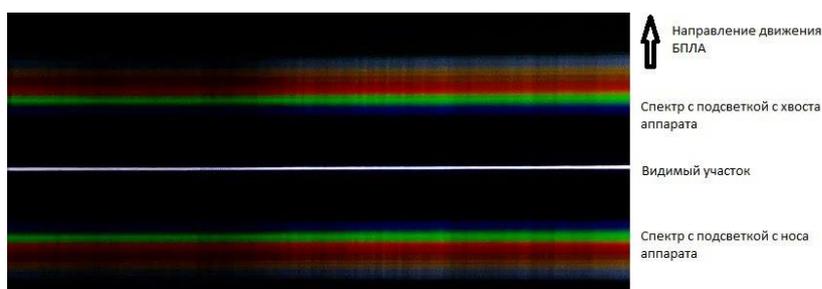


Рис. 1

Предположение о кластерной структуре данных и разработанный в работе Е. В. Раменской и др. «Классификация гиперспектральных изображений с использованием кластерной структуры данных» алгоритм позволяет добиться высокой точности классификации нефтезагрязнений по химическому составу. Алгоритм обладает низкой вычислительной сложностью: обучающая стадия линейно зависит от количества размеченных пикселей. Кроме того, предложенный метод является интерпретируемым в рамках экспертной области. Результатом работы алгоритма является изображение, на котором цветом обозначены только участки с присутствием нефтепродукта, а все остальные участки затенены. Данное изображение имеет то же разрешение, что и исходный снимок. Геопривязка сохраняется и появляется возможность подсчёта окрашенных пикселей изображения на полученном снимке. Имея сведения о характеристиках камеры и высоте съёмки подсчитывается реальные размеры каждого из пикселей. На основе этой информации высчитывается площадь поверхности накопителя. Рис. 2 демонстрирует классификацию в результате применения разработанного алгоритма.

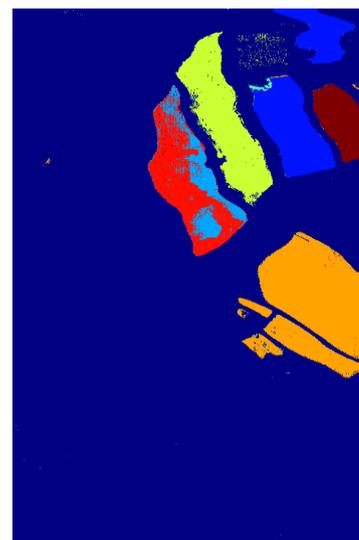


Рис. 2

### **Заключение**

В результате данного исследования была представлена конструкция камеры для БПЛА с использованием насадки. Насадка включает в себя дифракционную решётку и щель. В эксплуатации такой вариант БПЛА, позволяет удешевить процесс мониторинга на приземном уровне. Многоуровневость исследований позволяет повысить точность измерений. Благодаря приведенному методу классификации гиперспектрального изображения с использованием экспертной разметки части снимка удается с высокой точностью локализовать участки нефтезагрязнений.

### **Список литературы**

1. Ermakov V. V., Bogomolov A. A., Bykov D. E. Oil sludge depository assessment using multivariate data analysis // *Journal of Environmental Management*. 2012. V. 105. P. 144–151.
2. Многоуровневая система оперативного гиперспектрального мониторинга Земли / Г. П. Аншаков и др. // *Вестн. Самар. гос. аэрокос. ун-та им. акад. С. П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2013. № 4 (42).
3. Скиданов Р. В., Бланка В. А. Изображающий гиперспектрометр – насадка // *Информационные технологии и нанотехнологии: материалы III междунар. конф. и молодёжной школы к 75-летию Самарского университета. 25–27 апреля 2017 г., Самара. Вестник в печати*.

**И. В. Зеньков, К. В. Раевич**

СКТБ «Наука», ИВТ СО РАН, Красноярск  
Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
e-mail: zenkoviv@mail.ru, ksenia\_248@mail.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ УГОЛЬНЫМИ РАЗРЕЗАМИ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

На территории РФ в Магаданской области производится разработка открытым способом угольных месторождений. Добычу угля совершают два угольных разреза. В местах разработки месторождений происходит существенное изменение природного ландшафта. На угольных разрезах зафиксированы минимальные коэффициенты самовосстановления растительного покрова. Сделан вывод о необходимости горнотехнической и биологической рекультивации нарушенных земель.

*Ключевые слова:* Магаданская область, угольные разрезы, горнопромышленные ландшафты, вечномерзлые горные породы, нарушенные земли, дистанционное зондирование, растительная экосистема, рекультивация земель.

### **Введение**

Магаданская область с ее уникальными минеральными ресурсами входит в число регионов опережающего экономического развития РФ. Суровые и продолжительные зимы требуют стабильной работы объектов теплоэнергетики с минимальными рисками возникновения аварийных ситуаций. В область морским путем завозится 1,0 млн т. энергетического угля в год, что существенно удорожает топливо, и попадает под логистическую зависимость. Транспортировка угля от Магадана по вечномерзлой территории области, является существенным тормозом в освоении региона. Поэтому, в области территории производят добычу угля открытым способом с целью бесперебойного снабжения углем отдаленных от побережья районов. Вместе с тем, в последние годы к разработке высококачественных антрацитов в восточной части области проявляют интерес японские инвесторы [6]. Намечающийся рост объемов добычи угля требует провести исследования состояния горнопромышленных ландшафтов, и в случае необходимости подготовить предложения по улучшению экологического состояния.

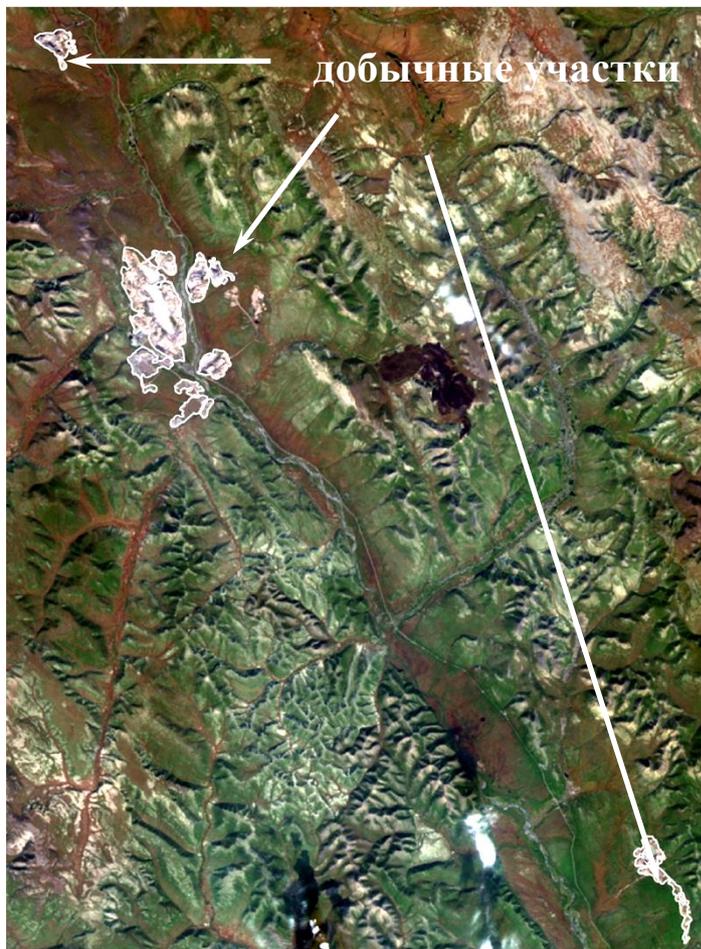
### **Угольные разрезы Магаданской области**

В Магаданской области добычу угля открытым способом производят два угольных разреза: «Кадыкчанский» и «Омсукчанский».

Рельеф территории разлома «Кадыкчанский» холмисто-равнинный. Абсолютные отметки дневной поверхности варьируют от + 930 до + 1000 м. В этих границах угольные пласты постепенно погружаются на глубину более 300 м. Углы залегания составляют от 5–20 до 30–45°. На участке выявлены разрывные нарушения угольного пласта. Промышленное значение имеют два угольных пласта: «Сложный» и «Спутник». Пласт «Сложный» выше пласта «Спутник». Мощность сложного пласта в

диапазоне от 9 до 20 м. Пласт с простым строением «Спутник» имеет среднюю мощность – 3,4 м.

Добычные участки угольного разреза «Кадыкчанский» показаны на рис. 1. Комплектация горнотранспортного оборудования на разрезе «Кадыкчанский» выглядит следующим образом. На бурении взрывных скважин работают один буровой станок СБШ-250. На экскавации вскрышных пород задействовано два экскаватора ЭКГ-5А. На транспортировке горной массы – 18 автосамосвалов. Годовой объем добычи угля 0,5–0,6 млн т.



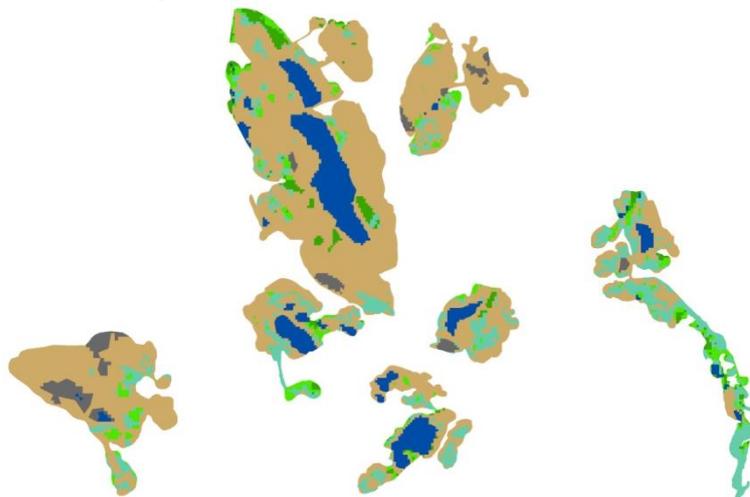
**Рис. 1. Фрагмент космоснимка с размещением добычных участков разреза «Кадыкчанский»**

Климат территории разреза «Кадыкчанский», резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха равна  $-13,7$  °С. В декабре – январе среднемесячные температуры от  $-35$  до  $-55$  °С. Для июля среднемесячная температура  $+12-16$  °С. Осадков в районе выпадает мало (280–300 мм). Участки добычи расположены в области многолетней мерзлоты. Почвенная оболочка на исследуемых территориях представлена таежными гумусово-перегнойными почвами.

Все вышеперечисленное позволяет сформулировать промежуточный вывод об условиях формирования горнопромышленного ландшафта и факторах обеспечения экологического баланса на нарушенных землях в ходе добычи угля открытым способом. При разработке угольных пластов большие объемы пустых пород вместе с некондиционным углем выносятся на поверхность породных отвалов. Такая смесь по нашей оценке является малопригодной для поселения на ней любых видов

растительного покрова. Отметим также, что угольные разрезы Магаданской области находятся в крайне неблагоприятных природно-климатических условиях [1–5].

На космоснимках угольного разреза «Кадыкчанский» выделено шесть классов горнопромышленного ландшафта: вскрытые или отработанные угольные пласты, горные выработки и породные отвалы без растительного покрова, техногенные водоемы, участки с признаками восстановления растительного покрова, травянистая и древесная растительность. На рис. 2 представлены фрагменты космоснимка с выделением границ нарушенных земель и классами сформированного техногенного ландшафта, показанного на рис. 1.



**Рис. 2. Фрагмент космоснимка добычных участков угольного разреза «Кадыкчанский» в июле 2016 года с результатами дешифрирования**

Проанализировав структуру земель разреза «Кадыкчанский» (рис. 3), сформулируем выводы.

Коэффициент самовосстановления растительного покрова – 0,092. Это означает, что угольный разрез специальные работы по рекультивации нарушенных земель не проводит. Растительный покров сформирован на площади размером 94,1. Суммарная площадь техногенных водоемов 145,3 га.



**Рис. 3. Структура земель под горными работами и экосистемой с учетом детализации классов горнопромышленного ландшафта на добычных участках угольного разреза «Кадыкчанский» в июле 2016 года**

На востоке области другой угольный разрез «Омсукчанский» разрабатывает участок «Галимовский» площадью 191,5 км<sup>2</sup>, расположенный в 25 км на юг от пос. Омсукчан. Галимовские угли относятся к антрацитам марки – 1АВ и 2АВ, в меньшей степени – 2ТВ. Всего на лицензируемой площади прогнозные ресурсы углей составляют 38,6 млн т. В разрезе галимовской свиты на месторождении выявлено 18 угольных пластов. В целом по месторождению средняя суммарная мощность угольной массы достигает 23,4 м. Месторождение перекрыто чехлом из горных пород четвертичного возраста мощностью до 3 м. Углы залегания угольных пластов находятся в диапазоне от 4 до 8°. Состояние горных работ на угольном разрезе «Омсукчанский» показано на рис. 4.



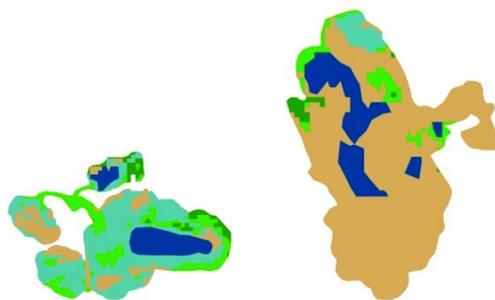
**Рис. 4. Компоновочная схема горных работ на разрезе «Омсукчанский»**

Комплектация горнотранспортного оборудования на разрезе «Омсукчанский» выглядит следующим образом. На бурении скважин работает станок СБШ-250. На экскавации вскрышных пород задействован экскаватор ЭКГ-5А. На добычных работах установлен гидравлический экскаватор с емкостью ковша 2,5 м<sup>3</sup>. На транспортировке горной массы задействовано 10 автосамосвалов грузоподъемностью 30–40 т. Экскаватор ЭКГ-5А установлен на угольном расходном складе. Годовой объем добычи угля 0,3–0,4 млн т.

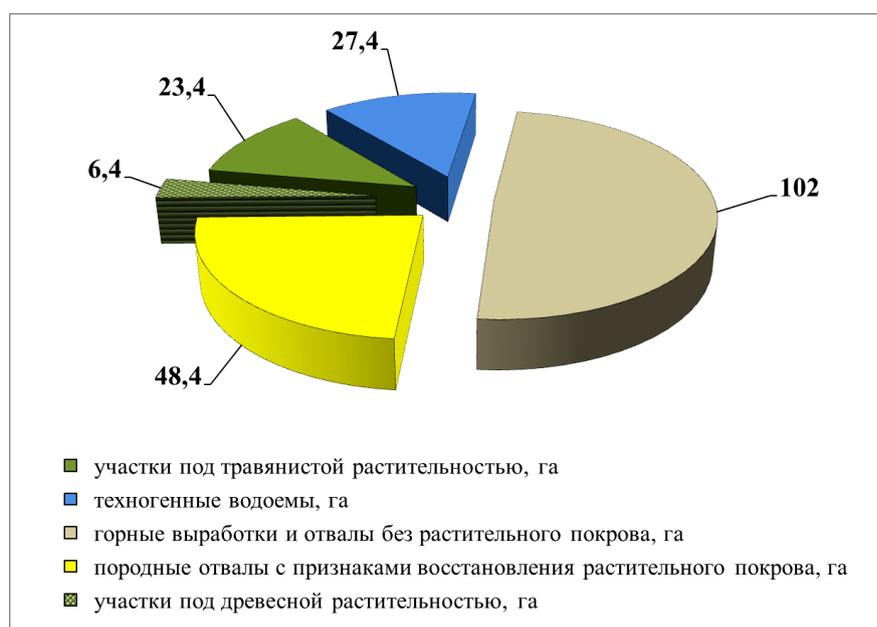
На космоснимках угольного разреза «Омсукчанский» мы выделили пять классов: горные выработки и породные отвалы без растительного покрова, техногенные водоемы, участки с признаками восстановления растительного покрова, травянистая и древесная растительность. На рис. 5 представлен фрагмент космоснимка разреза «Омсукчанский» с выделенными границами нарушенных земель и классами техногенного ландшафта.

Структура земель угольного разреза «Омсукчанский» представлена на рис. 6. Растительный покров сформирован на площади 29,8 га. Техногенные водоемы занимают суммарную площадь 27,4 га.

Коэффициент самовосстановления растительного покрова – 0,165 в сравнении с угольным разрезом «Кадыкчанский», расположенном в западной части. Это различие можно объяснить удаленностью исследуемых объектов от Тихого океана.



**Рис. 5. Фрагмент космоснимка угольного разреза «Омукчанский» в июле 2016 года с результатами дешифрирования**



**Рис. 6. Структура земель под горными работами и экосистемой с учетом детализации классов горнопромышленного ландшафта на угольном разрезе «Омукчанский» в июле 2016 года**

### **Заключение**

Подводя заключительный итог исследований, отметим полное отсутствие специальных работ по рекультивации нарушенных земель. Специальные работы по рекультивации нарушенных земель с учетом природно-климатических особенностей исследуемой территории должны выполняться в следующем порядке:

- снятие почвенного слоя на полную глубину бульдозером с одновременным формированием временного склада (вторая декада июля);
- погрузка экскаватором заскладированного почвенного слоя в автосамосвалы с последующей транспортировкой на породные отвалы (вторая декада июля с отставанием от работ по снятию на 2–3 дня);
- разравнивание почвенного слоя на отвале бульдозером (третья декада июля с отставанием от работ по перемещению почвенного слоя на 3–4 дня);
- вспашка нанесенного почвенного слоя на глубину 18–20 см с последующим посевом многолетних трав и одновременным внесением больших доз комплексных удобрений, содержащих азот, калий, фосфор (первая декада августа);

- на следующий год после этих работ высадка саженцев кустарников и деревьев местных видов (по нашей рекомендации лучшая порода древесных для условий области – лиственница) по сетке 3×4 м;
- ежегодный уход за молодыми саженцами на протяжении пяти лет.

#### **Список литературы**

1. Исследование формирования растительной экосистемы на горнопромышленных ландшафтах угольных разрезов в условиях Азиатского низкогорья с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли / И. В. Зеньков, В. И. Баркова, Ю. П. Юронен, Б. Н. Нефедов, Н. Б. Нефедов // Уголь. 2016. № 7. С. 85–88.
2. Мониторинг формирования экосистемы в карьерах и на породных отвалах при разработке Баженовского месторождения асбеста с использованием дистанционного зондирования / И. В. Зеньков, Ю. П. Юронен, Б. Н. Нефедов, В. Н. Вокин // Горный журн. 2017. № 3. С. 81–85.
3. Remote sensing in estimation of forest ecosystem generation at crushed stone quarries in Siberia / I.V. Zenkov, Y . U. P. Yuronen, B. N. Nefedov, I. M. Baradulin // Eurasian mining. 2016. V. 1. P. 50–54.
4. Результаты полевых исследований и дистанционного мониторинга формирования экосистем на территории горнопромышленного ландшафта угольного разреза «Изыхский» / И. В. Зеньков, В. И. Баркова, Б. Н. Нефедов, Е. В. Логинова, И. Е. Ямских // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 1. С. 36–41.
5. Зеньков И. В., Юронен Ю. П. Нефедов Б. Н. Результаты мониторинга формирования растительной экосистемы на отработанных участках Райчихинского бурогоугольного месторождения с использованием ресурсов дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 2. С. 28–33.
6. URL: <https://www.google.com/earth/>.

**С. Т. Им**

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), Красноярск  
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВСПЫШКИ  
МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА  
В ЕНИСЕЙСКОМ РАЙОНЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ**

**S. T. Im**

Sukachev Institute of Forest SB RAS (Federal Research Center Krasnoyarsk  
Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS)  
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

**SPATIO-TEMPORAL SILKMOTH OUTBREAK DYNAMICS WITHIN  
ENISEYSKIY REGION IN KRASNOYRASKIY KRAY**

По данным дистанционного зондирования со спутников Landsat и Sentinel-2A проведен ГИС-анализ динамики вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, произошедшей в Енисейском районе Красноярского края в 2015 году. Съемка Sentinel-2A позволила дополнить временной ряд данных Landsat и исследовать распространение вспышки с большей детальностью. Установлено, что начало вспышки относится к 2014 году, что, вероятно, связано с благоприятными климатическими условиями предыдущих лет (засушливый период 2012–2013 годов). К концу 2016 года повреждено 1 801 км<sup>2</sup> (14 % темнохвойных древостоев). Пространственное распределение по элементам рельефа является неоднородным. Наибольшие повреждения наблюдались на юго-восточных склонах с высотами 120–180 м над у. м. Северная граница анализируемой вспышки расположилась севернее на ~70–90 км, чем ранее идентифицированные очаги (Кеть-Чулымская вспышка 1954–1957 годов). Дальнейший рост засушливости климата может привести к росту частоты вспышек и дальнейшему продвижению этого вредителя на север в темнохвойные леса Центральной Сибири.

*Ключевые слова: сибирский шелкопряд, центральная Сибирь, Landsat, Sentinel-2.*

**Введение**

В России хвойные леса покрывают более 500 млн га. Площади ежегодно действующих в России очагов насекомых вредителей и болезней составляют в среднем 2,5–3,0 млн га [1]. В 2001 году такая площадь превысила катастрофической величины в 10 млн га, из которой ~70 % приходится на сибирский шелкопряд [2]. Ранее было показано, что данные дистанционного зондирования позволяют локализовать и оценить площади поврежденных сибирским шелкопрядом древостоев [3]. В 2015 году сотрудниками Центра защиты леса выявлено очаговое распространение сибирского шелкопряда в Енисейском районе Красноярского края. Объект является уникальным, поскольку расположен в северной зоне ареала сибирского шелкопряда. Цель данной работы заключалась в анализе указанной вспышки массового размножения сибирского шелкопряда по данным дистанционного зондирования. Задачами являлись: (1) определение начала вспышки, (2) анализ пространственно-временной динамики вспышки, (3) установление связей динамики вспышки с климатическими переменными и особенностями рельефа местности, (4) оценка применимости съемки Sentinel-2A для

анализа пространственно-временной динамики вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

### **Объект исследования**

Анализируемый участок расположен в Енисейском районе Красноярского края. Анализируемая территория покрывает 93068 км<sup>2</sup>. Темнохвойные древостои состоят из пихты, кедра и ели; покрывают 12908 км<sup>2</sup> (2013 г, Landsat). В этом регионе сибирский шелкопряд уничтожает пихту и кедр. Высота рельефа варьируется от 30 до 279 м над у.м. Средние летние температуры с 1980 г составляют +16,2 °С, среднегодовые –0,6 °С, зимние –18,2 °С. Количество осадков за год выпадает 516 мм, летом – 172 мм, зимой – 91 мм. Предыдущее массовое размножение сибирского шелкопряда затронуло Енисейский район во время вспышки 1954–1957 годов.

### **Материалы и методы**

В исследовании использованы материалы дистанционного зондирования Landsat (<https://landsat.usgs.gov/>) и Sentinel-2A (<https://sentinel.esa.int>) за период 2013–2016 годов (таблица). Данные Landsat и Sentinel-2A получены с помощью сервиса <http://glovis.usgs.gov/next>.

23 июня 2015 г европейским космическим агентством запущен спутник Sentinel-2A (пространственное разрешение 10–20 м, 12 спектральных каналов, периодичность съемки – 10 дней, радиометрическое разрешение – 12 бит, данные являются бесплатными). В данном исследовании применялись спектральные каналы Sentinel-2A 490 нм (синий), 560 нм (зеленый), 665 нм (красный), 842 нм (БИК) с пространственным разрешением 10 м (<https://sentinel.esa.int>).

Для анализа динамики температур и осадков использованы данные CRU TS 3.21 (<https://crudata.uea.ac.uk>), GHCN\_CAMS (<https://data.noaa.gov>) и GPCC (<http://www.dwd.de>). Засушливость климата оценивалась по индексу засушливости SPEI (<http://spei.csic.es>). Помесячные данные имеют пространственное разрешение 0,5 градуса. По данным MERRA2 (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>) производился расчет сумм положительных дневных температур и количество дней с положительными температурами. Анализировались данные за 1980–2016 годы.

Пространственные данные анализировались с помощью программ Erdas Imagine (<http://www.hexagongeospatial.com>) и ESRI ArcGIS (<https://www.arcgis.com>) по методике, описанной в [4]. На основе снимка Landsat 2013 г составлена маска темнохвойных древостоев. На снимках последующих годов выделены поврежденные сибирским шелкопрядом древостои. Для статистического анализа временных рядов данных использованы программы Microsoft Excel и StatSoft Statistica (<https://www.statsoft.ru>).

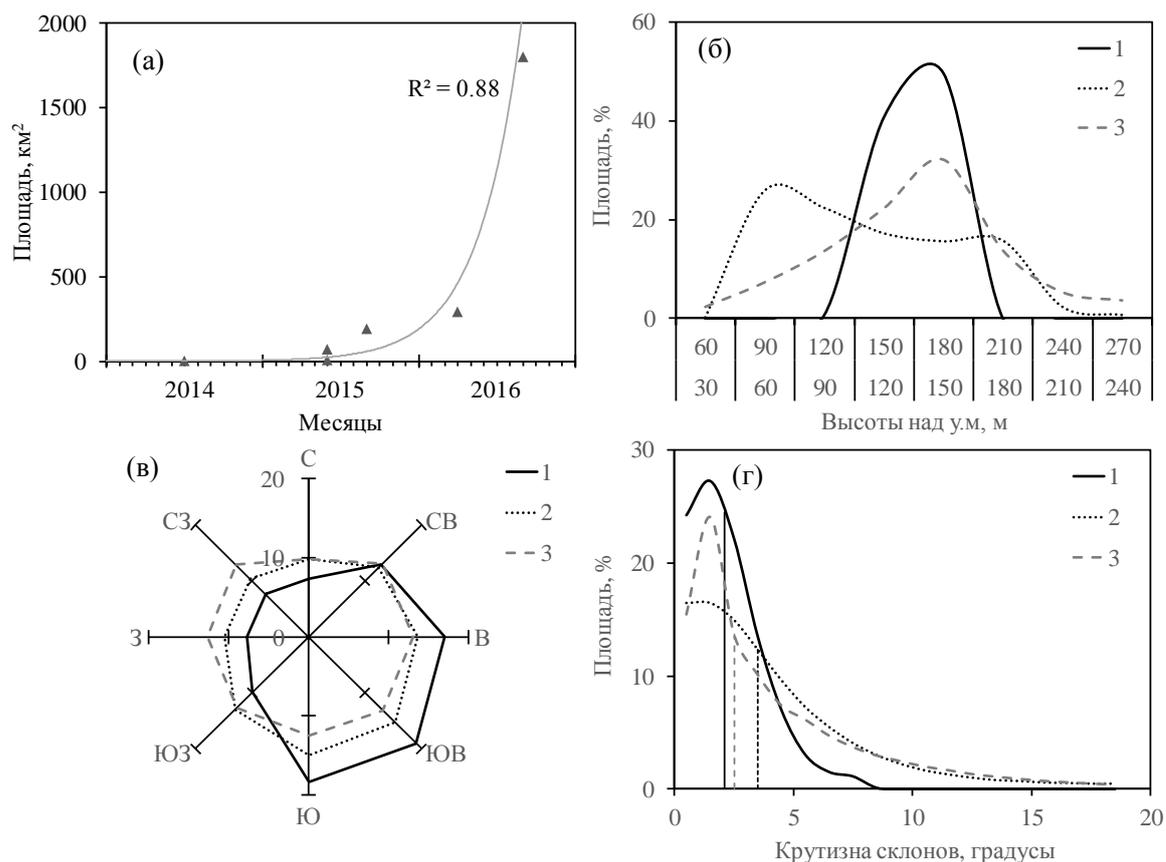
### **Результаты и обсуждение**

Сопоставление снимков Landsat за 2013–2014 годы позволило датировать начало вспышки 2014 года. В сентябре 2015 года сильно поврежденные древостои покрыли 193 км<sup>2</sup>, в сентябре 2016 – 1801 км<sup>2</sup> (14 % темнохвойных древостоев; рис. 1, а). В данном случае динамика площади поврежденных древостоев соответствует экспоненциальной кривой ( $R^2 = 0,88$ ,  $p < 0,05$ ; рис. 1, а). Распределение по элементам рельефа является неоднородным. В 2015 году наибольшие повреждения представлены на юго-восточных склонах на высотах 120–180 м над у.м. (рис. 1, б–г). К осени 2016 шелкопряд стал перемещаться в менее благоприятные участки, расположенные на севере на более крутых склонах и, преимущественно, спустился на 60–90 м ниже (рис. 1, б–г).

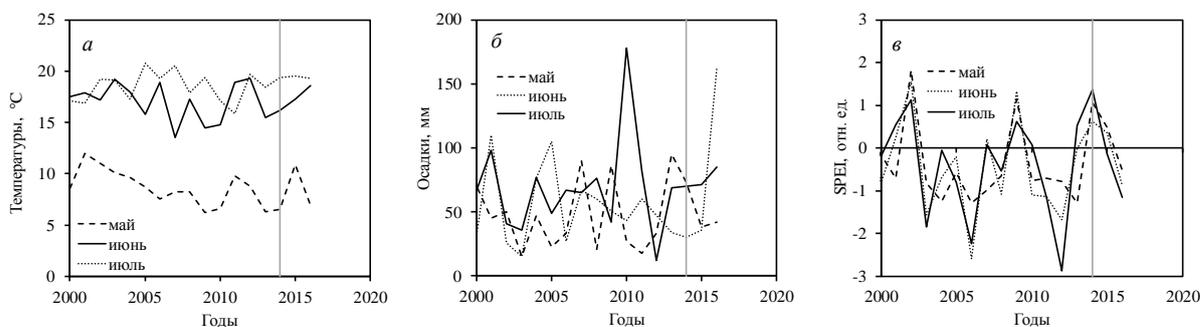
Исследователями [5; 6] предполагается, что вспышки сибирского шелкопряда возникают при особых климатических условиях, например, когда термические ресурсы

за период с  $t > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  превышают  $1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Верхний предел распространения сибирского шелкопряда в горных лесах ограничивает сумма активных температур  $\sim 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В данном случае вспышка возникла в результате комплекса условий, где, предположительно, особое влияние оказали климатические условия за предыдущие года. Так, засушливость климата в 2012 году (июнь-июль, рис. 2) привело к ослаблению древостоев, и, в совокупности с условиями 2013 года (май-июль, рис. 2), подготовили новое поколение сибирского шелкопряда к массовому размножению в 2014–2015 годах.

Наблюдаемая вспышка является панзональной. В этот же период зарегистрированы вспышки в Томской, Кемеровской и Иркутской областях, идентифицированных в 2015 году.



**Рис. 1.** Динамика (а) и распределение поврежденных сибирским шелкопрядом древостоев по элементам рельефа (б – по высоте над у. м.; в – по сторонам света; г – по склонам разной крутизны). 1 – поврежденные древостой по состоянию на 2015 г., 2 – поврежденные древостой по состоянию на 2016 год, 3 – по всей анализируемой территории. Площади поврежденных древостоев нормированы на площади темнохвойных древостоев 2013 года



**Рис. 2.** Динамика температур (а), количества осадков (б) и индекса сухости SPEI (в)

Статистическое моделирование, с применением пространственных помесячных климатических данных на основе метода MARS (Multivariate adaptive regression splines), показало потенциальную возможность идентификации зон массового размножения сибирского шелкопряда с достаточно высокой достоверностью (>60 %). Это подход требует дальнейшего тестирования.

### **Заключение**

Таким образом, по данным космосъемки вспышка массового размножения сибирского шелкопряда в Енисейском районе началась в 2014 году. Вероятно, этому способствовали климатические условия предыдущих двух лет. К концу 2016 г. 14 % темнохвойных древостоев сильно повреждено, которые хорошо идентифицируются на снимках Landsat и Sentinel-2A. Параметры съемки Sentinel-2A являются достаточными для идентификации зон гибели лесов в результате деятельности сибирского шелкопряда и позволяют дополнить временной ряд съемки Landsat. В совокупности со съемкой Sentinel-2B, запущенного в 2017 году, такие данные позволят вести оперативный мониторинг. Распределение поврежденных древостоев по элементам рельефа является неоднородным. Наибольшие повреждения отмечаются на южных склонах. Вспышка начинается с пологих склонов южной экспозиции, расположенных на средних высотах, далее, постепенно перемещается на более крутые склоны вниз и вверх по градиенту высоты из-за истощения кормовой базы. Наблюдается смещение границы очагового распространения сибирского шелкопряда на 70–90 км на север по сравнению ранее идентифицированной вспышкой. Вероятно, дальнейшее смягчение климата будет способствовать дальнейшему продвижению границы на север очагового распространения насекомых вредителей, включая сибирского шелкопряда.

### **Список литературы**

1. Леонтьев Д. Ф. Распространение и прогнозирование численности сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv.) (науч. обзор) // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11. Ч. 5. С. 705–709.
2. Брюханов А. Экологическая оценка состояния лесов в Сибири: тревожные итоги // Устойчивое лесопользование. 2009. № 2 (21). С. 21–31.
3. Spatial and temporal dynamics of Siberian silk moth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in Altai / V. I. Kharuk, D. A. Demidko, E. V. Fedotova, M. L. Dvinskaya, U. A. Budnik // Contemporary Problems of Ecology. 2016. V. 9. Is. 6. P. 711–720.
4. Remote monitoring of forest insect defoliation. A review / C. D. Rullan-Silva, A. E. Olthoff1, J. A. Delgado de la Mata and J. A. Pajares-Alonso // Forest Systems. 2013. 22(3): 377–391.
5. Im S. T. A technique of spatio-temporal analysis of darkneedle stands desiccation based on Landsat remote sensing data // Proceedings of the 15-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2015, 18–24, June, 2015. Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. V. 1. P. 433–440.
6. Кондаков Ю. П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // Энтомологические исследования в Сибири. Вып. 2. Красноярск: КФ РЭО, 2002. С. 25–74.
7. Рожков А. С. Массовое размножение сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним. М.: Наука, 1965. 180 с.

**А. А. Кабанов<sup>(2,3)</sup>, В. Г. Сибгатулин<sup>(1,2)</sup>**

<sup>(1)</sup>ИМ СФУ, Красноярск

<sup>(2)</sup>НП «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов»,  
Красноярск

<sup>(3)</sup>ТувИКОПР СО РАН, Кызыл

e-mail: weller86@inbox.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ И ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

Представлены результаты мониторинга комплексом геолого-геофизических методов (сейсмологический мониторинг, мониторинг естественного импульсного электромагнитного поля Земли, эмиссия радона) на геодинамическом полигоне в Сибирском федеральном округе России в 2007–2017 годах. Показана объективная необходимость комплексного мониторинга, в том числе необходимость применения дистанционного зондирования Земли для решения поставленных задач.

*Ключевые слова:* сейсмический мониторинг, электромагнитный мониторинг, газгидрогеохимический мониторинг, космический мониторинг, геодинамическая опасность.

### **Введение**

Усиление в последние годы сейсмической активности очаговых зон АССО, представляющих реальную опасность для южной и центральной частей Красноярского края, вызвало необходимость создания эффективной системы сейсмического мониторинга на территории региона. В свою очередь создание сейсмологической сети на территории края и начало сейсмомониторинга повлекло за собой необходимость детальных неотектонических и сейсмогеологических исследований для решения актуальных задач оценки геодинамической опасности. Для обеспечения геодинамической безопасности населения и техногенных объектов промышленных агломераций региона, плотин и водохранилищ крупных ГЭС, необходимо осуществлять непрерывные комплексные (сейсмические и геодинамические наблюдения), с использованием, как региональной сети сейсмических станций, так и системы локальных сетей геодинамического мониторинга. Информационной основой обеспечения геодинамической безопасности исследуемого региона являются результаты геомониторинга очаговых областей сильных землетрясений. В этой связи, важным является разработка новых методических подходов при организации регионального мониторинга естественных геофизических полей в рамках полигонных исследований на территории АССО.

С другой стороны, уровень комплексирования различных методов геодинамического мониторинга не обеспечивает надёжных оценок положения эпицентра ( $\Delta S \pm 50\text{--}100$  км) землетрясений. Для повышения надёжности определения положения эпицентров землетрясений, необходимо увеличить плотность сетей регистрации электромагнитного и газгидрогеохимического методов, а также дополнить применяемый геолого-геофизический комплекс данными спутниковых инфракрасной и геохимической съёмки.

На основе полученного в результате десятилетнего мониторинга опыта комплексного геофизического мониторинга не только на территории Сибирского федерального округа, но и на территории Дальневосточного региона есть необходимость использования данных космического мониторинга.

## Система комплексного мониторинга сейсмической опасности Алтае-Саянского региона

В течение 2007–2017 годов на геодинамических полигонах в Алтае-Саянской сейсмоактивной области, на п-ове Камчатка и о. Сахалине проводился мониторинг комплексом геолого-геофизических методов – сейсмический мониторинг, регистрация естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), газгидрогеохимический мониторинг на основе эмиссии радона.

На основе всех изученных материалов создана система наблюдений, которая включает: пункты сейсмического мониторинга, организованные на основе сейсмической аппаратуры «РСС Дельта-Геон-02М», «РСС ЮГРА-2» (Москва), «Байкал-8» (Новосибирск), направленной на мониторинг сейсмической активности очаговых зон; пункты электромагнитного мониторинга на базе аппаратуры МГР-01 (Томск), направленной на регистрацию естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ); пункты измерения концентрации радона в подземных водах, на основе аппаратуры Радиометр радона «РРА-01М-01 (Москва). Реализована схема организации, оснащения, настройка аппаратуры и информационной поддержки-связи пунктов геомониторинга, системы передачи информации мониторинга и разработанное методическое обеспечение для пунктов наблюдений естественных геофизических полей позволили обеспечивать оперативное получение данных мониторинга геофизических полей для целей оперативной оценки параметров подготовки сильного землетрясения (рис. 1).

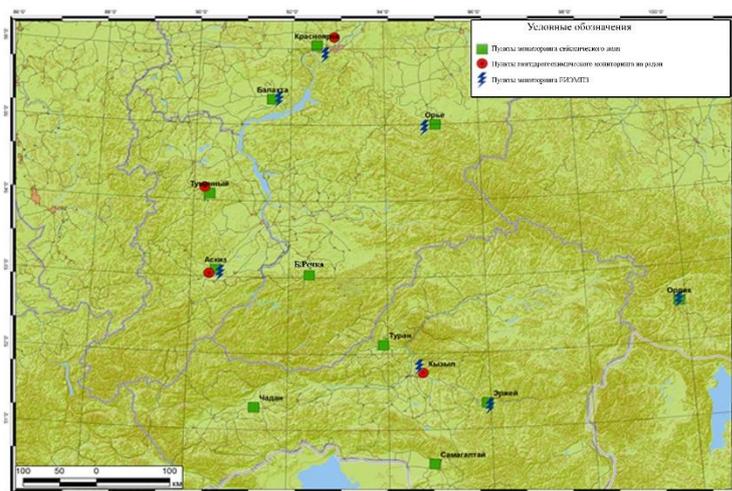


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений Алтае-Саянского геодинамического полигона

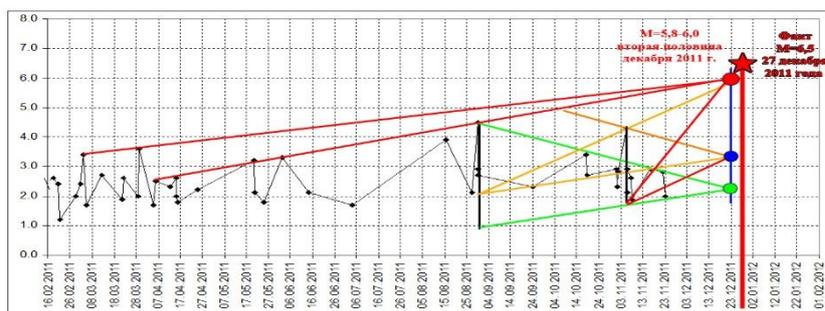
## Результаты работы системы комплексного геодинамического мониторинга Алтае-Саянского региона

В период 2007–2017 годов в рамках созданной системы мониторинга, обеспечивалась оперативная и непрерывная регистрация низкоэнергетических землетрясений, изменения поля ЕИЭМПЗ и концентрации радона в подземных водах, на основе которых выполнялась оперативная оценка геодинамической опасности, в том числе для последних трёх сильнейших землетрясений в регионе.

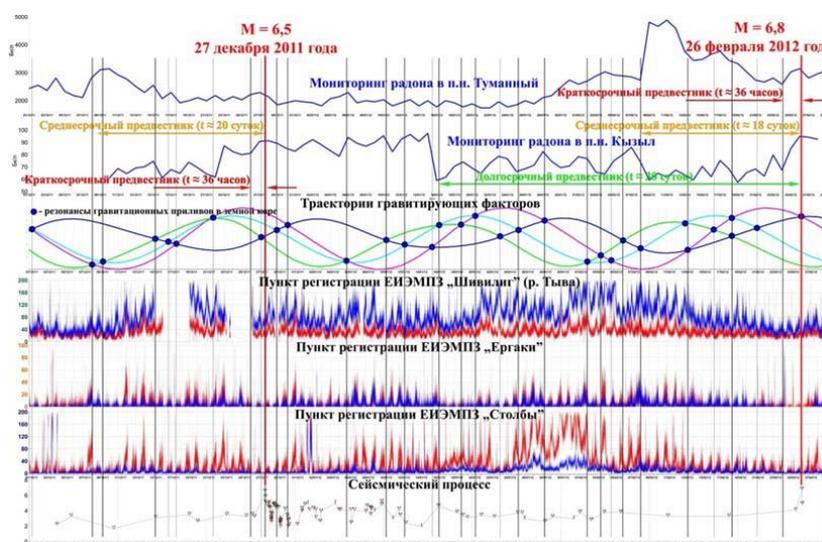
На рис. 2, 3 представлены результаты (для примера) анализа предвестников подготовки сильных землетрясений в Каа-Хемском очаге на территории Республики Тыва в 2011–2012 годы.

При анализе данных подготовки землетрясения 27.12.2011 магнитудой 6,5 и 26.02.2012 в Каа-Хемском районе Республики Тыва по данным сейсмического

мониторинга выделена зона подготовки землетрясения, в сейсмическом сигнале проявился предвестник подготовки этого землетрясения в виде формирования «энергетического клина». За семь-девять суток до этих событий в поле ЕИЭМПЗ также наблюдалось anomальное поведение суточных ходов сигнала.



**Рис. 2. Выделение предвестника-структуры подготовки сильного землетрясения 27 декабря 2011 года с магнитудой 6,5**



**Рис. 3. Выделение предвестников подготовки сильных землетрясений по результатам геодинамического мониторинга на Алтае-Саянском полигоне**

Проводя анализ данных на проявление радоновых предвестниковых аномалий при подготовке этих землетрясений, выявлено повышение уровня концентрации радона в пункте наблюдения Кызыл (около 100 км от очага землетрясений), при котором максимальное отклонение от среднефоновой концентрации при первом землетрясении составило 26 %, при втором – 24 % (рис. 10, 11), полагаем, что повышение концентрации уровня радона указывает на расширение в блоковой структуре в зоне подготовки землетрясения.

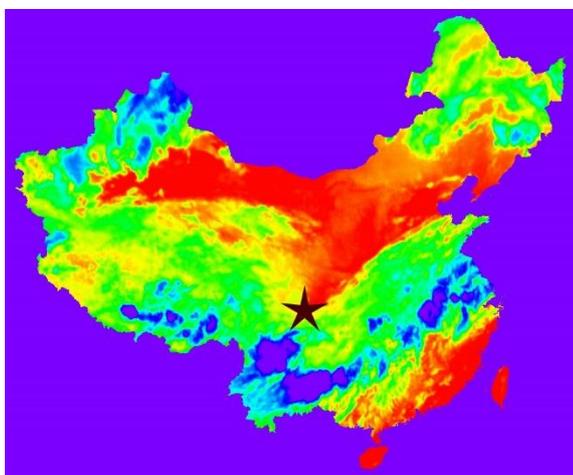
Таким образом, созданная система геодинамического мониторинга очаговых зон сильнейших землетрясений Алтае-Саянского региона на основе комплекса геолого-геофизических методов (ГГД-поле, сейсмология, ЕИЭМПЗ, радон) способна обеспечить как оценку изменения напряженно-деформированного состояния изучаемой геологической среды, так и среднесрочный (1–3 месяца) и краткосрочный (1–10 суток) прогноз сильных землетрясений с  $M \geq 5,0$ .

Достигнутая точность прогнозов составляет по магнитуде  $\Delta M \pm 0,5$ ; по времени  $\Delta t \pm 1-15$  суток; по местоположению эпицентра  $\Delta S$  от 100 до 500 км. Низкая точность определения положения эпицентров сейсмических событий связана с принципиальной

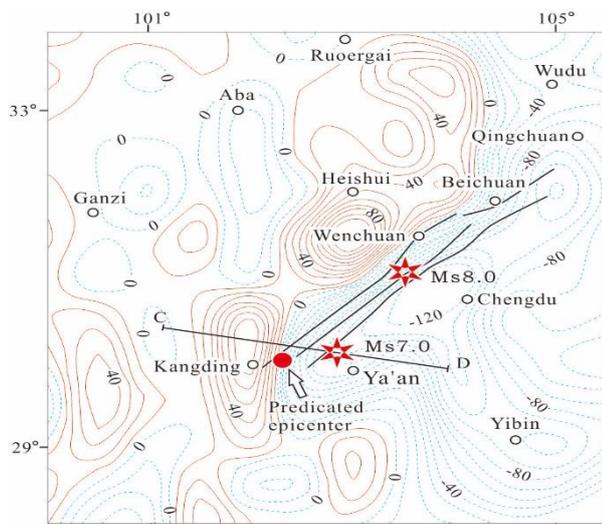
невозможностью равноточного определения сопряжённых величин: магнитуды и положения эпицентра. В связи с этим, необходимо применять дополнительные методы выявления предвестников подготовки сильных землетрясений, в том числе и дистанционных, спутниковых наблюдений в инфракрасном диапазоне и геохимическими аномалиями.

### **Возможности применения спутникового мониторинга для оценки параметров подготовки сильных землетрясений в исследуемом регионе**

В России отсутствует система мониторинга сейсмической (геодинамической) опасности на основе данных спутникового мониторинга, однако специалисты Китайского геологического университета (Zuoxun Zeng, Dabin Wu, Genshen Liu и др., КНР) уже многие годы успешно применяют данные технологии для определения места и времени, а в некоторых случаях и магнитуды, ожидаемого сильного землетрясения (рис. 4, 5).



**Рис. 4. Аномалии в инфракрасном диапазоне за 12 часов до Мянчжурского землетрясения  $M = 5,6$  30.06.2009 (КНР)**



**Рис. 5. Прогноз местоположения Вэнчуньского землетрясения  $M = 8,0$  12.05.2008 на основе спутникового мониторинга гравитационных аномалий**

### **Заключение**

Результаты исследований зарубежных специалистов в области мониторинга и прогноза сейсмической опасности подтверждают необходимость использования спутниковых наблюдений для оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

**А. А. Карпов**

Северный Арктический федеральный университет, Архангельск  
e-mail: xxstpatrickxx@gmail.com

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ВЫРУБОК И ОЦЕНКА ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ ПО СНИМКАМ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ TASSELED CAP**

Интенсивное лесопользование и недостаточные меры, применяемые для восстановления лесов, привели к снижению лесных запасов в северо-западных регионах России. Создание методик для выявления лесных вырубок и оценки лесовосстановления является важной задачей для лесной отрасли. Данные методики могут быть использованы для проведения ежегодного мониторинга лесовосстановления, что позволит иметь актуальную информацию по восстановлению лесов и автоматизировать этот процесс.

*Ключевые слова:* ДЗЗ, мониторинг, вырубки лесовосстановление, Tasseled Cap.

Преобразование Tasseled Cap было разработано в 1976 году исследователями R. J. Kauth и G. S. Thomas для анализа изменений растительного покрова. Преобразование является частным случаем метода главных компонент, что преобразует данные изображения в новую систему координат с новым набором ортогональных осей. Цель данного преобразования заключается в уменьшении размерности данных с наименьшей потерей информации [1].

После выполнения преобразования Tasseled Cap данные будут преобразованы в 3 канала: brightness (яркость), greenness (зеленость) и wetness (влажность). Яркость связана с открытыми или частично скрытыми почвенными, искусственными и естественными объектами, такими как бетон, асфальт, гравий, обнажения горных пород и прочие открытые области. Вторая компонента – уровень зеленого – связанная с зеленой растительностью. Третья компонента – влажность – расположена перпендикулярно первым двум компонентам и связана с влажностью почвы, водными и другими «влажными» объектами [2].

Для проведения исследования были выбраны территории Северодвинского и Онежского лесничеств Архангельской области. Для создания маски вырубок по годам использовались спутниковые данные Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI, оценка лесовосстановления проводилась по снимкам Landsat 8 OLI. Спутниковые снимки высокого разрешения аппарата Ресурс-П были использованы для исключения из анализа участков вырубок, на которых не происходит лесовосстановление. К таким участкам можно отнести семенные куртины, оставленные после рубки, и заболоченные участки.

Для получения достоверной информации были проведены полевые обследования. В результате проведения полевых работ летом 2017 года было заложено 41 пробная площадь на рубках прошлых лет. Вырубки на местах пробных площадей датируются от 2002 до 2010 года. Следовательно, полевые данные дают возможность объективно оценить результат лесовосстановления в течение от 6 до 14 лет по снимкам Landsat 8 OLI 2016 года.

Платформа Google Earth Engine была использована в качестве инструмента для обработки снимков Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI, что значительно ускорило процесс обработки данных.

Выявления вырубок основывается на простой методике создания побитовых масок, используя пороговые значения. Методика для создания маски вырубок состоит из следующих шагов:

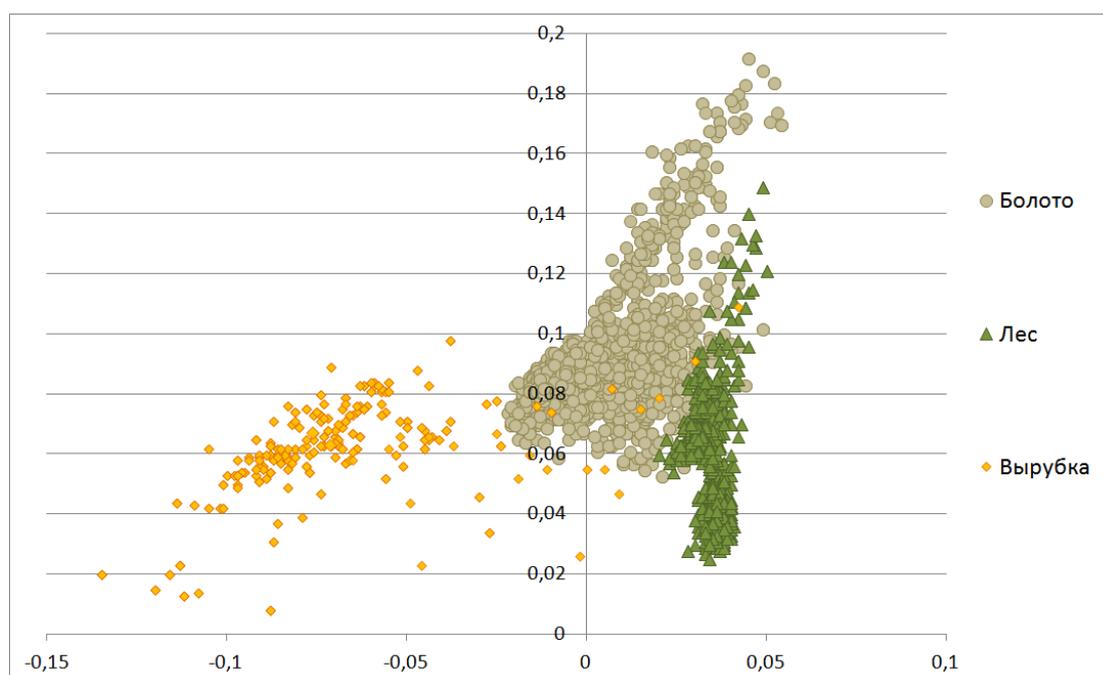
1. Создания маски вырубок на выбранный год по пороговым значениям в каналах brightness, greenness, wetness для свежей вырубки выбранного года. Для сбора статистики свежая вырубка на снимке выделяется полигоном, после чего отбрасываются 3 % выбивающихся из выборки значений и определяются пороговые значения максимума и минимума для каждого канала.

2. Создания маски леса по снимку предыдущего года. Для создания данной маски используется такой же алгоритм, как в пункте 1, только здесь полигоном выделяется не тронутый участок леса. Данный шаг требует исключить из маски, построенной в пункте 1, вырубки предыдущих лет и объекты, не относящиеся к вырубкам. На рис. 1 и 2 представлены графики значений пикселей трех типов объектов (вырубка, лес, болото) в каналах brightness, greenness и wetness. Как видно из данных графиков, значения болота пересекаются со значением свежей вырубки, что делает невозможным создание достоверной маски по одному снимку.

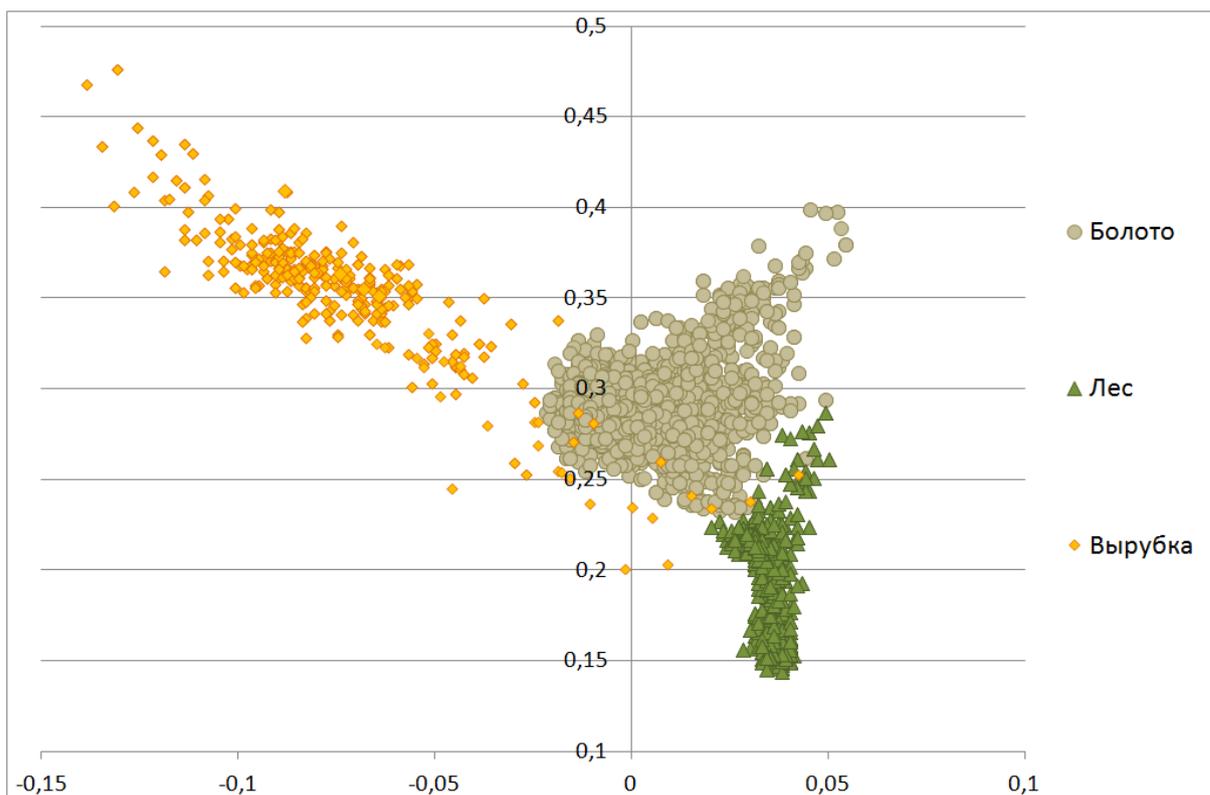
3. При наличии облачности на снимке края облаков имеют схожие спектральные характеристики со свежей вырубкой. Для исключения нежелательных объектов в маске вырубок требуется создать маску облачности для последующего удаления облачных пикселей.

4. Для создания точной маски вырубки требуется вычесть из маски вырубки пиксели, не занятые лесом, используя маску леса, и вычесть маску облачности. Для отсеивания шумов также следует удалить одиночные пиксели [3].

Создание маски вырубок по каждому году за период с 2001 по 2015 год требовалось для анализа лесовосстановления на местах рубок леса. Для проведения анализа было отобрано по три вырубки на каждый год выбранного периода. Используя снимки высокого разрешения спутника Ресурс П, с участков вырубок были удалены заболоченные участки и семенные куртины, оставленные для последующего лесовосстановления. Это было сделано для оценки только тех участков, на которых происходит лесовосстановления [4; 5].

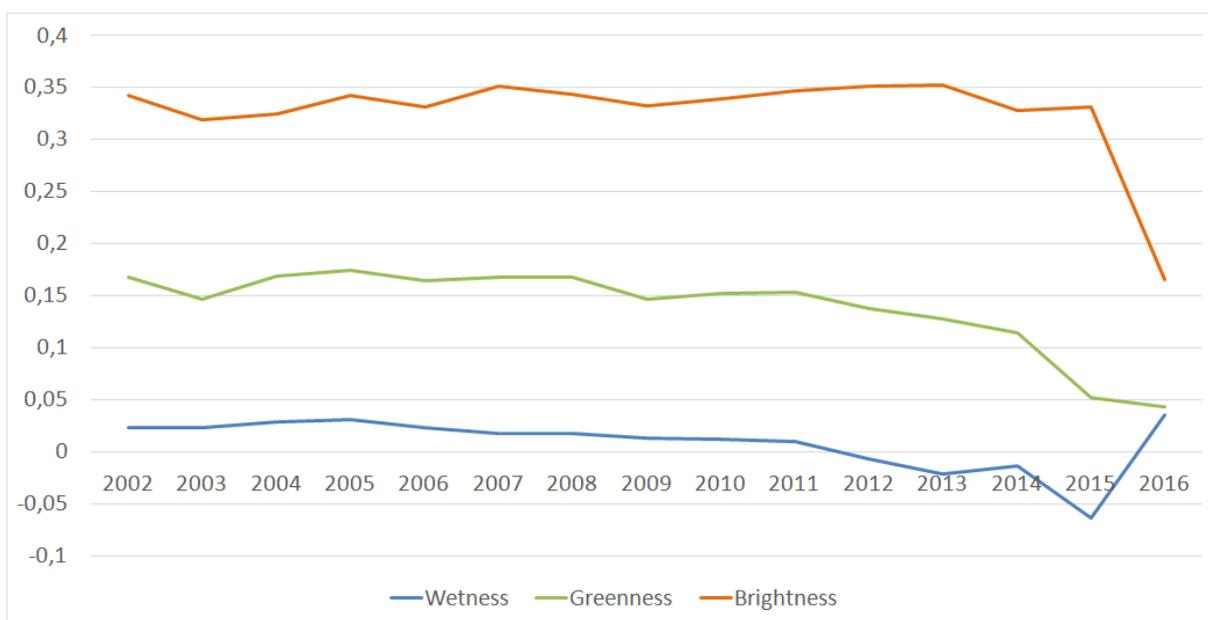


**Рис. 1. График значений вырубки, болота и леса. Горизонтальная ось – значения wetness, вертикальная ось – значения greenness**



**Рис. 2. График значений вырубки, болота и леса. Горизонтальная ось – значения wetness, вертикальная ось – значения brightness**

График на рис. 3 отображает лесовосстановление в каналах brightness, greenness, wetness. Из данного графика можно сделать вывод, что в результате вырубки резко изменяются значения в канале brightness (растут) и wetness (падают). Значения 2016 года на графике – это значения спелого леса. Значения в канале greenness изменяются только через год после рубки. Среднее значение свежей вырубки примерно равно среднему значению спелого леса в данном канале.



**Рис. 3. График лесовосстановления на местах вырубок прошлых лет**

Важными для оценки лесовосстановления являются каналы greenness и wetness. Как видно из графика на рис. 3, в течение 14 лет wetness растёт и достигает значения спелого леса. Значение greenness на месте лесовосстановления выше, чем на месте вырубки. Теоретически при увеличении возраста леса это значение должно выровняться со значением спелого леса через несколько десятков лет.

Для автоматической оценки лесовосстановления на местах прошлых рубок требуется собрать средние значения с вырубок различных лет и построить прямую, проходящую через середину данного распределения. В этом случае оптимальным каналом будет greenness, так как значения спелого леса будут лежать ниже этой прямой. Если использовать для этого канал wetness, в маску успешного лесовосстановления попадут семенные куртины.

Также для визуальной оценки лесовосстановления можно использовать градиентную заливку значений greenness на местах вырубок.

### **Заключение**

Преобразование Tasseled Cap значительно упрощает анализ снимков, уменьшая размерность данных. Использование трех каналов – brightness, greenness и wetness – позволяет выявлять вырубки и проводить анализ лесовосстановления на снимках среднего разрешения Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI.

В данной статье приведен пример использования спутниковых снимков Landsat. Для выявления вырубок и оценки лесовосстановления возможно использовать снимки спутника Sentinel 2. Данные снимки имеют большее пространственное разрешение, что позволит более точно определять участки вырубок и проводить анализ лесовосстановления.

### **Список литературы**

1. Kauth R. J. and Thomas G. S. The tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University of West Lafayette, Indiana. 1976. P. 4B-41 to 4B-51.
2. Derivation of a Tasseled Cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance / Ch. Huang, B. Wylie, L. Yang, C. Homer, G. Zylstra. Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, SD 57198, USA, 2001. 10 p.
3. Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S. P. Healey, S. P. Healey, W. B. Cohen, Y. Zhiqiang, O. N. Krankina // Remote Sensing of Environment. 2005. No. 97. P. 301–310
4. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С. А. Баргалева, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, С. А. Хвостиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 203–221.
5. Баргалева С. А., Исаев А. С., Лупян Е. А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12, № 6. С. 1039–1054.

**Т. И. Коновалова, М. А. Ноговицына**

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск  
e-mail: 25051204@mail.ru

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСИСТЕМ**

Рассмотрены приемы изучения материалов дистанционного зондирования Земли при геосистемных исследованиях территории. Процедура исследования основывается на рассмотрении факторов, объединенных в четыре блока: вещественно-энергетический обмен и взаимосвязи; синергетические эффекты; фактор времени; направленность развития.

*Ключевые слова:* космический снимок, геосистема, дешифрирование, дешифровочный признак, объект, структура, особенности функционирования.

Основной принцип дистанционных исследований геосистем заключается в том, что излучательные и отражательные характеристики природных объектов являются не только индикационными дешифровочными признаками, но и особенностями природы, образовавшимися в процессе длительной эволюции. Эти особенности природы играют значительную роль в функционировании геосистем [1]. Дистанционные исследования геосистем строятся на многоуровневом синтезе материалов космических съемок (КС) – рис. 1.



**Рис. 1. Последовательность приемов изучения материалов дистанционного зондирования Земли при геосистемных исследованиях территории**

Различные комбинации структур космических снимков помогают сформировать образ явления как целого, по которому можно определять его сущность и оценить пространственно-временные особенности геосистем.

Процедура исследования основывается на рассмотрении факторов, объединенных в четыре блока: 1) вещественно-энергетический обмен и взаимосвязи; 2) синергетические эффекты; 3) фактор времени; 4) направленность развития.

**1. Первый блок** объединяет характеристики вещественно-энергетического обмена и внутренних взаимосвязей, определяя свойства и целостность геосистемы. Посредством

дешифрирования по прямым дешифровочным признакам разномасштабных КС определяется принадлежность к территориальной единице большей размерности. Геосистеме как объекту дешифрирования присуща иерархичность структуры, что влечет за собой иерархичность обобщения. При переходе от одного масштаба съемки к другому, происходит не сплошное изменение элементов изображения, а перестройка рисунка, смена одних структур другими. Как результат каждому объекту присуща своя область максимальной дешифрируемости и оптимальных масштабов; тем не менее единообразной системы применения тех или иных масштабов не существует [2].

Реализация процесса исследования происходит путем синтеза систем дешифровочных признаков: текстурных, яркостных, геометрических и косвенных. Критерием дифференциации качественно различных объектов является временной и спектральный диапазоны космических съемок, а анализ текстуры и фототона изображения КС делает возможным выявлять определенную базу данных, которая далее переводится в теоретический блок знаний. При этом геометрические и яркостные показатели прямо применимы лишь к отдельным компонентам геосистемы, а «текстура» изображения (структура + характерный рисунок) относится в целом к геосистеме. Опосредованно характеризуют дешифрируемый объект косвенные признаки (особенности смежности, соседства, взаимосвязей).

Анализ текстуры изображения дает возможность оценить сложность геосистемы в количественном плане, по характеру взаимосвязей и числу составляющих элементов. Сложность геосистемы является косвенным фактором оценки объема вещества и энергии, поступающих геосистеме, то есть учет размера геосистемы позволяет оценить вещественно-энергетический обмен, который также проявляется в спектральных характеристиках. Биохимические и физические особенности функционирования геосистем оказывают влияние на формирование тональных характеристик изображения КС, и при анализе изображения косвенно можно судить об их мобильной части, выступающей преимущественно в виде климата, аккумулятивных и денудационных процессов, стока.

При изучении спектральных диапазонов (0,6–0,7 мкм – изучение вегетирующей растительности; 0,7–0,8 мкм – влажности почвы; 0,8–1,0 – минералогического состава горных пород и др.) и геометрической структуры космических снимков появляется возможность выявления пространственных взаимосвязей компонентов геосистем. Сравнительный анализ этих результатов в рамках характерных текстур изображения космического снимка (фототон + геометрический рисунок) позволяет установить определенные взаимосвязи, например, развития сети разломов (геометрическая структура изображения) с характером теплового потока (фототон изображения) либо приуроченности определенных ландшафтов к таким местоположениям. При этом близость текстурных признаков изображения объектов индицирует их общегеографические связи в рамках исследуемого района.

**2. Блок, связанный с изучением синергетических эффектов,** по данным космических съемок, является аналитическим в системе дистанционных исследований. Путем выявления переменных состояний геосистем и их соотношением с теоретической конструкцией и практическими знаниями о физико-географических особенностях региона возможно изучение критических факторов, серий возмущений и амплитуды свойств и степеней свободы.

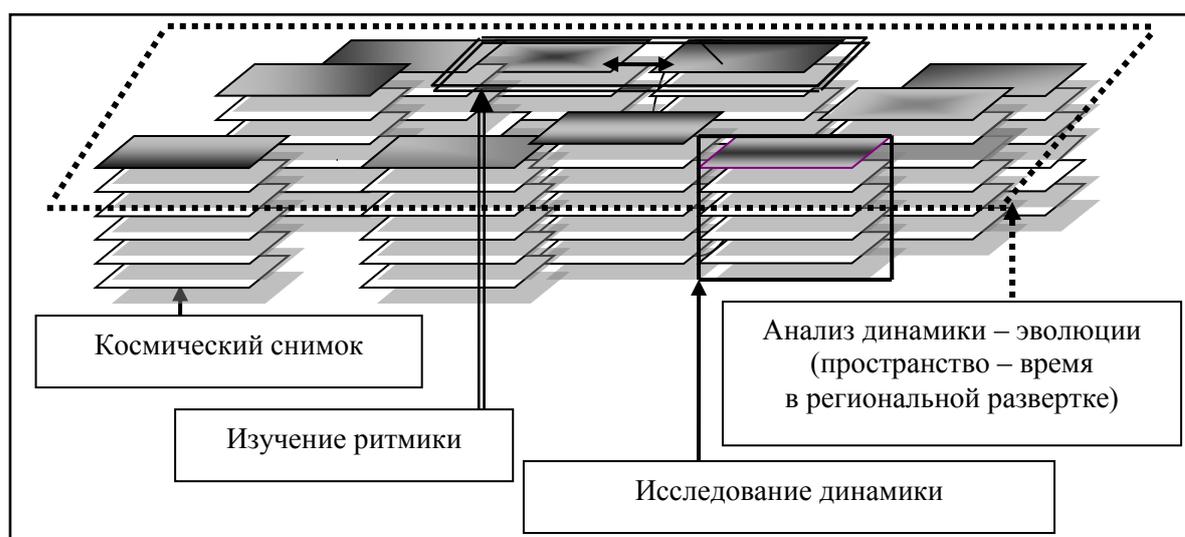
Особенности функционирования геосистем, существенно изменяющие их оптические свойства, на КС распознаются удовлетворительно (на одиночных снимках). Периодическая съемка требуется для обнаружения серий возмущений, для этого в зависимости от характера исследуемых явлений выбираются параметры КС. Выявить амплитуду свойств и степени свободы позволяют динамические изменения прошедшего периода, поэтапно запечатленные в физиономических чертах объектов.

В итоге с высокой степенью достоверности возможно проследить развитие геосистем в действительном масштабе времени и выявить критические факторы в их развитии.

Различные функциональные и структурные нарушения любой геосистемы упорядочиваются через мнимокоренные, серийные и различные производные переменные состояния. Такие состояния отражают взаимосвязи изменчивых режимов того или иного компонента системы, которые устанавливаются через морфологические отличия в строении геохоры, имеющей наиболее ясное и прямое отображение на КС.

Таким образом, как интегральная характеристика состояния геосистемы может рассматриваться оптическая плотность снимка. Отображения разнообразных базовых факторов и типы структур, выделяемые на различных иерархических уровнях, создают основу для исследования геосистем. Установление ведущих закономерностей дифференциации геосистем обеспечивают процедуры выявления и анализа коренных структур и целостных образований на КС, которые наиболее отчетливы на изображении и сравнимы друг с другом при различной степени генерализации. При этом близость спектрального отражения объектов индицирует их общегеографические связи в рамках исследуемого региона.

**3. Фактор времени** служит обобщенным показателем накопления системой информации о порядке, совершенстве связей, сложности, устойчивости к возмущениям внешней среды. Геосистема рассматривается как диахронное целое, существенное значение имеет определение времени проявления ее структуры на фоне динамических состояний. Состояние структуры геосистем, запечатленные поэтапно в физиономических чертах объектов, зафиксированы на КС (рис. 2).



**Рис. 2. Изучение временных преобразований геосистем по данным КС**

Исследование пространственных структур, находящихся на разных динамических, ритмических и эволюционных стадиях, возможно как при сравнении отражающих свойства разнообразных пространственно-временных вариантов с последовательностью моментов, связанных с их генетической памятью, так и при сравнении определенных моментальных КС функционирования однотипных геосистем.

При изучении ритмики и для прослеживания динамики космические методы дают значительную информацию. При использовании теоретических знаний об общих закономерностях пространственно-временных особенностях геосистем наравне с анализом существенной по площади территории, отображаемой на КС, появляется возможность исследования эволюционных преобразований.

**4. Следующий блок – направленность развития** – синтезирует полученную ранее информацию. С учетом разрешающей способности последовательно выявляются характеристики геосистем. Путем таких действий могут быть отображены различные типы геосистемных взаимосвязей, воздействующих на факторы проявления классического или бифуркационного механизмов развития.

Принято считать, что по космическим снимкам возможно выявление закономерностей пространственного размещения географических объектов. Вместе с тем на основе анализа спектральных диапазонов снимков, характеристик структуры изображения и процедур их обработки появляется возможность синтеза разнообразных явлений в единую целостность – геохору, выраженную на определенной территории.

В настоящее время в России и за рубежом рассматриваются разнообразные аспекты применения дистанционных методов в исследовании взаимодействия «геосистема – среда», и как результат – формирование представления об экологическом состоянии территорий. Исследование взаимодействия природных и антропогенных систем и объектов, прогноз состояния окружающей среды обширных территорий представляют серьезный интерес. Путем использования материалов космически съемок и карт геосистем решаются следующие природоведческие задачи: общая оценка характера функционирования и развития геосистем региона (системная связь ниже перечисленных задач); анализ взаимодействия природных и антропогенных объектов, характера их преобразования; оценка и мониторинг экологического состояния регионов. Системная интерпретация полученных данных позволяет наиболее полно выявлять причинно-следственные связи объектов; использовать совокупность средств и методов исследования внешних и внутренних связей геосистем; применять индикационные признаки изображений для решения прогнозных задач.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00902.*

#### **Список литературы**

1. Виноградов Б. В. Преобразованная Земля. М.: Наука, 1984. 213 с.
2. Востокова Е. А. Использование аэрокосмических фотоснимков при гидрогеологических исследованиях в пустынях. М.: Недра, 1980. 160 с.
3. Кравцова В. И. Генерализация аэрокосмического изображения: континуальные и дискретные снимки. М.: Изд-во МГУ, 2000. 256 с.

**В. А. Кочнев, Д. А. Александровский**

Институт вычислительного моделирования КНЦ СО РАН, Красноярск  
e-mail: kochnev@icm.krasn.ru

## **О ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ И В ЯДРЕ ПЛАНЕТ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРИЛИВНЫХ СИЛ**

В работе показано, что наибольшие приливные силы создаются в экваториальной области планеты. Это предопределяет аналогичные механизмы формирования течений, которые в ионизированном ядре генерируют токи и магнитное поле Земли. Показана линейная зависимость магнитного поля и приливных сил для планет Солнечной системы.

*Ключевые слова:* магнитное поле Земли, приливные силы, геодинамо, обратная задача магнитометрии.

### **Введение**

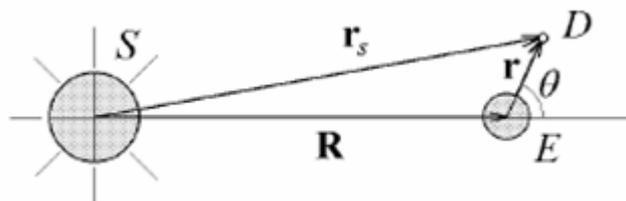
Влияние приливных сил на возникновение потоков жидкости в разных постановках рассматривалось еще Ньютоном, Лапласом, Эйлером и другими учеными. Среди значимых в контексте возникновения течений в ядре – работы Мельхиора [1], Ревуженко [2], Бутикова [3]. В них освещён широкий спектр математических моделей и интерпретации данных наблюдений уровней гравитационных волн на поверхности земной коры и океана. Наш интерес к этой теме обусловлен поиском природных механизмов, вызывающих движение жидкости в ядре планеты, которые могут быть источниками магнитного поля.

Следует заметить, что без учета гравитационного влияния внешних тел авторам различных моделей геодинамо не удавалось получить модели достаточной для объяснения всего спектра наблюдаемых явлений. По этому поводу написал Моффат: «нам пока не известно, что в конечном счете является источником энергии для основных движений диска земного динамо» [4]. Таким образом, поиск главного источника движения жидкости в ядре является ключевой проблемой при исследовании формирования планетарного магнитного поля.

Данная работа рассматривает приливные силы в качестве искомого источника движения в ядре и согласует эту модель с результатами решения обратной задачи магнитометрии.

### **Построение кинематико-гравитационной модели**

Для создания модели введем объекты  $S$  – внешнее тело: Солнце или спутник планеты и точку  $D$  единичной массы – внутри планеты, на ней или над ней (рис. 1). Ее координаты определяются параметрами  $R$ ,  $r$  и  $\theta$ ; внешнее тело имеет массу  $m_s$ .



**Рис. 1. Система координат для расчета приливной силы**

Гравитационная сила, действующая на объект с единичной массой, в центре планеты будет равна

$$\Delta g_{sp} = G \frac{m_s}{R^2} . \quad (1)$$

Кроме прямой силы, рассчитаем горизонтальную составляющую силы тяжести [3]

$$\Delta g_{hor} = -\frac{3}{2} \Delta g_{sp} \frac{r}{R} \sin 2\theta . \quad (2)$$

Приняв  $\theta = 45^\circ$ , получим оценку максимального значения горизонтальной составляющей силы тяжести. Введем период относительного вращения спутника вокруг планеты:

$$T_{rpl} = T_{pl} \left( \frac{T_{sp}}{T_{sp} - T_{pl}} \right), \quad (3)$$

где  $T_{pl}$  – период вращения планеты вокруг своей оси;  $T_{sp}$  – период вращения спутника вокруг планеты. Тогда максимальное значение приливной силы можно записать как

$$\Delta F = \frac{3 * G m_s m_1 r T_E}{2 R^3 T_{rpl}}, \quad (4)$$

где  $T_E = 1$  день, – период осевого вращения Земли, используемый как нормировочный коэффициент.

Нетрудно увидеть, что при равенстве периодов обращения спутника вокруг планеты и вращения планеты вокруг своей оси  $T_{rpl} \rightarrow \infty$ , то есть спутник является стационарным и не создает приливных сил.

Приливная сила оказывается в прямой зависимости от  $r$  – расстояния от точки расчета до оси вращения планеты. Поясним этот эффект на примере формирования в Тихом океане глобальных вихревых течений (рис 2). Наибольшие силы создаются на экваторе, меньшие – в высоких широтах, что, наряду с ограничивающей океан сушей, и определяет направление этих циклических течений. Если наблюдать картину течений со стороны северного полюса, они будут направлены по часовой стрелке как в северном, так и в южном полушарии.

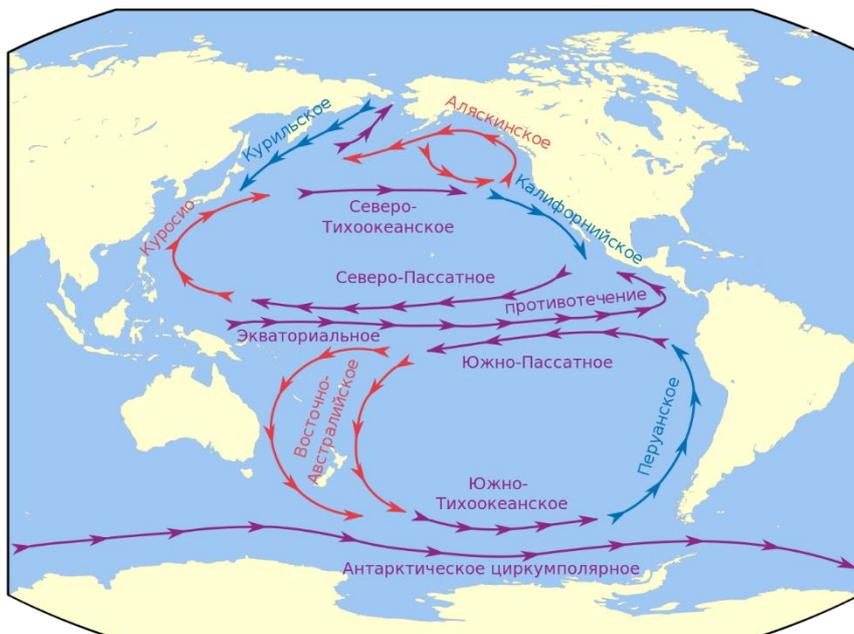
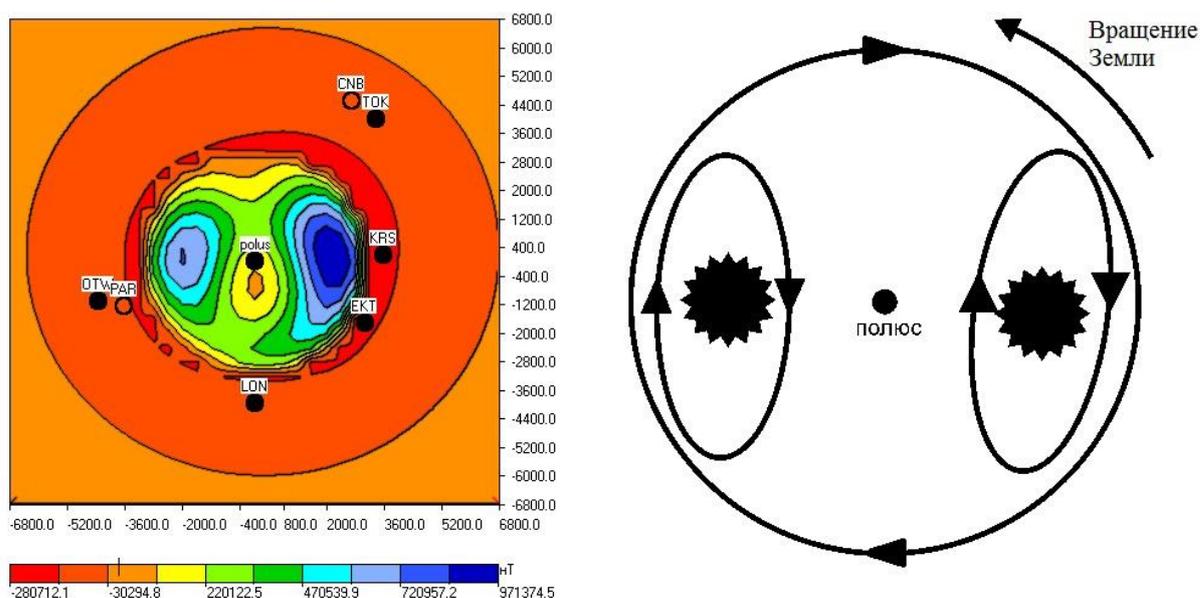


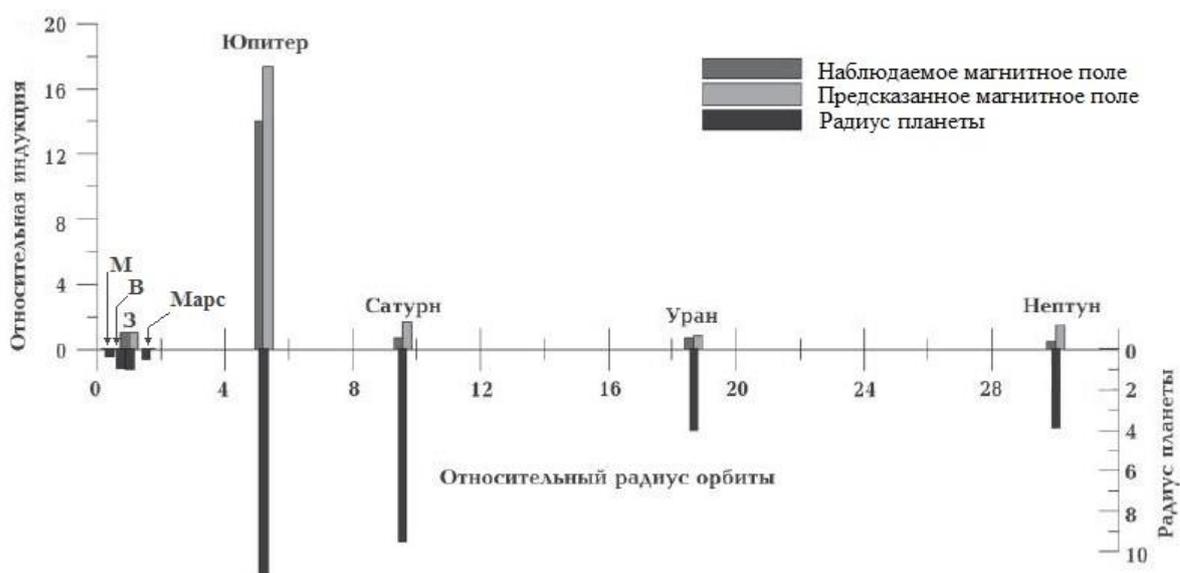
Рис. 2. Океанические течения на поверхности Земли

Подобная картина движения жидкости вблизи поверхности ядра Земли получена при решении обратной задачи магнитометрии [5] (рис. 3).



**Рис. 3. Магнитное поле на поверхности ядра Земли в северном полушарии (слева) и направление токов, его обеспечивающих, (вид со стороны северного полюса)**

В работах Кочнева [5; 6] приводятся результаты (рис. 4), указывающие на линейную связь приливных сил и интенсивности магнитного поля на планетах Солнечной системы, и объясняющие причины некоторых периодических изменений магнитного поля на планете Земля.



**Рис. 4. Наблюдаемые и предсказанные значения магнитного поля на экваторе некоторых планет Солнечной системы (Земля принята за эталон единичного поля)**

Расчет приливных сил может также использоваться для оценки уровня сейсмологической активности для разных регионов Земли. Примером такой оценки может служить работа [7].

## **Заключение**

В работе приводится обоснование модели формирования потоков жидкости на поверхности Земли под воздействием приливных сил. Подобная картина течений на поверхности ядра, полученная при решении обратной задачи магнитометрии, указывает на приливной механизм их возникновения. Приливная модель формирования потоков в дальнейшем будет использована для решения широкого спектра задач: от оценки уровня сейсмологической активности в различных регионах Земли до определения приливных сил, создаваемых планетами на Солнце, и их влияния на интенсивность и динамику магнитного поля Солнца.

*Автор признателен И. В. Гозу за участие в расчетной части работы и помощь в ее оформлении.*

## **Список литературы**

1. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
2. Ревуженко А. Ф. Приливные волны и направленный перенос масс Земли. Новосибирск: Наука, 2013. 204 с.
3. Бутиков Е. И. Физика океанских приливов в компьютерных моделях. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2007.
4. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 1980. 335 с.
5. Кочнев В. А. Модель источников магнитного поля Земли, полученная в результате решения обратной задачи // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 364 с.
6. Кочнев В. А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо // Геология и геофизика. 2013. № 4. С. 3–14.
7. Чубаров Д. Л., Кочнев В. А. Расчет и анализ триггерного эффекта приливных сил на наиболее крупные землетрясения // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 2. С. 59–64.

**М. А. Куприянов, Г. А. Кочергин, Ю. М. Полищук**

Автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа Югры  
«Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»,  
Ханты-Мансийск; e-mail: office@uriit.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ LANDSAT 8 ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕМОВ СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО ГАЗА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ**

Статья посвящена вопросам дистанционной оценки суммарных объемов факельного сжигания попутного газа на территории нефтедобывающего региона с использованием данных о количестве действующих на территории факельных установок, определяемом по космическим снимкам. С использованием данных об объемах факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории и спутниковых снимков Landsat 8 разработана регрессионная модель, позволяющая оценивать объемы сжигания газа на территории.

*Ключевые слова:* попутный нефтяной газ, факельные установки, космические снимки, регрессионная модель, нефтедобывающие регионы.

### **Введение**

Одной из важных экологических проблем нефтедобывающих регионов стало сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) на нефтяных месторождениях, в результате которого в атмосферу выбрасываются значительные объемы экологически опасных продуктов сжигания, например, оксиды азота и сажа, оказывающие вредные воздействия на лесорастительный покров нефтедобывающих территорий [1]. Известно, что в результате сжигания попутного газа в атмосферу выбрасываются и большие объемы углекислого газа, что дает значительный вклад в парниковый эффект как один из факторов глобального потепления. В связи с этим представляет интерес оценка территориальных объемов ПНГ, сжигаемого в факельных установках на месторождениях за определенный интервал времени (месяц, квартал, год).

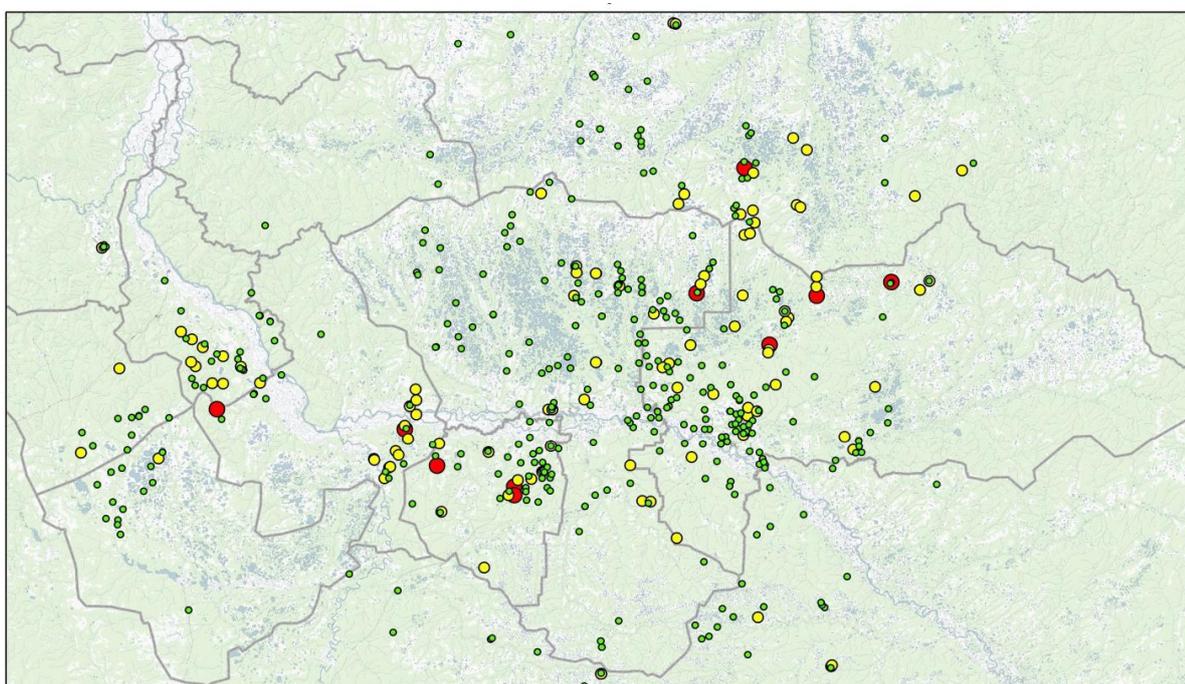
В [2; 3] рассматриваются вопросы оценки объема сжигаемого газа на отдельных факельных установках (ФУ) с использованием информации, полученной по космическим снимкам MODIS. Однако методы, изложенные в цитированных работах [2; 3], ориентированы на использование снимков низкого пространственного разрешения, не позволяющих дешифрировать отдельные ФУ на нефтедобывающих территориях. Более приемлемым, по нашему мнению, является подход к оценке территориального объема сжигаемого газа, основанный на использовании информации о количестве работающих ФУ, которые могут обнаруживаться по космическим снимкам среднего разрешения. В связи с этим целью данной работы является изложение методики оценки суммарных объемов сжигания ПНГ на основе информации о количестве ФУ, действующих на территории, с использованием космических снимков среднего пространственного разрешения Landsat 8.

### **Данные и методы**

В качестве данных о фактических объемах сжигаемого ПНГ была использована информация, заимствованная из отчетов департамента по недропользованию Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), размещаемых на официальном сайте [4].

Эта информация представляет собой ежеквартальные данные о суммарных объемах сжигаемого ПНГ на всей территории округа.

Для определения числа ФУ на нефтеперерабатывающих территориях по космическим снимкам Landsat 8 была разработана процедура дешифрирования ФУ, которая использует сигналы 4-го спектрального канала (с длиной волны 636–673 мкм), 5-го спектрального канала (851–879 мкм), 7-го спектрального канала (2107–2294 мкм) и 11-го спектрального канала (11500–12510 мкм). Указанная процедура реализована в составе программного комплекса «Автоматизированная система выделения термических точек на основе космических снимков Landsat 8», зарегистрированного в Роспатенте. С помощью этого комплекса по снимкам Landsat 8 за период с 2013 по 2015 год были определены все ФУ, действовавшие на территории ХМАО в указанный период, схема размещения которых представлена на рис. 1. На этой схеме ФУ отображаются кружками разного цвета, которые классифицированы по величине их яркости на снимке на малые (зеленый цвет), средние (желтый) и крупные (красный).



**Рис. 1. Схема расположения обнаруженных ФУ на территории ХМАО**

#### **Разработка модели оценки объема сжигания попутного газа**

Для иллюстрации взаимосвязи между объемами сжигаемого ПНГ и количеством ФУ на рис. 2 приведены графики временных ходов объема сожженного ПНГ и количества ФУ, определенного по космическим снимкам Landsat 8 на территории ХМАО за период с 2013 по 2015 год. На рис. 2 сплошная линия показывает количество факельных установок полученного по результатам обработки космических снимков в период со II квартала 2013 года по IV квартал 2015 года, а пунктирная линия – суммарные (за квартал) объемы сжигаемого ПНГ. Как видно из рисунка, динамика объемов сожженного ПНГ проявляет согласованную периодичность с изменением количества выявленных ФУ, отображающую наличие взаимосвязи между изменениями объемов сжигаемого газа и количества ФУ.

На рис. 3 представлен график зависимости объемов сожженного ПНГ от количества действующих ФУ. Исследование взаимосвязи между объемом сжигаемого газа и количеством действующих факельных установок проведено методом линейного

регрессионного анализа. С использованием средств MS Excel определено (с высоким уровнем коэффициента детерминации  $R^2 = 0,66$ ) уравнение линейной регрессии в виде:

$$y = 2,26x + 89,60, \quad (1)$$

где  $y$  и  $x$  обозначают объемы сожженного газа и количество действующих ФУ соответственно.

Полученное линейное уравнение (1) используется далее в качестве регрессионной модели для оценки объема сжигаемого ПНГ на территории нефтедобычи на основе данных о количестве действующих ФУ, определенном по космическим снимкам.

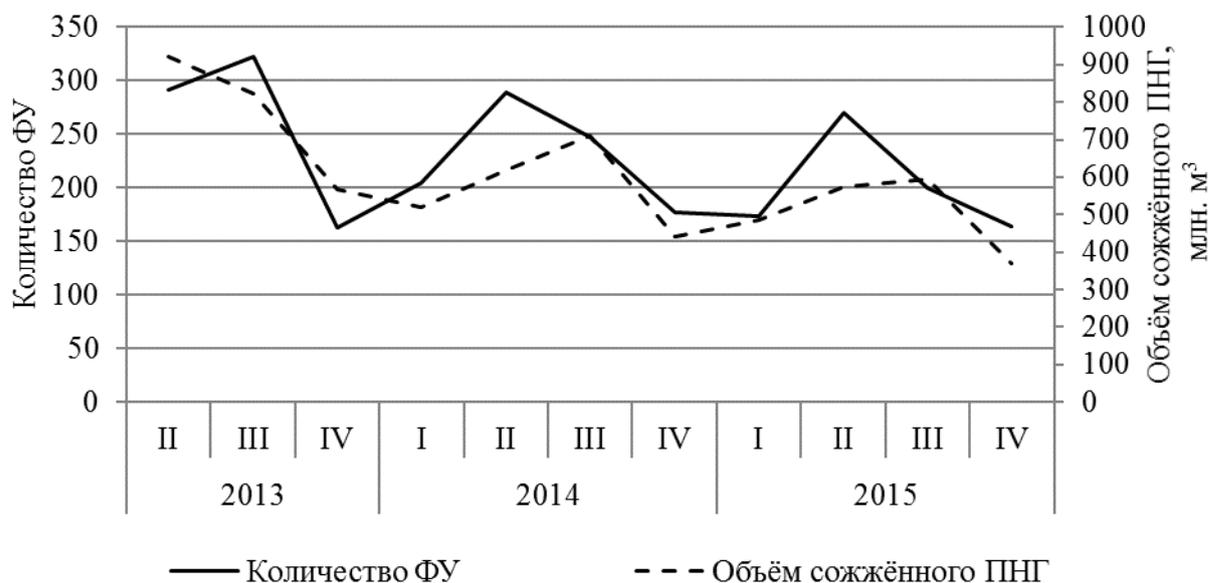


Рис. 2. Временные ходы объемов сжигаемого ПНГ и количества действующих ФУ

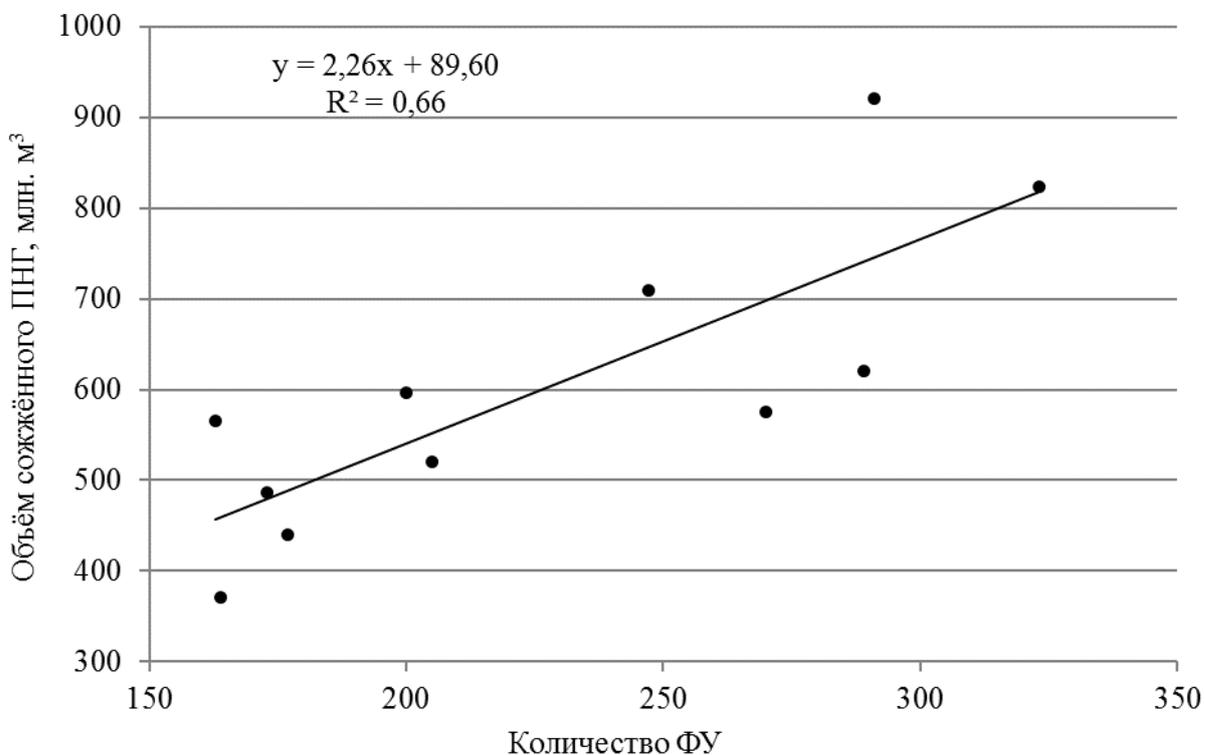


Рис. 3. Взаимосвязь между объемом сожженного ПНГ и количеством действующих ФУ, обнаруженных по космическим снимкам

Для проверки адекватности разработанной регрессионной модели оценки объемов сожженного ПНГ по данным о количестве обнаруженных ФУ проведено сопоставление результатов расчета объема сжигаемого газа по формуле (1) с данными официальной поквартальной статистики сжигания газа [4] на территории ХМАО за 2016 год. Показано, что относительная ошибка оценивания объемов сожженного газа в среднем за четыре квартала 2016 года составляет 55 %. Это позволяет считать, что предлагаемая в статье регрессионная модель оценки объемов сжигаемого на территории газа на основе данных о количестве факельных установок, определяемом по космическим снимкам, может быть использована с приемлемой для практических задач достоверностью для оперативного определения объемов сжигаемого ПНГ на нефтяных месторождениях в нефтедобывающих регионах.

### **Заключение**

В статье предложен новый подход к оценке объемов сжигаемого ПНГ на нефтедобывающей территории с использованием данных о количестве ФУ, определяемых по космическим снимкам среднего пространственного разрешения. Подход основан на использовании регрессионной модели. Путем анализа статистических данных о суммарном объеме ежеквартально сжигаемого газа на нефтедобывающей территории и данных о количестве ФУ найдено регрессионное уравнение, позволяющее получать указанные выше оценки. С использованием данных официальной статистики об объемах сжигаемого газа за четыре квартала 2016 года на примере территории ХМАО подтверждена возможность использования предлагаемого подхода, основанного на регрессионной модели оценки объемов сжигаемого газа по данным о числе действующих ФУ. Предлагаемая регрессионная модель может быть использована для оперативной оценки объемов факельного сжигания попутного газа и в других нефтедобывающих регионах.

### **Список литературы**

1. Полищук Ю. М., Токарева О. С. Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 647–651.
2. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data / C. D. Elvidge, M. Zhizhin, K. Baugh, F. C. Hsu, T. Ghosh // Energies. 2016. V. 9, № 14.
3. Метод определения расхода попутного газа на факелах по данным спутникового зондирования сенсорами типа MODIS в ИК-каналах / К. Г. Грибанов, В. И. Захаров, К. С. Алсынбаев, Я. С. Суляев // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 68–72.
4. Итоги деятельности отрасли. URL: <http://www.depnedra.admhmao.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-otrasli/>.

**Kh. B. Kuular**

FSBIS Tuvinian Institute for Exploration Natural Resources SB RAS, Kyzyl  
e-mail: k-k-188@list.ru

**CLIMATE CHANGE IN THE TYVA REPUBLIC, RUSSIA**

The paper discusses the observed seasonal and spatial changes of temperature and precipitation in the Tyva Republic. The Tyva Republic is a landlocked republic on the South side is bordered by Mongolia and it is located in the center of Asian continent. Results from a study on trend analysis show that the annual mean surface air temperature in the Tyva Republic has risen by 1.1°C, warming faster in winter and spring than in summer, during in the period 1961–2016.

*Key words: Temperature air, annual precipitation, climate change.*

**Introduction**

The global average annual surface air shows signs of recent climate warming: it has increased 0.6 °C within the last hundred years [IPCC, 1995]. Instrumental measurements of the air temperature and annual precipitation during the XX century in the South Siberia show that climate warming in the mountains especially in the winter at least 2–4 °C [Tchebakova, Parfenova, 2006].

The Tyva Republic has reason to be concerned about climate change, extending between the latitudes of 49°52' N and 53°43' N and the longitudes of 88°48'E and 99°01'E and covering 168, 604 square kilometers. The longest distance from west to east is 2,392 km, and from north to south 1,259 km. The altitude is 508–3,990 meter above sea level. Republic has reason to be concerned about climate change.

Observed climate parameters would certainly define the feedbacks sufficiently both to understand the key processes and to improve the focused research and measure progress. Therefore, our study aimed to analyze the observed seasonal and spatial changes in temperature, precipitation, and to make the results available for climate change studies.

**Data and methods**

In this study, climate data from 1961 to 2016 were obtained from Medical Information and Analytical Center of the Tyva Republic, State Forestry Committee of the Tuva Republic, Tyva Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring and VNIIGMI-WDC [Bulygina et al., <http://meteo.ru>]. The temperature and precipitation were computed to represent the inter-annual climate variations from 1961 to 2016. Linear regression has been used to analyze the trends of the observed monthly mean data of temperature, precipitation.

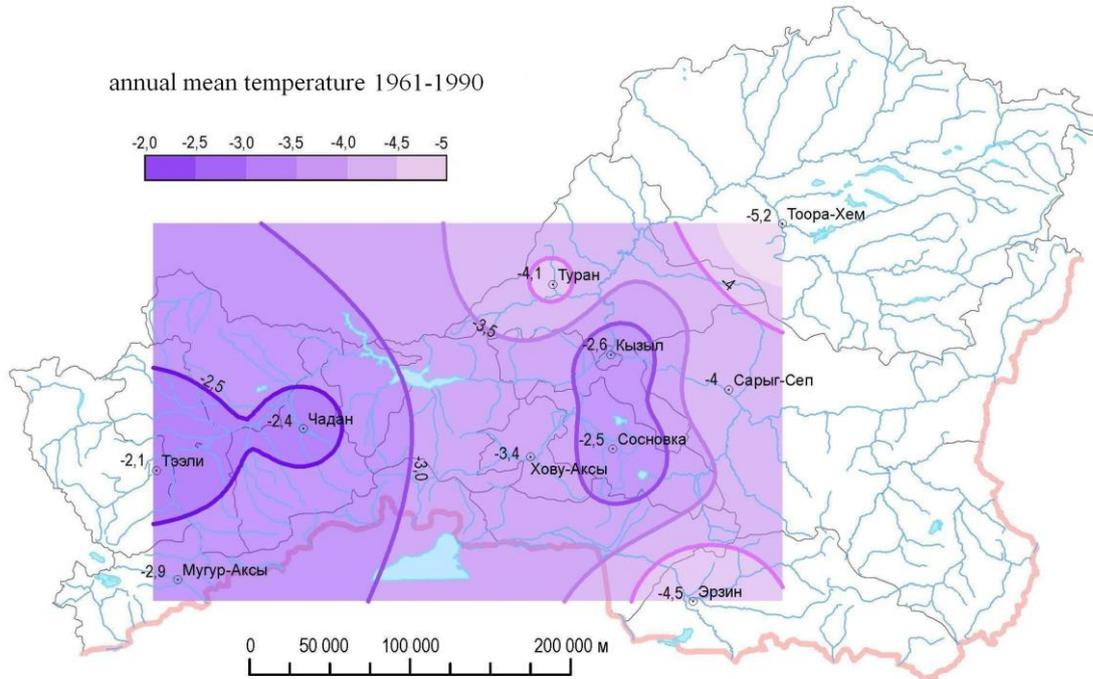
**Results and discusses**

Climate is characterized by long and cold winter months, dry and hot warm period in summer months, high temperature fluctuations, low precipitation (120–340 mm). Accordingly, there are not only four sharply distinct seasons, but also quite distinctive months within each of them. The annual average air temperature for republic is –3.4 °C [Kuular, 2015]. Figure 1 illustrates the spatial distribution of the annual temperatures in the republic from 1961 to 1990 period.

January is the coldest month, with average temperatures of –15 °C to –35 °C. The record low temperature of –54 °C was recorded at the Kyzyl city on 2 February, 1945. July is the

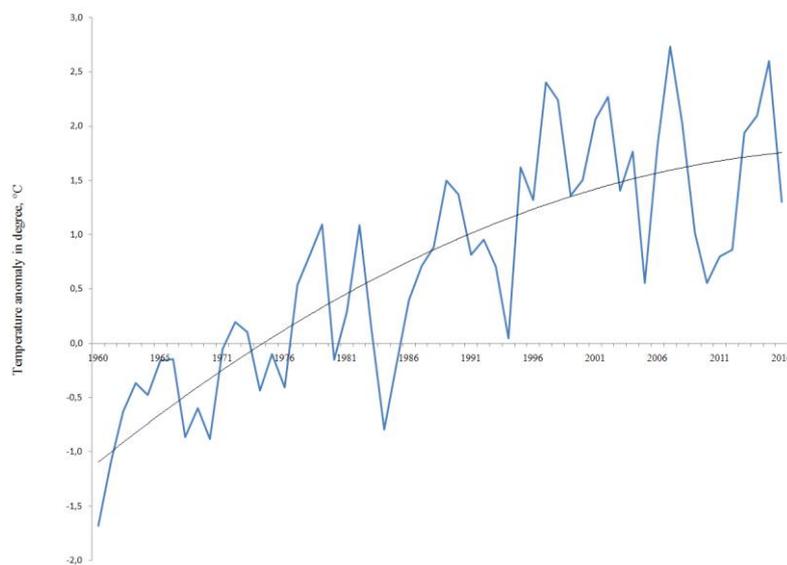
warmest month, with average temperatures of +15 °C to +18 °C. The record high temperature of +40.7 °C was recorded at the Kyzyl city on 15 July, 2004. The republic is semi-arid. Precipitation varies both in time and space. Annual mean precipitation is 300–340 mm in the forests mountainous districts; 220 mm in the steppe; 120 mm in the steppe-desert. About 80% of total precipitation falls from April to October, of which about 84 % falls in summer.

Figure 1 illustrates the plot of the Northern Hemisphere temperature anomaly, contrasted with the Tyva Republic where increased temperatures are clearly seen over the past 55 years.



**Fig. 1. Annual mean temperature**

The normalized anomalies of annual mean temperatures for republic are illustrated in Figure 2. According to this figure, there were 50 cases when air temperature anomaly was positive during 1975–2016. The years 2007, 2015, are also the warmest years ever measured instrumentally in the republic.



**Fig. 2. Temperature trend for the period 1961–2016**

The blue line is anomalies of air temperature, the black line is second order polynomial.

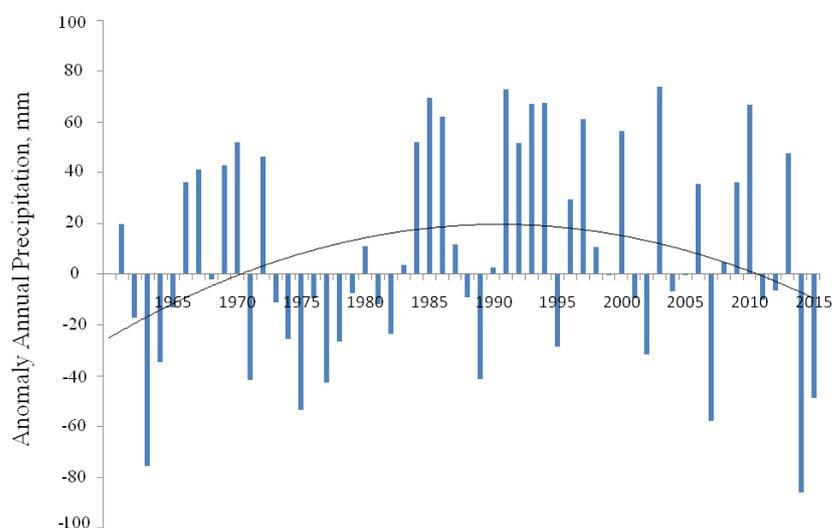
Obviously, temperature increases in space and time. The warming has been most pronounced in winter, with mean temperature February increase of +2.1°C, speed of warming 1,1°C/10 yrs. Spring and Autumn temperatures have risen 0.7-1.5°C. Summer air temperature have risen 0.6-1.3°C. Table 1 shows the trends of summer, winter autumn and spring temperatures.

**Table 1**

**Anomaly temperature of summer, winter autumn and spring temperatures (°C)**

Time Periods	Winter, °C	Spring, °C	Summer, °C	Autumn, °C
1975–2005	1,3±0,1	0,9±0	0,6±0,3	0,7±0,4
1985–2015	1,9±0,2	1,5±0,1	1,0±0,2	0,8±0,5
2000–2016	1,9±0,2	1,5±0,1	1,3±0,1	1,0±0,8

Precipitation for the 1961–2016 years shows a slight downward trend (Figure 3). Seasonally, cold (XI–III) and warm (IV–X) months precipitation has creased slightly from 1975 to 2005 years, cold (XI–III) month has decreased slightly from 2000–2016 years (Table 2). The changes in annual precipitation have a very localized character; i.e., decreasing at one site and increasing at another nearby. This is one of the specific traits of precipitation distribution in the arid and semi-arid areas. The magnitude of alteration changes in precipitation is 3.4–8.5 %, regardless of whether it's increasing or decreasing. Precipitation decreased (23 mm) at Erzin, located in the extreme southeastern part of the republic, and increased precipitation (13 mm) at Toora-Khem in the east.



**Fig. 3. Annual mean precipitation**

The blue columns are anomalies of mean precipitation, the black line is second order polynomial.

**Table 2**

**Trend of annual precipitation in percent**

Time Period	XI-III months, %	IV-X months, %
1975–2005	+5,7	+5,6
1985–2015	+5,2	+3,4
2000–2016	+4,8	-8,5

## Conclusion

Climate is getting warmer and slightly drier in the Tyva Republic. Increased annual temperatures, along with changed precipitation, are the likely causes of the spring and summer droughts. Statistical analysis of the rate of warming over different periods finds that warming from 2006 to 2016 is greater than the warming from both 1975 to 2005.

Troublingly, the regional climate has changed significantly during the past 55 years, with temperatures increasing more than twice the global average. This makes republic especially vulnerable to changes in the hydrological cycle and decreases in precipitation, which are already occurring.

## References

1. Opisaniye massiva dannykh srednemesyachnoy temperatury na stantsiyakh Rossii (Description of the dataset of mean monthly temperature at stations of Russia) / O. N. Bulygina, V. N. Razuvayev, L. T. Trofimenko, N. V. Shvets. URL: <http://meteo.ru>.
2. IPCC, 1996: Climate Change 1995: The Science of Climate Change / J. T. Houghton, L. G. Meria Filho, B. A. Callandar, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge. 572 p.
3. Kuular Kh. B. Monitoring potepleniya klimata v Respublike Tyva po dannym nablyudeniya. (Monitoring of climate warming in the Tyva Republic according to the observations) // Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. 2016. № 12. S. 153–157.
4. Kuular Kh. Peculiarities of climate in the Tyva Republic in the 20th and 21st centuries // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40, № 1. P. 34–38.
5. Tchebakova N. M., Parfenova E. I. Prognoz prodvizheniya granits lesa pri izmenenii k kontsu 20 veka v Sredney Sibiri. (Forecast promote forest boundaries if change the end of the 20th century in Central Siberia) // Vychislitelnyye tekhnologii. T. 11. Ch. 3. 2006. S. 77–87.

**О. В. Кушнырь**

Научный центр оперативного мониторинга Земли  
АО «Российские космические системы», Москва  
e-mail: kushnyr@ntsomz.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОССИЙСКИМИ ДАННЫМИ ДЗЗ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСНОМ КОДЕКСЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В связи с изменениями в Лесном кодексе, вступившими в силу в 2017 году, особое значение приобретает использование данных ДЗЗ для лесного хозяйства. В статье рассматривается ряд факторов нормативно-правового и технического характера, ограничивающих в настоящий момент применение материалов космической съемки для задач контроля лесного хозяйства.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, Лесной кодекс, отчет об использовании лесов, вырубки.

В настоящее время использование данных ДЗЗ прочно входит в практическую деятельность лесного хозяйства России.

Современные средства космической съемки позволяют получать оперативную и достоверную информацию о состоянии лесов и хозяйственной деятельности на любой территории РФ. Огромный ущерб лесам и экономике страны причиняется незаконными рубками леса. Контроль с использованием данных ДЗЗ позволяет выявить и определить вырубки, появившиеся за конкретный период, определить их площадь и координаты.

### **Нормативная база обеспечения данными ДЗЗ лесного хозяйства**

В настоящее время с учетом изменений, утвержденных ФЗ от 23.06.2016 № 218-ФЗ «Об установлении Порядка предоставления отчета об использовании лесов и его формы, требований к формату отчета об использовании лесов в электронной форме», разработка алгоритмов, основанных на использовании данных ДЗЗ, становится все более актуальной.

В соответствии с Федеральным законом РФ от 23.06.2016 № 218-ФЗ в Лесной кодекс внесены изменения, касающиеся использования материалов ДЗЗ в интересах контроля эксплуатации лесного фонда [1].

В новой редакции, вступившей в силу с 1.03.2017, положения статьи 49 «Отчет об использовании лесов» формулируются таким образом:

«3. Граждане, юридические лица, осуществляющие заготовку древесины ... прилагают к отчету об использовании лесов материалы дистанционного зондирования (в том числе аэрокосмической съемки, аэрофотосъемки), фото- и видеофиксации.

4. Перечень информации, включаемой в отчет об использовании лесов, ... устанавливается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти».

На настоящий момент порядок представления отчета об использовании лесов и его формы, требований к формату отчета об использовании лесов в электронной форме определяется действующим приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 25.12.2014 № 573 [2]. В соответствии с приказом:

– Отчет об использовании лесов представляется гражданами, осуществляющими использование лесов, в органы государственной власти, органы местного самоуправления в пределах их полномочий. ...

– Отчет представляется ежемесячно, не позднее десятого числа месяца, следующего за отчетным... В случаях, если при использовании лесов не осуществлялись рубки лесных насаждений, отчет представляется ежегодно, не позднее десятого января года, следующего за отчетным.

Существующая редакция приказа Минприроды РФ также устанавливает форму отчета об использовании лесов, в котором приводится информация о фактических объемах осуществляемого использования лесов. В частности, указывается площадь предоставленного в пользование лесного участка, с точностью до четырех знаков после запятой, в гектарах.

Таким образом, действующее законодательство обязывает лиц, имеющих право на использование лесов с осуществлением рубки лесных насаждений, ежемесячно прилагать к отчету материалы дистанционного зондирования, фото- и видеофиксации, при этом не определяя цель использования, требования к материалам, форму их предоставления и реалистичные сроки предоставления.

С целью установления требований к прилагаемым материалам дистанционного зондирования, фото- и видеофиксации разработан проект приказа Минприроды России «О внесении изменений в приказ Минприроды от 25.12.2014 № 573...» (подготовлен 10.11.2016) [3]. В проекте предлагаются следующие требования к материалам ДЗЗ:

– оптические или радарные космические снимки/аэрофотоснимки/аэроснимки с БПЛА,

- пространственное разрешение не хуже 15 м,
- съемка в бесснежный период и светлое время суток;

а также к форме их предоставления:

- отображение границ кварталов,
- отображение фактических границ лесосеки,
- определение площади лесосеки.

Предлагаемый проект приказа с данными формулировками несет в себе несколько принципиальных противоречий, ограничивающих применение любых материалов ДЗЗ.

1. Периодичность предоставления отчета. В соответствии с действующим приказом Минприроды РФ арендатор обязан ежемесячно предоставлять отчет об использовании лесов. В предлагаемом проекте отмечена необходимость съемки в бесснежный период и светлое время суток. Учитывая климатические и территориальные особенности территории России, для большей части страны этот период ограничивается 3–4 месяцами, а для некоторых регионов продолжительность бесснежного периода сводится к нулю. Таким образом, исполнение законодательства в части предоставления материалов ДЗЗ не может быть выполнено ввиду объективных климатических причин. Помимо этого, необходимо отметить нецелесообразность установления требования съемки в бесснежный период ввиду того, что наличие снежного покрова не влияет на факт определения вырубki леса, а, как показывает опыт контроля лесохозяйственной деятельности, большая часть лесных вырубok приходится на зимний период.

2. Пространственное разрешение материалов ДЗЗ. В проекте приказа Минприроды указано требование к пространственному разрешению материалов ДЗЗ не хуже 15 м. Таким образом, при использовании данных с максимально допустимым разрешением точность определения площади детектируемой вырубki будет составлять около 0,1–0,2 га. Помимо этого, в форме отчета, определенной действующей редакцией приказа Минприроды, площадь лесосеки, выделенной арендатору, должна указываться в гектарах с точностью до четырех знаков после запятой, то есть с точностью не хуже 1 кв.м. Требуемая точность может быть обеспечена только при использовании данных ДЗЗ с пространственным разрешением лучше 1 м.

Таким образом, существующие противоречия действующего законодательства ограничивают применение материалов ДЗЗ в интересах обеспечения контроля использования лесных угодий.

### Технические возможности по обеспечению российскими данными ДЗЗ лесного хозяйства

Факторы, влияющие на степень реализуемости заявок потребителей на получение информации ДЗЗ, можно разделить на три основные группы:

- метеорологические;
- технические;
- организационные.

Первая группа факторов – это метеорологические условия в районе наблюдения (облачность, прозрачность атмосферы).

Ко второй, технической, группе факторов можно отнести:

– ограничения на эксплуатацию космического аппарата, включая его баллистические и динамические возможности, техническое состояние бортовых систем и ограничения по их работе;

- ограничения, связанные с недостаточной пропускной способностью радиолинии;
- ограничения, связанные с количеством и конфигурацией пунктов приема информации.

К третьей, организационной, группе факторов относятся:

- приоритетность съемки;
- организация приема информации комплексов приема и обработки информации;
- время обработки заявки (от ее получения до закладки на борт рабочей программы включения целевой аппаратуры).

В настоящий момент российская орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ состоит из 8 аппаратов, отличающихся техническими характеристиками (пространственным разрешением, полосой захвата, периодичностью повторения трассы полета). Учитывая технические особенности космических аппаратов, использование комплексного подхода по информационному обеспечению данными планового и оперативного наблюдения позволяет повысить объективность и качество полученных результатов использования данных ДЗЗ (рисунок).

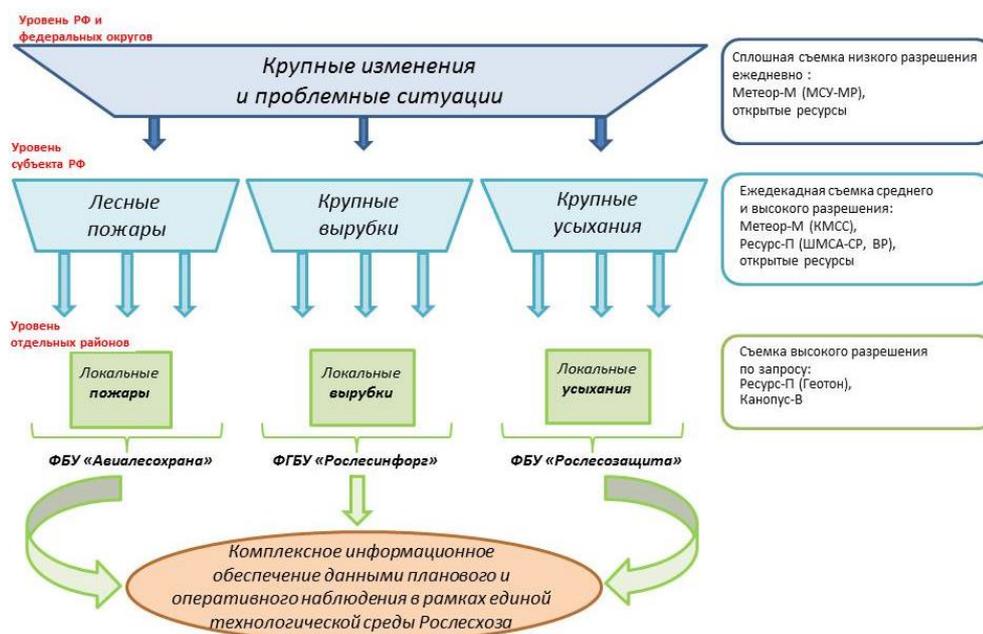


Рисунок. Модель информационного обеспечения для задач лесного хозяйства

## **Заключение**

Проведенный анализ существующего законодательства в сфере лесных отношений показал существенные ограничения на полноценное использование материалов ДЗЗ, в том числе получаемых с российских КА, для предоставления отчетности об использовании лесов.

Большие площади территорий с постоянной облачностью и отсутствием солнечного освещения ограничивают применение материалов съемки оптико-электронной аппаратурой. Ввиду этого полноценное решение задачи обеспечения контроля лесного хозяйства возможно только при комплексном использовании данных ДЗЗ с оптическим и радиолокационным диапазоне.

## **Список литературы**

1. О внесении изменений в лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования регулирования лесных отношений: федер. закон от 23.06.2016 № 218-ФЗ. URL: <https://duma.consultant.ru/documents/3711002>.

2. Об установлении порядка представления отчета об использовании лесов и его формы, требований к формату отчета об использовании лесов в электронной форме: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 25.12.2014 № 573. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70905774/#ixzz4iZZ7JoA2>.

3. О внесении изменений в приказ Минприроды России от 25.12.2014 № 573 «Об установлении порядка представления отчета об использовании лесов и его формы, требований к формату отчета об использовании лесов в электронной форме»: проект приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 10.11.2016. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56591660/>.

**В. Г. Маргарян**

Ереванский государственный университет, Ереван  
e-mail: vmargaryan@ysu.am

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТУМАНОВ  
КАК ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИИ**

**V. G. Margaryan**

Yerevan State University  
e-mail: vmargaryan@ysu.am

**ANALYSIS AND ESTIMATION OF THE REGULARITIES  
OF TEMPORAL DYNAMICS CHANGES OF FOG AS DANGEROUS  
METEOROLOGICAL PHENOMENA ON THE TERRITORY  
OF THE REPUBLIC OF ARMENIA**

В работе исследованы и обсуждены особенности образования сильных туманов на территории Республики Армения, изменение во времени их динамики за последние 10 лет. Сильные туманы, наблюдаемые в республике, относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям, и их исследования имеют большое значение для стабильного развития экономики.

Исследования показывают, что на территории республики наблюдается рост повторяемости сильных туманов.

*Ключевые слова:* туман, опасные метеорологические явления, динамика изменения, Республика Армения.

**Введение**

Территория РА выделяется разнообразием природно-климатических условий и периодически подвергается воздействию природных стихийных явлений. Преобладающая их часть – опасные гидрометеорологические явления (засуха, град, наводнение, заморозки, сильный ветер, тепловые волны и др.), которые наносят большой ущерб экономике республики. Одним из них является сильный туман (с горизонтальной видимостью до 50 м). Заблаговременный прогноз этих метеорологических явлений, оповещение, эффективное осуществление соответствующих предупредительных мероприятий будут содействовать развитию различных сфер экономики, снижению вредного прямого и косвенного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Следовательно, для того чтобы оценить уязвимость территории республики от опасных гидрометеорологических явлений и понизить вызванные их последствиями риски, весьма необходимо знание закономерностей их временного изменения.

Принимая во внимание вышесказанное, целью работы поставлено исследовать и оценить закономерности временных изменений туманов в Республике Армения, оценить их относительно уязвимости на территории республики. Для решения поставленных задач теоретической и информационной основой явились соответствующие исследования, отчеты, программы перспективного развития, проекты, законодательные и нормативные акты РА, правительственные решения, данные и материалы, содержащиеся в интернете. Исходными материалами для работы

послужили фактические результаты наблюдений «Службы по гидрометеорологии и активному воздействию на атмосферные явления» МЧС Республики Армения и данные Национальной статистической службы РА.

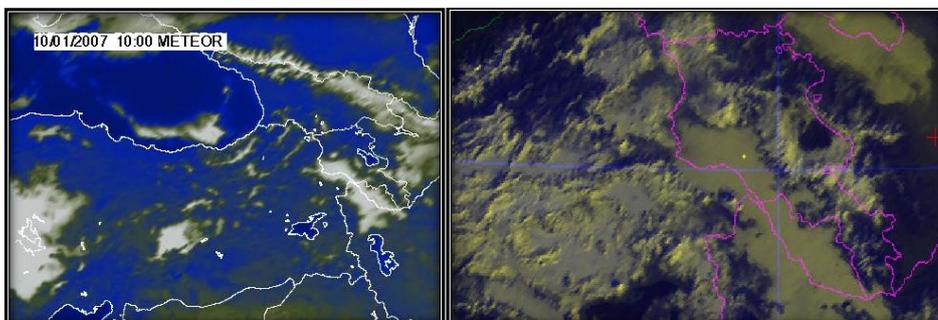
### **Материалы и методы исследования**

Туманом называется скопление в воздухе капелек воды и частичек кристалликов, которые снижают видимость до 1 км и менее [2]. По горизонтальной видимости различают слабые (500–1000 м), умеренные (50–500 м) и сильные туманы (до 50 м), по способу возникновения – туманы охлаждения (адвективные, радиационные, адвективно-радиационные) и туманы испарения. Различаются также внутримассовые и фронтальные туманы.

Туманы фронтального происхождения являются наиболее сильными, прочными, плотными. 8–10 января 1953 года почти во всех регионах страны (по наблюдениям 93 % метеорологических станций) был зарегистрирован фронтальный туман продолжительностью от 1 часа (Степанакерт) до 10 дней (Гехадзор, Арагац в/г). Этот туман распространился даже на восточные, юго-восточные и южные части бассейна озера Севан, где обычно процессы туманообразования развиты очень слабо [3].

Туман испарения образуется во время холодных зим. Так, во время такой зимы 1932–1933 годов в долине реки Раздан сформировался густой туман. Туман испарения образуется также во время снеготаяния, в том числе во время дождя.

Для краткосрочных прогнозов погоды, в частности, опасных метеорологических явлений, большое значение имеют спутниковые снимки (рис. 1), которые дают представление о возникновении и развитии зон облачности и их передвижении. До 2010 года эксплуатируемая в гидрометслужбе система «Геспавиа» обеспечивала получение спутниковых снимков дважды в сутки, когда спутник бывал в зените нашего региона. В октябре 2010 года в рамках проекта «DAWBEE (Data Access for Western Balkan and Eastern European Countries)» в гидромете внедрена система для приема информации со спутников, эксплуатируемых организацией EUMETSAT. Использование системы позволило значительно повысить оправдываемость прогнозов опасных явлений.



**Рис. 1. Туман на спутниковой фотографии [5]**

На фотографии со спутника хорошо видны районы, охваченные туманом (рис. 1).

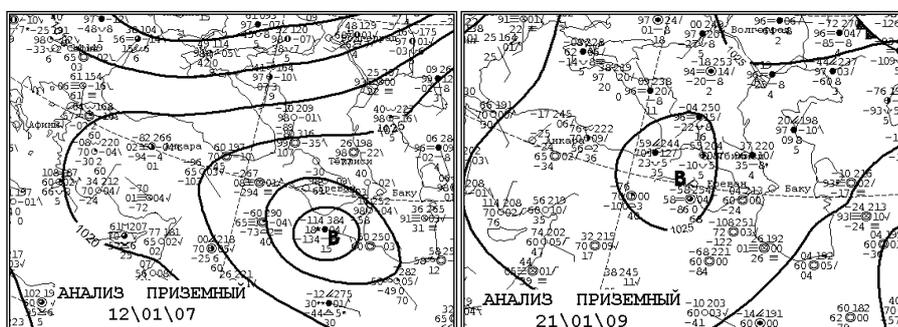
Отметим, что прогноз опасных гидрометеорологических явлений, предупреждение государственных органов власти, населения является важнейшей задачей гидрометслужбы.

### **Результаты и обсуждение**

Исследования свидетельствуют о том, что на территории республики очевидно преобладание частоты наблюдаемых в декабре-феврале месяцах опасных метеорологических явлений, таких как адвективно-радиационные туманы, что обусловлено синоптической обстановкой и разнообразием рельефа. Когда над территорией республики проходит холодный атмосферный фронт, то образуется локальный антициклон, в котором

интенсивные нисходящие токи, наблюдаемые при ясной погоде, благоприятствуют созданию в межгорных котловинах мощного инверсионного слоя, а также образованию туманов. Эти туманы отличаются большой продолжительностью и малыми значениями горизонтальной видимости. Образовавшийся антициклон становится воздушной преградой, которая становится препятствием для всех видов потоков теплого воздуха и притока осадкообразующих воздушных масс, поступающих в Армению. Для разрушения аналогичных туманов необходима циклональная погода, усиление ветра, когда развиваются вертикальные движения воздуха, турбулентность и наблюдается разрушение инверсионного слоя и, следовательно, антициклона.

Локальный антициклон (рис. 2), главным образом, бывает стационарным или медленно перемещается и может сохраняться до 15-20 дней. Он разрушается, когда с юго-запада на Кавказ наблюдаются мощные циклонические вторжения [4]. Локальные антициклоны на территории Армении в среднем наблюдаются 19 раз в году, максимум наблюдался в 1982 году, а в 1956 и 1962 годах вообще не наблюдались. В мае – октябре территория РА не подвергается воздействию локальных антициклонов [5].



**Рис. 2. Антициклоны в районе Армянского нагорья на приземной карте погоды [5]**

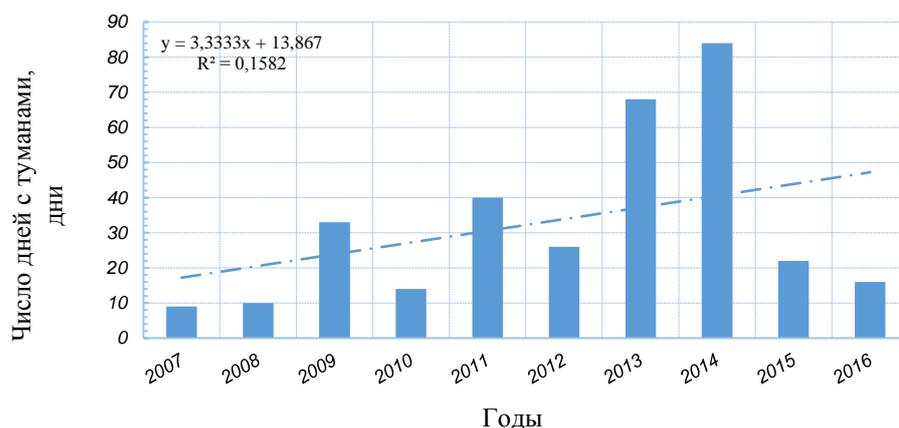
Исследования показывают, что в котловинах РА образование туманов происходит через 3–4 дня после формирования антициклона. Во время существования туманов в котловинах РА существенно повышаются минимальные ночные температуры воздуха, и в дневные часы – понижаются, что приводит к значительному уменьшению суточной амплитуды колебаний температуры воздуха [5].

В городе Ереване и на Араратской равнине в результате температурной инверсии 2013 года на протяжении всего декабря месяца отмечался туман, когда разница дневных и ночных температур составила всего 0 °С. Температура воздуха в декабре 2013 года также отличалась низкими значениями. После 2002 декабрь 2013 года был самым холодным месяцем. Отметим, что в городе Ереван абсолютная минимальная температура в 2013 году составила –17,7 °С, а средние месячные температуры, соответственно, –7,2 и –5,8 °С.

Продолжительные сильные туманы на территории республики отмечались в 1932, 1953, 1964, 1972, 2013 и 2017 годах.

Опасность туманов в республике заключается в том, что наблюдаемая температурная инверсия, препятствуя вертикальным движениям воздуха и турбулентному развитию, не позволяет удалять атмосферные вредные выбросы. Они, аккумулируясь в приземном слое, отравляют воздух, особенно в городах. С другой стороны, выбросы являются ядрами конденсации. Туманы ухудшают условия работы авиации, а возникающие при этом иней и изморозь наносят большой ущерб работе линий электропередач и связи, становятся причиной многочисленных автоаварий. Туманы влияют также на самочувствие и здоровье человека.

Исследования показывают, что на протяжении последних лет (2007–2016) на территории республики наблюдается рост числа дней сильных туманов (рис. 3). Наибольшее число дней с сильными туманами наблюдалось в 2013 и 2014 годах.



**Рис. 3. Изменение динамики сильных туманов на территории Армении в 2007–2016 гг.**

Число дней с туманами распределяется внутри года крайне неравномерно, от двух (в восточных районах бассейна озера Севан) до 200 дней (Сисианский перевал). Обычно с повышением высоты местности отмечается рост повторяемости туманов. Туманы редко наблюдаются в районах (например, восточные, юго-восточные и южные районы бассейна озера Севан), где часто дуют теплые и сухие фёны, много туманов отмечается на перевалах, открытых влажным воздушным потокам территориях, в межгорных котловинах.

#### **Заключения и предложения**

Исследования привели к следующим выводам и предложениям:

- ✓ на территории республики в декабре-феврале среди наиболее часто наблюдаемых опасных гидрометеорологических явлений выделяются туманы;
- ✓ наиболее уязвимы в отношении сильных туманов районы межгорных котловин, горных перевалов и те, которые открыты воздействию влажных воздушных масс;
- ✓ на исследуемой территории на протяжении последнего десятилетия наблюдается значительный рост повторяемости туманов.

Необходимо:

- ✓ на имеющейся сети осуществить более полные и тщательные исследования опасных метеорологических явлений, охватывающих все ОЯ;
- ✓ разработать методики прогнозирования метеорологических опасных явлений и принятия быстрых мер реагирования;
- ✓ создать и развить систему мониторинга и прогнозирования метеорологических ОЯ;
- ✓ осуществить комплекс первоочередных и долгосрочных мер по профилактике, снижению рисков ОЯ и ликвидации их последствий.

#### **Список литературы**

1. Вагаршакян А. П. О температурных инверсиях в нижней тропосфере над Ереваном // Труды ЗакНИГМИ. Вып. 57(63). Л., 1974. С. 143–148.
2. Варданян Т. Г., Маргарян В. Г. Метеорология и климатология: учеб. пособие для вузов. Ер.: Изд-во «Астхик Гратун», 2014. 532 с. (На армянском яз.)
3. Нерсесян А. Г. Климат Армении. Ереван, 1964. 304 с. (На армянском яз.)
4. Суренян Г. Г., Хоецян А. В. Аэросиноптические условия образования и возможность прогноза инверсионных туманов на Ширакской и Араратской равнинах // Образование и наука в Арцахе. 2008. 1–2. Научно-методический и научно-популярный журнал для учащихся и учителей. С. 71–74. (На армянском яз.)
5. Суренян Г. Г. Синоптический анализ барических полей, формирующих погодноклиматические условия Республики Армения: дис. ... канд. геогр. наук. Ер., 2010. 145 с. (На армянском яз.)

**А. К. Матузко**

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск  
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Развитие передовых космических технологий позволяет осуществлять сбор множества разнообразных данных более эффективно и с меньшими затратами, чем организация соответствующей наземной сети постов наблюдения. Одним из наиболее важных показателей о поверхности земли является температура земной поверхности. В статье рассмотрены возможности определения температуры поверхности воды по данным спутника дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Landsat 8.

*Ключевые слова: температура поверхности, Landsat 8, температурная карта, спутниковые данные, данные дистанционного зондирования, ДЗЗ.*

### **Введение**

Для изучения климатических особенностей и гидрологического режима существует два типа методов исследования: контактные и бесконтактные. К контактными методам относятся традиционные способы получения данных при непосредственном проведении измерений человеком. Однако из-за тяжелых условий для сбора данных контактными методами на сегодняшний день для сбора данных в основном используются неконтактные методы исследования. Для измерения температуры водной поверхности из космоса применяют инфракрасные радиометры, работающие на метеорологических и океанологических спутниках, по данным которых регулярно создаются глобальные и региональные карты температур водной поверхности [1]. Рассмотрим метод оценки температуры водной поверхности с использованием спутниковых данных Landsat 8 в сравнении с данными, полученными на гидропосту в городе Дивногорска Красноярского края.

### **Методы и материалы**

Развитие тепловых процессов в водотоках обусловлено сочетанием климатических особенностей района, расположения водотока, водности реки, гидравлических свойств и морфологических характеристик русла. Водная масса рек и каналов сравнительно быстро реагирует на изменение метеорологических условий, но вследствие тепловой инерции ее температурный ход более сглажен, чем температуры воздуха. Весной температура воды в реке обычно ниже на 2–3 °С температуры воздуха, а осенью выше на 5–10 °С. Изменения в термическом режиме реки в результате гидротехнического строительства по сравнению с естественными условиями влияют на работу не только самого гидроузла, но и сооружений водохозяйственного назначения (водозаборов питьевого и промышленного назначения и т. д.), водного транспорта, расположенных в зоне термического влияния ГЭС, а также на качество воды и климат региона [2].

Для нижних бьефов гидроэлектростанций независимо от периода годового цикла происходят характерные изменения температуры воды по длине бьефа. В безледоставный период она изменяется от температуры воды, поступающей в нижний бьеф из верхнего (водохранилища), до установившейся температуры, соответствующей

теплообмену потока с атмосферой. В зимний период по длине нижнего бьефа вода охлаждается до 0 °С. Вследствие того, что вода в водохранилище осенью обладает большим запасом тепла, осеннее охлаждение воды в нижнем бьефе отстает по сравнению с естественными условиями на 10–15 дней. В весенне-летний период вода в нижних бьефах холоднее, чем в естественных условиях из-за более медленного прогревания водных масс водохранилищ. Так, температура воды Енисея ниже плотины Красноярской ГЭС в летний период стала на 8–10 °С ниже, чем до зарегулирования реки, и, наоборот, повысилась на 4–5 °С в осенние месяцы, что создало определенные трудности при освоении прилегающей территории. Причем Красноярское водохранилище вследствие его глубоководности оказывает в 4–5 раз большее влияние на термический режим нижнего бьефа, чем, например, мелководное Новосибирское [3].

На температуру воды в нижнем бьефе ГЭС также большое влияние оказывает проточность водохранилища и схема забора воды к турбинам ГЭС. Чем больше проточность, тем ниже температура воды, поступающей в нижний бьеф. Забор воды к гидроагрегатам, в первую очередь высоконапорных ГЭС, из глубоких слоев стратифицированного водохранилища (например, Красноярского, Братского или Колымского), температура в которых в течение года изменяется в незначительных пределах (3–8 °С) и отличается от температуры воды в поверхностных слоях водохранилища в летний и зимний периоды и от температуры воды в реке в бытовых условиях, также обуславливает изменение температурного режима реки за гидроузлом. Если же производить забор воды к турбинам ГЭС посредством специальных конструкций (селективный водозабор) из поверхностных слоев водохранилища, то при определенных условиях температурный режим за гидроузлом приближен к режиму, существовавшему в реке до возведения гидроузла [2].

Измерение температуры поверхности реки невозможно на всей ее протяженности, так как для этого требуется установка достаточно большого количества гидропостов, но в связи с экономическими затратами они устанавливаются достаточно редко и такие данные являются недостаточными для фундаментальных исследований. Измерение температуры поверхности при помощи спутниковых данных может значительно увеличить площадь измерений. Использование спутниковых данных Landsat 8 позволяет получить данные согласно его разрешению на тепловые каналы около 100 м. Каналы 10-й и 11-й спутника Landsat 8 работают в дальнем инфракрасном диапазоне. Вместо измерения температуры воздуха, как это делают погодные станции, они измеряют температуру поверхности. На основе значений этих каналов вычисляем значение температуры поверхности земли, используя формулу [4]

где  $T_B$  – температура спектральной яркости излучения (К);  $\lambda$  – длина волны света;  $c_2 = h \cdot c / k = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ м К} = 14388 \text{ м К}$ ;  $e$  – коэффициент эмиссии.

Для вычисления температуры поверхности использовано программное обеспечение: QGIS 2.18.1 с плагином Semi-Automatic Classification Plugin (SACP) [5]. Дополнительный плагин устанавливается посредством официального репозитория QGIS через панель управление и пункт меню Модули/Управление модулями. После подготовки программного обеспечения, необходимо загрузить растровые слои Landsat 8 OLI по каналам, представленным в таблице.

## Результаты

Так как целью нашей работы является только изучение воды, то участки суши будут вырезаны с изображения, следовательно, классификация изображения не

проводится. Для всех пикселей изображения для вычисления температуры поверхности воды, будет применяться коэффициент эмиссии, равный 0,98 [6].

Для вычисления  $T$ , необходимо использовать 10-й канал, поскольку после 6 января 2014 года компания USGS рекомендовала не применять данные полосы 11-го канала из-за большой неопределенности калибровки. Вычисленное по формуле значение  $T$  необходимо преобразовать в градусы Цельсия путем добавления абсолютного нуля ( $-273,15$  °C) (рис. 1).

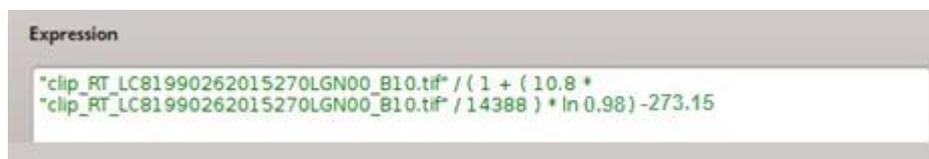


Рис. 1. Вычисление значений температур

На основе полученных значений температур составляем температурную карту водной поверхности р. Енисей (рис. 2).

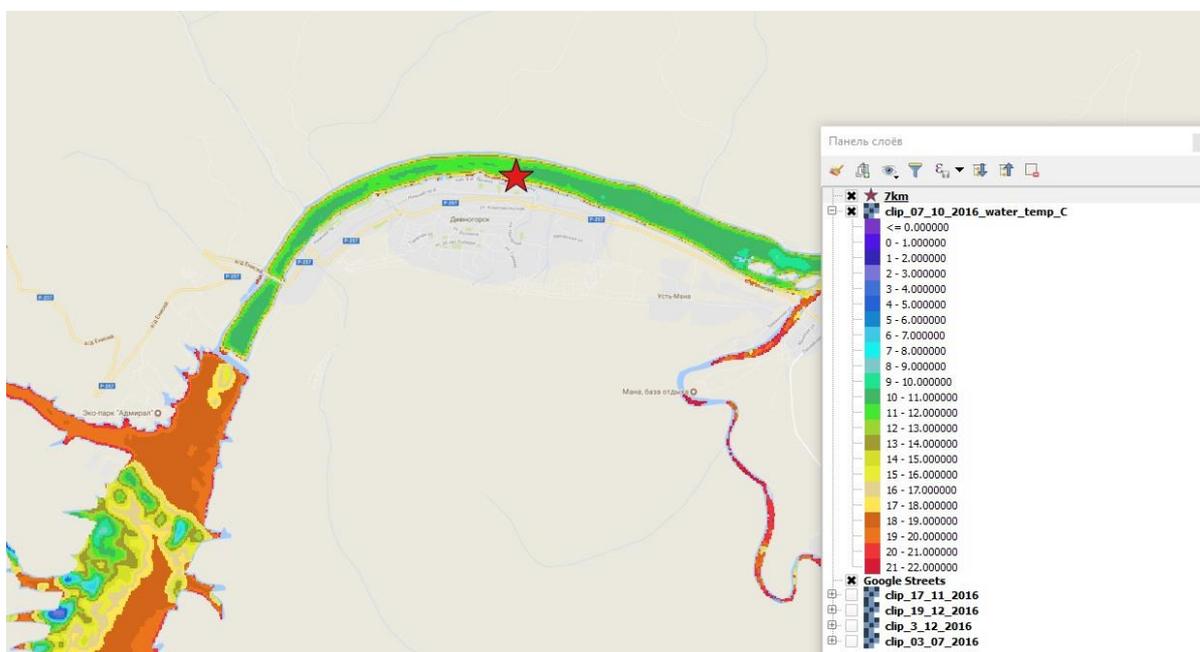


Рис. 2. Температура поверхности р. Енисей, дата съемки 07 октября 2016

Температура воды р. Енисей (дата съемки 07 октября 2017 года), согласно легенде изменяется от 17–20 °C в верхнем бьефе и держится около 11 °C в нижнем бьефе.

Сравним данные, полученные в температурной карте, и данные от наземных измерительных лабораторий. На рис. 2 красным символом звезды обозначено место забора воды и измерения температуры на гидропосту в г. Дивногорске. Значения с температурной карты взяты в том же месте, где расположен гидропост г. Дивногорска. Показания температуры воды снимают утром и вечером, поэтому для сравнения берется среднесуточное значение. Для наглядного сравнения возьмем результаты исследований за пять различных дат, соответствующих снимкам с достаточно низкой для исследования облачностью. Результаты представлены в таблице.

Несмотря на различие значений в сводной таблице, необходимо учитывать, что наземные данные получали в другое время суток. Это может давать отклонение от реальных показателей. При плюсовой температуре воздуха значения показателей расходятся меньше всего. А самая большая разница наблюдается в день с самой холодной температурой  $-22^{\circ}\text{C}$ .

Таблица

**Сводная таблица сравнения результатов полученных данных с фактическими данными от гидропостов**

Дата съемки	Температура воздуха (наземные вычисления), $^{\circ}\text{C}$	Среднесуточная температура р. Енисей в районе г. Дивногорска, $^{\circ}\text{C}$	Температура поверхности воды, вычисленная по данным спутниковой съемки, $^{\circ}\text{C}$	Разница между наземными измерениями и вычисленными значениями
03.07.2016	20	7,3	10	2,7
07.10.2016	5	8,25	11	2,75
17.11.2016	$-22$	5,6	$-1$	$-6,6$
03.12.2016	$-15$	4,2	1	$-3,2$
19.12.2016	$-11$	2,6	$-3$	$-5,6$

### Заключение

Изучение температуры поверхности р. Енисей в нижнем бьефе возле г. Дивногорска Красноярского края, является очень важной и современной задачей. Наблюдений только в одной точке на гидропосту не достаточно, поэтому определение температуры реки на всем ее протяжении является важной задачей, что осуществимо с применением данных ДЗЗ. Различие между показаниями температуры на гидропосту и вычисленными значениями по ДДЗ Landsat 8 имеют закономерность и зависят от температуры окружающей среды.

### Список литературы

1. Land Surface Air Temperature Retrieval from EOS-MODIS Images / R. Niclos, J. A. Valiente, M. J. Barbera, V. Caselles // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.
2. Козлов Д. В. Основы гидрофизики: учеб. пособие. М.: МГУП, 2004. 238 с.
3. Малик Л. К. Проблемы и перспективы создания малых ГЭС на малых реках // Малая энергетика. 2004. № 1. С. 37–48.
4. Weng, Q.; Lu, D. & Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc., Box 882 New York NY 10159 USA, 89, 467–483.
5. Luca Congedo Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. 2017. 278 с.
6. Лурье И. К., Косиков А. Г. Теория и практика цифровой обработки изображений. М.: Научный мир, 2003. 166 с.

**В. А. Миронов<sup>(1)</sup>, А. А. Карюкина<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>СФУ, Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий СО РАН – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

<sup>(2)</sup>НП «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов», Красноярск; e-mail: vasya-kun@mail.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ГЕОМОНИТОРИНГА**

Выполнены работы по сейсмическому микрорайонированию методами преломленных волн и вертикальным сейсмическим профилированием технически сложной геологической среды. Проведена обработка и анализ данных геомониторинга. По *P*-волнам выделены два скоростных слоя, а по *S*-волнам – шесть скоростных слоев на исследуемой территории. Получены характеристики для построения цельного скоростного разреза.

*Ключевые слова:* землетрясение, сейсмическое микрорайонирование, метод преломленных волн, вертикальное сейсмическое профилирование.

Важной геофизической задачей геомониторинга является изучение сейсмических воздействий (землетрясений) на земную поверхность. В США и Японии достаточно детально изучена геологическая среда с точки зрения сейсмичности: существует сеть сейсмостанций, созданы единые базы данных землетрясений. К сожалению, на сегодняшний момент в России исследования проводятся только в некоторых районах на не связанных друг с другом геофизических полигонах. Возникает задача сейсмического микрорайонирования, когда определяется оценка сейсмической опасности и уточняются параметры влияния возможных землетрясений на строительные площадки и территории, застроенные зданиями (сооружениями).

В данной работе определяются скорости распространения продольных *P*- и поперечных *S*-волн в геологической среде строительной площадки и скоростные характеристики подстилающих грунтов. Специфическими условиями исследуемой территории являются ее исходная заболоченность и обводненность, а затем последующее ее покрытие насыпным грунтом до 5–7 метров. Таким образом, изучаемый объект на сейсмическое воздействие – технически сложная геологическая среда. Особенность условий данной среды и обусловила выбор методов исследования.

Анализ данных осуществлялся по результатам полевых работ на местности, полученных с помощью методов преломленных волн (МПВ) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП). МПВ используется при определении глубины залегания коренных пород (мощности зоны выветривания) и их «сохранности» – прочности. Полевые исследования методом преломленных волн выполнены на основе методики, которая включает использование двух цифровых 24-канальных сейсмостанций «Лакколит 24-МЗ», двух 24-канальных сейсмозондов и 48 сейсмодатчиков типа СГ-20 и СВ-20. Регистрация данных проводилась по 4-х точечной схеме наблюдения [1]. Два пункта возбуждения находились на границах 94-метрового сейсмопрофиля, а два – на расстоянии 46 метров от них. Шаг регистрации

соответствует расстоянию, равному 2 м между, сейсмодатчиками. Данная схема наблюдения позволила выполнить 48-канальную запись сейсмограмм.

Метод ВСП применяется для околосокважинных и межскважинных исследований при решении комплекса задач сейсморазведки [2]. При выполнении работ по вертикальному сейсмическому профилированию источники упругих колебаний располагались на земной поверхности от устья скважины на расстояниях  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  м. Наблюдения проводились с использованием двух прижимных 8-точечных трехкомпонентных сейсмозондов. Приемники располагались в скважине на расстоянии от 5 до 53 м с шагом регистрации 1 м. Ввиду технических особенностей сейсмозондов в наблюдениях имеются пропуски, что учитывалось при анализе данных.

Во время комплексной обработки результатов, полученных с помощью двух методов, составлен цельный скоростной разрез от земной поверхности до исследуемой глубины. Годографы *P*- и *S*-волн (I, III) и скоростные разрезы (II, IV) показаны на рис. 1, а и рис. 1, б. Годографы (I, III) построены в координатах расстояние вдоль сеймопрофиля – время прихода волн, в рамках указаны значения скоростей распространения волн (в м/с). Скоростные разрезы (II, IV) построены в координатах расстояние вдоль сеймопрофиля – глубина от земной поверхности, в рамках указаны значения скоростей распространения волн (в м/с) в скоростных слоях. По данным МПВ, по *P* волнам выделено два скоростных слоя (рис. 1, а), где второй слой является водоносным горизонтом (уровень грунтовых вод). Скорость 1-го слоя, прослеживающегося до глубины 2 м, составляет 133–135 м/с. Для 2-го слоя скорость распространения *P* волн в обводненной среде равна 1 606 м/с. По данным МПВ, по *S*-волнам выделено три слоя (рис. 1, б). Скорость 1-го слоя составляет 78–82 м/с, прослеживается до глубины 0,5–1 м. Скорость 2-го слоя – 142 м/с, граница слоя расположена на 5–6 м от земной поверхности. Скорость 3-го слоя – 236 м/с. При обводненности или заболоченности скоростной разрез по *P*-волнам будет малоинформативен, так как волна пройдет по водному горизонту и будет «экранировать» первые вступления преломленных волн от геологических границ.

Ввиду заболоченности местности можно предположить, что скорости *S*-волн и приращения скоростей от слоя к слою с глубиной будут иметь низкие значения. Тогда на ограниченной по размерам исследуемой территории выделение первых вступлений и определение скоростей распространения волн от более глубоко залегающих геологических границ становится невозможным. Для решения данной проблемы в комплексе с МПВ использовался метод ВСП для определения скорости распространения поперечных волн до глубины 53 м. Из-за инженерных особенностей скважин и технических проблем при установке сейсмоприемников регистрация волн проводилась с глубины 5 м. Из-за обводненности местности регистрация методом ВСП проходила только по *S*-волнам.

Основой для анализа волнового поля по материалам ВСП являются сводные сейсмограммы по стволу скважины для каждого пункта возбуждения [3]. Результаты, полученные в ходе обработки данных ВСП, представлены на рис. 2, а и рис. 2, б. График вертикального годографа (рис. 2, а) показывает время прихода волны с глубиной. По анализу графика рис. 2, а определялись участки, где наблюдалась линейная зависимость времени от глубины. График распределения скоростей с глубиной по *S*-волнам показан на рис. 2, б, на котором видно скачкообразное изменение скорости от слоя к слою с глубиной. В результате выделены 4 скоростных слоя на глубинах от 5 до 53 м. Характеристики этих слоев содержатся в табл. 1.

Характеристики полученного скоростного разреза геологической среды строительной площадки представлены в табл. 2. В первом столбце дано геологическое описание площадки, которое основывалось на технической документации геомониторинга объекта. Во втором столбце приведены значения глубин (м) для скоростных слоев. Третий и четвертый столбцы содержат сведения о скоростях распространения *P*- и *S*-волн.

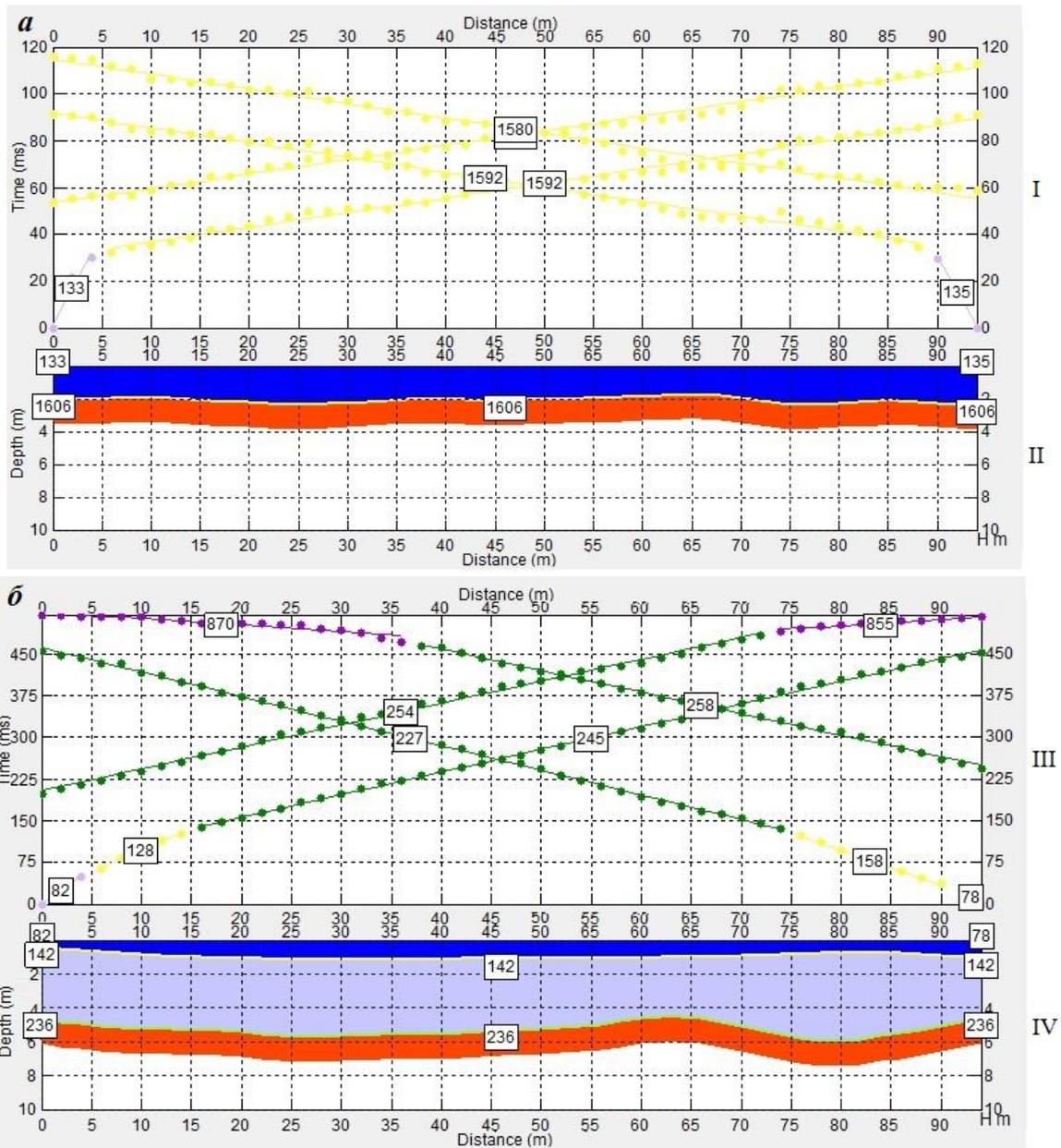


Рис. 1. Годографы преломленных волн (I, III) и скоростные разрезы (II, IV) по P- (а) и S-волнам (б)

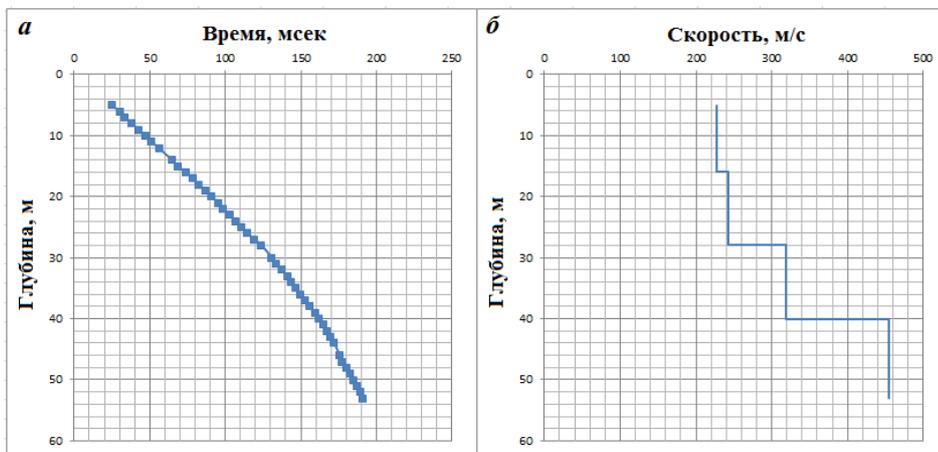


Рис. 2. Графики вертикального годографа (а) и распределения скоростей (б) по S-волнам

Таблица 1

## Скоростные характеристики грунтов, определенные методом ВСП

Глубина, м		Скорость S-волн, м/с
от	до	
5	16	226
16	28	242
28	40	319
40	53	454

Таблица 2

## Характеристики полученного скоростного разреза

Геологическое описание	Глубина, м		Скорость P-волн, м/с	Скорость S-волн, м/с
	от	до		
От поверхности до глубины 6,8 м насыпной грунт	0	0,5–2	133–135	78–82
	0,5–2	4,5–6	1606	142
От 6,8 до 16,2 м супесь темно-серая	4,5–6	16	1606	226–236
От 16,2 до 22 м суглинок темно-серый; от 22 до 25 м суглинок буровато-желтый; от 25 до 30 м глина темно-серая	16	28	1606	242
От 30 до 48 кора выветривания алеврита	28	40	1606	319
От 48 до 57 кора выветривания песчаника	40	53	1606	454

**Заключение**

С помощью методов МПВ и ВСП были получены геофизические данные о геологической среде строительной площадки. Проведена обработка и анализ информации. По P-волнам выделены два скоростных слоя, а по S-волнам – шесть слоев, что позволило составить цельный скоростной разрез исследуемой территории. Полученные результаты позволят построить сейсмогеологическую модель исследуемой территории и рассчитать характеристики возможных сейсмических воздействий, а также оценить сейсмическую опасность площадки для обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации объекта.

**Список литературы**

1. Заалишвили В. Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 367 с.
2. Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирования особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
3. Уломов В. И. Программа исследований по проблеме «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии» // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. 1993. № 1.

**Д. В. Радчук, Ю. В. Селютина**

Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск  
e-mail: Rady31@gmail.com

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ВЫСОТАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ЦМР**

Рассматривается задача построения модели разлива реки на основании совместного использования данных ЦМР и данных гидрологических постов с целью выявления возможных участков подтопления.

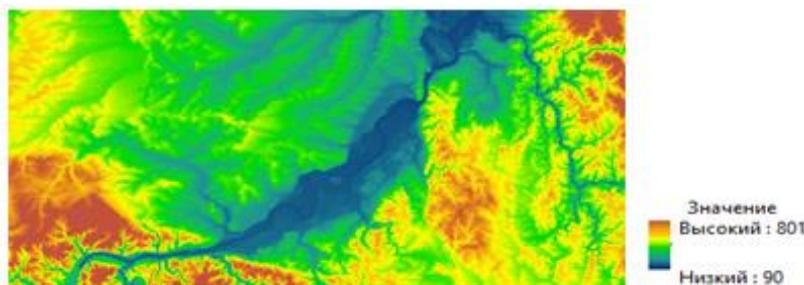
*Ключевые слова:* подтопление антропогенных объектов, цифровая модели рельефа, цифровая модель местности, shuttle radar topographic mission, воздушные линии электропередач, гидрологический пост.

В условиях развитой гидросети Красноярского края, сложной паводковой обстановки, высокой стоимости устранения последствий подтоплений значимых антропогенных объектов, вызванной труднодоступностью многих территорий края, задача моделирования разлива рек является важной народнохозяйственной задачей. Практические приложения этой задачи – прогнозирование и анализ фактов подтопления опор воздушных линий электропередач (ВЛЭП), выдача разрешительных документов на строительство в пойме рек, предотвращение чрезвычайных ситуаций и т. д. Обладая информацией о точном положении анализируемого объекта и уровне воды в реке, можно построить модель разлива исследуемой реки на основании данных цифровой модели рельефа (ЦМР) или цифровой модели местности (ЦММ) и определить, попадает ли данный объект в зону подтопления.

В работе поставлена задача выявления участков, которые могут оказаться в зоне подтопления на основе анализа геопространственной информации о территориях, находящихся в пойме крупных рек.

### **Исходные данные для анализа**

Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) – международная миссия по получению данных ЦМР. Радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных (>60 с.ш.), самых южных широт (>54° ю.ш.), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000 года с помощью специальной радарной системы.



**Рис. 1. Снимок SRTM на часть Красноярского края (включая город Красноярск)**

По оценкам А. К. Корвзула и И. Эвиака [4], матрица SRTM имеет ошибку, которая в среднем составляет для равнинной территории 2,9 м и для холмистой местности – 5,4 м, значительная часть этих данных включает систематическую ошибку. В работе использовались данные SRTM версии 3 разрешением 1 арксекунда (~30 м) от 11 февраля 2000 года.

На рис. 1 показан снимок SRTM на часть Красноярского края (включая город Красноярск).

Дата	Гидропост	Уровень воды, см	Неблагоприятный уровень, см	Критический уровень, см
31.05.2011	Енисей - Красноярск	196	390	600
01.06.2011	Енисей - Красноярск	194	390	600
02.06.2011	Енисей - Красноярск	194	390	600

**Рис. 2. Предоставление данных от МЧС с гидрологических постов об уровне воды в реках в табличном виде**

В качестве источников информации для решения упомянутых задач потенциально могут использоваться: данные аэрокосмической съемки – как с целью анализа фактов подтопления, так и с целью расчета снегозапасов; данные гидрологических постов; ЦМР и ЦММ. В настоящей статье рассматривается возможность совместного использования ЦМР и данных гидрологических постов.

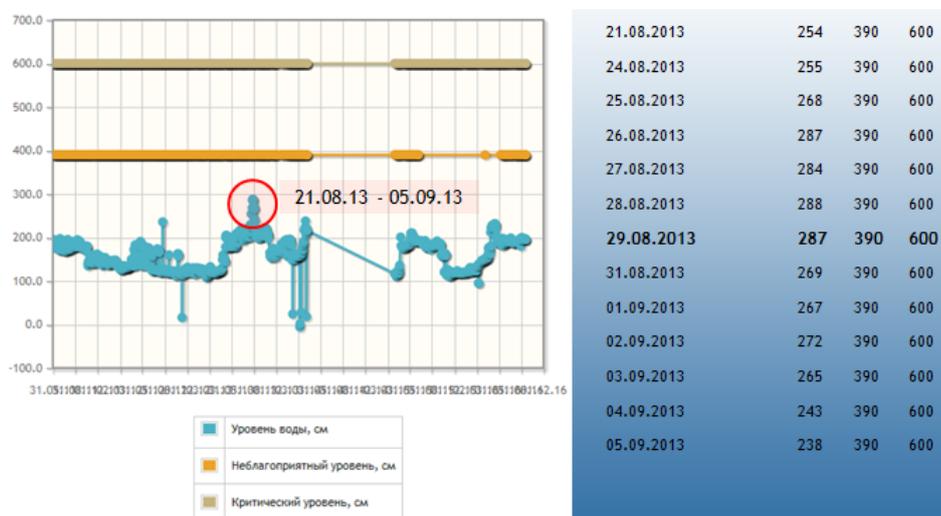


**Рис. 3. Опоры ВЛ (полуостров Посадный Красноярска). В основе – снимок Landsat 8**

Гидрологический пост – совокупность различного оборудования и приборов для гидрологических измерений и наблюдений на реках, озерах, морях, каналах, а также место, где расположены эти устройства. В узком смысле гидрологический пост – учреждение, проводящее гидрологические наблюдения. Нулем наблюдения (поста) называется горизонтальная плоскость, от которой производится отсчет уровня воды в момент наблюдения [6].

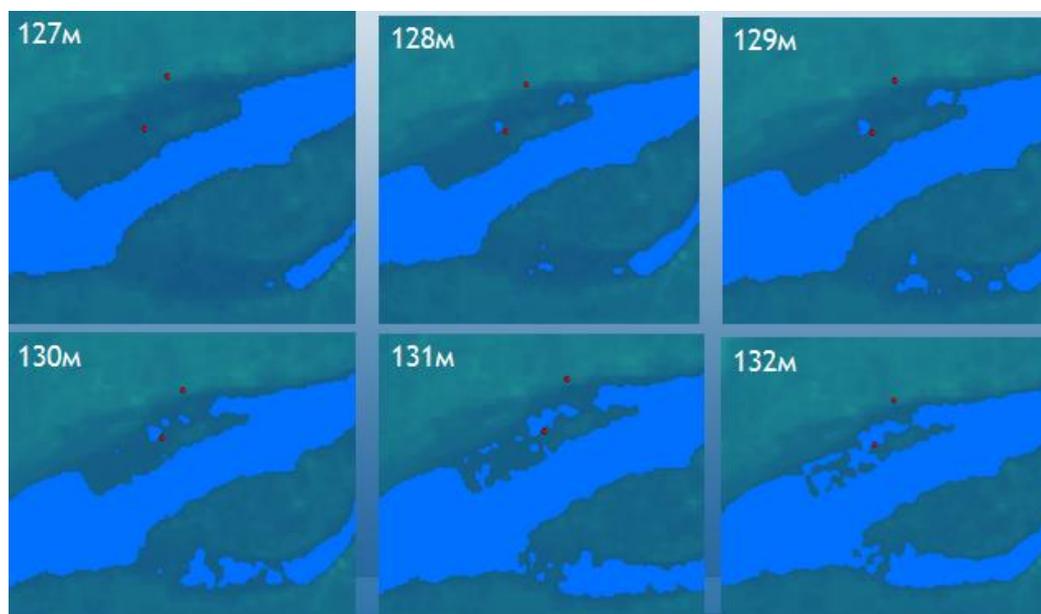
### Экспериментальные исследования

На рис. 4 показан пик уровня воды, который приходится на конец августа – начало сентября 2013 года. Вероятно, в этот период произошло подтопление опоры.



**Рис. 4.** Данные от МЧС с гидрологического поста в Красноярске об уровне воды в период с 31.05.11 по 10.09.16

Вдоль реки Енисей (по данным Среднесибирского УГМС) распределено 22 гидрологических поста. В территориальном центре мониторинга и прогнозирования ЧС Главного управления МЧС России по Красноярскому краю [7] можно в свободном доступе найти архивные данные об уровне воды в реках с детализацией по датам и гидрологическим постам (рис. 2).



**Рис. 5.** Моделирование пометрового затопления участка территории полуострова Посадного

Для моделирования зоны подтопления была выбрана территория Красноярска, на этой которой находится гидрологический пост, следовательно, есть возможность узнать отметку нуля этого гидрологический поста и ежесуточные данные об уровне воды.

В качестве антропогенного объекта для тестирования была выбрана опора ВЛЭП, расположенная на полуострове Посадный (рис. 3).

Отметка нуля водомерного поста (высота) в Красноярске 134,26 м, неблагоприятный уровень воды – 390 см (выше нуля поста), критический – 600 см (выше нуля поста) [7]. В 2013 году уровень воды поднялся на 2,87 м. При моделировании пометрового затопления территории уровень воды в Енисее, по данным SRTM, был 127 м (а не 134, как по данным гидрологического поста). Предположительно, это вызвано ошибкой, о которой говорили А. К. Корвзул и И. Эвиак [4].

При анализе полученной модели мы видим, что затопление опоры происходит с отметки 129 м, то есть на 2 м выше минимального значения уровня воды по снимку SRTM. На рис. 5 представлена модель пометрового затопления территории полуострова Посадного, выполненная в программном комплексе ArcMap 10.3.1. Несмотря на выявленную разницу нулевых уровней воды (при сравнении данных с гидрологического поста и данных ЦМР), в результате создания пометровой модели затопления видно, что затопление происходит при поднятии уровня воды на то же значение, что было отмечено на гидрологических постах.

### **Заключение**

Совместное использование данных ЦМР и гидрологических постов позволяет выполнить построение наиболее точной модели разлива реки, поскольку информация об уровне воды с гидрологических постов очень точна. Но у описанного метода есть и недостатки: это систематическая ошибка SRTM и недостаточное количество гидрологических постов. Для определения точного уровня воды в зонах, на которые нет данных гидрологических постов, требуется применение дополнительной информации.

### **Список литературы**

1. ArcGIS: On line справка ArcGIS Desktop.
2. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Митакович С. А. Моделирование затопления территории и ArcGis. URL: [http://esri-cis.ru/blogs/?page=post&blog=arcgis&post\\_id=modelirovanie-zatopleniya-tek-i-arcgis](http://esri-cis.ru/blogs/?page=post&blog=arcgis&post_id=modelirovanie-zatopleniya-tek-i-arcgis).
4. Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008. P. 169–172.
5. Что такое SRTM? Данные SRTM и где скачать SRTM бесплатно? URL: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.
6. Типы водомерных постов. Уровень воды. Нуль графика поста. Нуль наблюдений, производство наблюдений. URL: [http://studopedia.ru/15\\_6872\\_tipi-vodomernih-postov-uroven-vodi-nul-grafika-posta-nul-nablyudeniya-proizvodstvo-nablyudeniya-privodka.html](http://studopedia.ru/15_6872_tipi-vodomernih-postov-uroven-vodi-nul-grafika-posta-nul-nablyudeniya-proizvodstvo-nablyudeniya-privodka.html).
7. Территориальный центр мониторинга и прогнозирования ЧС Главного управления МЧС России по Красноярскому краю. URL: <http://tcmp.krasn.ru>.

**В. Ю. Ромасько**

СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета», Новосибирск  
e-mail: rvu@rcpod.siberia.net

## **МОНИТОРИНГ ЗАСНЕЖЕННОСТИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ПО ДАННЫМ SUOMI NPP**

Система мониторинга заснеженности речных бассейнов для обеспечения данными гидролого-математических моделей прогноза стока рек, ранее использовавшая исключительно данные КА Terra, доработана для использования также данных КА Suomi NPP. Проведен сравнительный анализ обеих методик и полученных результатов мониторинга заснеженности.

*Ключевые слова: снежный покров, TERRA, Suomi NPP, классификация изображений, речной бассейн.*

Наблюдение снежного покрова с искусственных спутников является одним из первых применений данных дистанционного зондирования Земли. Регулярное картографирование снежного покрова ведется NOAA с 1966 года [1]. В рамках программы EOS с 1998 года выпускаются ежедневные и 8-дневные карты снежного и ледового покровов и температуры льда морей в NSIDC (National Snow and Ice Data Center) в Университете Колорадо [2]. Разработанная и функционирующая в Сибирском центре «НИЦ "Планета"» полностью автоматическая «Система мониторинга заснеженности» [3] для мониторинга бассейнов больших и средних рек (более 5 000–10 000 км<sup>2</sup>) также обеспечивает полный цикл обработки данных радиометра MODIS со спутников Terra. Результатами работы системы является распределение снегового покрытия в относительном выражении по высотным зонам в пределах речного бассейна, а также средней высотой кромки снега. Они используются для коррекции параметров гидролого-математических моделей для прогнозов уровней и расходов воды в реках [4].

Аппарат Terra, функционирующий с 1998 года, работает уже третий расчетный срок эксплуатации (7 лет) и приближается уже к своему 20-летию нахождения на орбите. Однако любой космический аппарат имеет свой предел существования. По оценкам группы разработчиков топлива, на поддержание солнечно-синхронной орбиты КА Terra в штатном режиме хватит до 2018 года [3], после чего экономным расходом топлива орбита может удерживаться близкой к расчетной до 2020 года, при этом время нисходящего узла сдвинется с 10:30 до 10:15 местного времени. Примерно в середине 2020 года остаток топлива будет использован для сведения с орбиты и затопления.

Для продолжения функционирования системы мониторинга заснеженности и после вывода из эксплуатации КА Terra необходимо обеспечить преемственность системы для перехода на другой источник данных. Естественными кандидатами – преемники аппаратов серии EOS, которыми являются аппараты серии NPOES – КА Suomi NPP, запущенный в 28.10.2011, а также следующий КА в серии – JPSS-1 – планируемый к запуску в IV квартале 2017 года.

На борту этих КА установлен радиометр VIIRS, который также является наследником MODIS. В отличие от него разрешение в надире у VIIRS 375 и 750 м, ширина полосы захвата 3060 км, а также используется усреднение трех или двух соседних пикселей для уравнивания масштабов вдоль строки. Благодаря схожей

геометрии и близким характеристикам радиометров алгоритмы классификации снега близки [5; 6]. Алгоритмы основаны на дифференциальном нормализованном снежном индексе (NDSI), использующем специфическое свойство снега к поглощению излучения в диапазоне 1,6 мкм.

$$NDSI = (R16-R5)/(R16+R5),$$

где R16 – альbedo в диапазоне 1,6 мкм, а R5 – в диапазоне 0,5 мкм. В отличие от MODIS для VIIRS используется альbedo в диапазоне 0,6 мкм, так как канала 0,5 мкм с равным разрешением у VIIRS нет. Для классификации снега на лесистых территориях дополнительно рассчитывается значение дифференциального нормализованного растительного индекса (NDVI), который дает возможность идентифицировать наличие лесного покрова. В этом случае значения порогов по NDSI понижаются для возможности классификации снега при пониженном контрасте NDSI из-за экранирующего эффекта крон деревьев. Кривые понижения задаются табличной функцией для MODIS и полиномиальной для VIIRS, но форма их близка. Такая модификация алгоритма позволяет обнаруживать от 50 до 98 % снега на лесистых территориях в зависимости от типа и состава леса [7].

Из процесса классификации снега необходимо с максимальной точностью исключить районы, экранированные облачностью, для этого используются стандартные алгоритмы маскирования облачности [11; 12]. Полные версии алгоритмов маскирования облачности весьма гибкие и сложные одновременно, так как предназначены для применения на территории всего Земного шара. Учитывая высокие требования точности разделения снега и облачности для оценки заснеженности в условиях неявного наличия снега, из всех ветвей признано обоснованным применение лишь одной, а именно: облачность при наличии снега в светлое время суток. Результаты всех тестов и проверок в итоге сводятся к оценке вероятности наличия облачности. Данное значение, отличное от нуля, влечет за собой отказ от классификации снега.

Наилучшая точность определения относительной заснеженности достигается на безоблачных снимках, что очевидно. Однако таких снимков за сезон снеготаяния попадает не много, и тем меньше, чем больше бассейн. Иногда для бассейна за всю весну с трудом можно выбрать один снимок, поэтому для данной системы был разработан алгоритм мониторинга динамики заснеженности с использованием маски облачности на основе метода обнаружения разладки, известного как метод кумулятивных сумм [8].

Разладкой случайного процесса называется существенное изменение его параметров. В данном случае случайный процесс – это классификация снежного покрова при наличии помех в виде облачности, а существенное изменение параметров – это смена результата классификации со «снег» на «не снег» или обратно. Метод кумулятивных сумм применительно к оценке заснеженности заключается в последовательном подсчете фактов встречи классов до достижения некоторого порога. Факт встречи одного класса увеличивает счетчик одного класса и одновременно сбрасывает счетчик другого. Факты встречи облачности никак не учитываются и счета не меняют. В момент достижения порога делается заключение о том, что в момент начала накопления суммы этого класса процесс уже имел тот класс, сумма которого и превысила порог, то есть решение принимается «задним числом».

На текущий момент параллельно действующей цепочке обработки данных Terra обработаны данные Suomi NPP за период с 27 марта по 10 мая 2017 года для всех имеющихся в системе мониторинга заснеженностей 18 модельных бассейнов рек и водохранилищ, входящих в бассейны рек Енисей, Оби, Лены, Амур и Волги. Для сравнения наиболее пригодны данные сезона схода снега, тогда как периоды лета или зимы, когда заснеженность постоянная или нулевая, не показательны.

Для целей гидрологических прогнозов в сезон снеготаяния ошибка может иметь вид либо разности в площадях заснеженности на одну и ту же дату, либо разности между датами достижения одной и той же заснеженности. Для разных бассейнов разница в результатах подсчета относительных площадей заснеженности на одну и ту же дату в апреле 2017 года составляет в среднем от 0 до 10 %. Если сравнивать данные по дате достижения одинаковой заснеженности, то разница в результатах составит от 0 до 3 суток в диапазоне заснеженности 20–80 %. Для равнинных бассейнов, типа бассейна Оми, совпадение данных ближе – 1 сутки, но для них и сход снега длится несколько дней, тогда как для горных бассейнов различия больше. Причем и разброс различий между разными бассейнами выше, то есть наличие расчлененного рельефа вносит большую разницу в результаты. Также есть тренд к большей разнице для начальных этапов снеготаяния с заснеженностью в диапазоне 80–100 %.

Данные факты можно увязать с различием времени наблюдения и траектории полета. Время восходящего узла КА Suomi NPP 13:30, а у КА Terra время нисходящего узла 10:30. Соответственно, первый пролетает с юго-востока на северо-запад на 3 часа позже второго, летящего с северо-востока на юго-запад. Такая же меньшая заснеженность при более позднем сроке наблюдения определяется и для одного КА Terra – только здесь разница во времени наблюдения близка к периоду обращения – 104 минуты. Если в один день на один бассейн попадает два соседних витка Terra, что случается периодически для широт выше 51°, то для более позднего витка наблюдаемая заснеженность всегда получается меньше. Но в случае одного аппарата заснеженность суточного композита разных витков накапливается и на результирующем ряду ежедневных данных отсутствует. А при сравнении разных аппаратов, летящих регулярно в разное время суток каждый день, эта разница становится очевидной.

В работе [9] данный факт различия связывают с анизотропией отражения света снегом. Можно также связать этот эффект с тем, что разница в экспозиции Солнца и времени суток изменяет распределение теней в горной местности, что может дать статистически устойчивую разность в результатах, связанную именно с рельефом в бассейне реки, освещаемым с разных сторон.

Также от времени зависит суточный цикл формирования облачности. Известно, что от восхода Солнца до полудня наблюдается один из минимумов суточного цикла облачности, а после полудня начинается один из максимумов. Разное количество облачности вносит разные ошибки в классификацию снега на всей сцене. Границы облачности никогда не бывают резкими, хотя бы в силу невысокой разрешающей способности радиометров по сравнению с размерами, например, кучевых облаков в начальной стадии их формирования. Вследствие этого возле границ классифицированной облачности часто есть переходная зона ее полупрозрачности, которая снижает контрасты и вносит ошибки в классификацию, основанную на нормализованных дифференциальных индексах, коими являются NDSI и NDVI. Причем эти индексы всегда занижаются из-за снижения контраста, что в случае классификации снега приводит к ошибкам именно в сторону «не снега».

### **Заключение**

Таким образом, использование данных радиометра VIIRS, установленного на КА Suomi NPP, для мониторинга заснеженности показывает результаты близкие к (а в части пространственного разрешения и лучшие) используемым до настоящего времени данным радиометра MODIS, установленного на КА Terra, который в течение ближайших трех лет завершит свое существование. Замена основного источника данных на современный КА и последующие аппараты серии позволит продолжить работы по мониторингу снежного покрова действующей «Системой мониторинга заснеженности» на ближайшие 10–15 лет.

### Список литературы

1. Matson M. NOAA satellite snow cover data // *Paleogeography and Paleocology*. 1995. 90., P. 213–218.
2. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V.V. 2001: Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms.
3. June 2014 Terra Status. [https://terra.nasa.gov/wp-content/uploads/2014/03/ESMO\\_Terra\\_WebStatus\\_June2014.pdf](https://terra.nasa.gov/wp-content/uploads/2014/03/ESMO_Terra_WebStatus_June2014.pdf).
4. Бураков Д. А., Гордеев И. Н., Ромасько В. Ю. Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидрологи-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7, № 2. С. 113–121.
5. Hall D. K., Riggs G. A. and Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sensing of Environment*. 1995. 54. P. 127–140.
6. Snow and ice products from Suomi NPP VIIRS / Jeffrey R. Key, Robert Mahoney, Yinghui Liu, Peter Romanov, Mark Tschudi, Igor Appel, James Maslanik, Dan Baldwin, Xuanji Wang, Paul Meade // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Т. 118. С. 12816–12830.
7. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska / D. K. Hall, J. L. Foster, D. L. Verbyla, A. G. Klein and C. S. Benson // *Remote Sensing of Environment*. 1998. 66. P. 129–137.
8. Жиглявский А. А., Красовский А. Е. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
9. Hall D. K., Riggs G. A. Accuracy assessment of the MODIS snow products // *Hydrological processes*. 2007. № 21. С. 1534–1547.

**А. С. Савельев<sup>(1,3)</sup>, О. Г. Морозова<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск

<sup>(2)</sup>Торгово-экономический институт Сибирского федерального университета,  
Красноярск

<sup>(3)</sup>Красноярский филиал АО «Научно-исследовательский  
и производственный центр "Природа"»  
e-mail: andrey.s.saveliev@gmail.com

## **ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕРЕЗОВСКОЙ ГРЭС-1 ПО ДАННЫМ LANDSAT TIRS**

По данным тепловой инфракрасной съемки Landsat 8 TIRS изучены пространственные распределения температур поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1. Определено направление циркуляционного потока отепленной воды от сбросного канала к водозабору электростанции.

*Ключевые слова:* Березовская ГРЭС-1, температура поверхности, эвтрофикация, водоем-охладитель, Landsat 8 TIRS, ГИС, Quantum GIS, пространственное распределение.

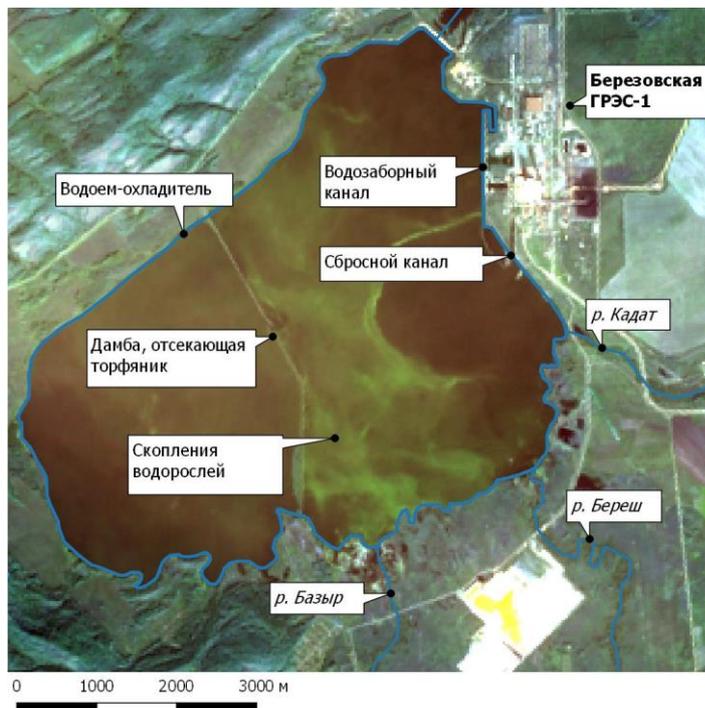
Эвтрофикация водоемов-охладителей является одной из важных экологических проблем при эксплуатации тепловых и атомных электростанций. Тепловой сброс электростанций изменяет естественный температурный режим водоема, что приводит к дисбалансу между процессами продуцирования органического вещества и деструкции [1; 2]. Температура воды, охлаждающей поверхности нагрева теплоагрегатов, повышается на 10–20 °С, а основная отдача тепла происходит в водоеме-охладителе, где вода охлаждается за счет испарения и конвекции. Существующие нормативы предусматривают недопустимость превышения температуры воды в водоеме-охладителе в зимнее время на 5 °С, а в летнее – на 3 °С выше естественной максимальной температуры [1]. Для развития цианобактерий и хлорофитов благоприятна температура от +20 до +35 °С; температура +27–29 °С является оптимальной для их роста [4]. Использование данных тепловой инфракрасной съемки Landsat позволяет организовать наблюдение над термическим режимом поверхности водоема-охладителя.

Березовская ГРЭС-1, находящаяся в Шарыповском районе Красноярского края, введена в эксплуатацию в 1986 году. Водоем-охладитель сооружен зарегулированием стока реки Береш, принадлежащей бассейну Верхнего Чулыма, в районе впадения в нее рек Базыр и Кадат. Морфометрические характеристики водоема-охладителя определены по цифровой модели дна водохранилища, которая была построена при помощи SAGA GIS по данным геодезической съемки, выполненной до затопления. Площадь зеркала водоема составляет 33,37 км<sup>2</sup>; объем – 193,0 млн м<sup>3</sup>; средняя глубина водоема – 5,8 м, максимальная – 15,0 м. Особенностью морфометрического строения водоема является наличие мелководий в верховьях с глубиной не более трех метров, занимающих больше половины зеркала водоема.

В ложе водоема-охладителя затоплено месторождение торфа объемом 30,7 млн м<sup>3</sup> [1]. Скопления всплывшего торфа в районе водозабора станции изменяло гидравлический

режим работы водозаборных сооружений, поэтому на водоеме была сооружена дамба, отсекающая западный участок, занятый наиболее мощными залежами торфа. Несмотря на это, проблема эвтрофикации водоема остается актуальной. Тепловой сброс ГРЭС способствует продуцированию органического вещества. Развитие фитопланктона характеризуется стадией умеренного цветения [1], что отражается на изображениях Landsat 8 в виде скоплений водорослей (рис. 1).

Цель работы заключается в анализе пространственного распределения температуры поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1 по данным тепловой инфракрасной съемки Landsat.



**Рис. 1. Скопления водорослей в водоеме-охладителе Березовской ГРЭС-1 (изображение Landsat 8 от 19 сентября 2016 года, комбинация каналов 4-3-2)**

### Материалы и методы

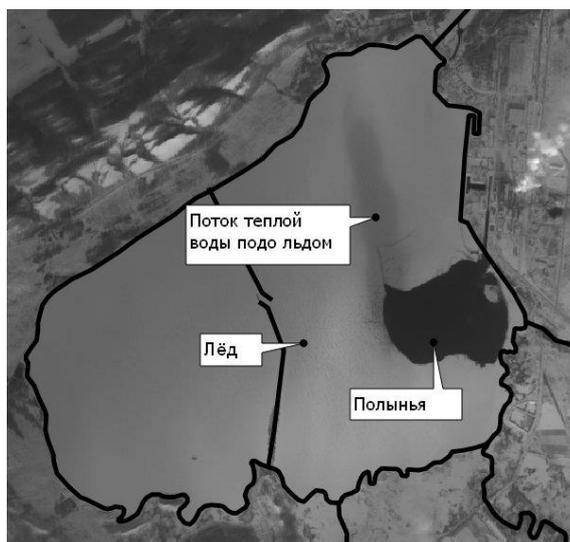
Изучение пространственных вариаций температуры поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 проводилось на основе данных Landsat 8 TIRS; для этого подобраны 12 изображений Landsat 8 за 2016 год, на которых акватория водоема свободна от облаков. Обработка полученных данных осуществлялась при помощи ГИС Quantum GIS с установленным модулем Semi-Automatic Classification Plugin [3], а также утилит библиотеки GDAL. Для автоматизированной обработки исходных изображений использовались скрипты на языке Python и встроенные в Quantum GIS библиотеки численных методов numpy и научных вычислений scipy, а также графическая библиотека matplotlib.

Атмосферная коррекция выполнялась по алгоритму DOS1. Расчет температур поверхности водоема выполнялся, следуя [5; 7]. Яркостная температура определялась как  $T_B = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1)$ , где  $L_\lambda$  – спектральная энергетическая яркость в апертуре сенсора;  $K_1$  (в Вт/м<sup>2</sup>\*ср\*μм) и  $K_2$  (в °К) – специфичные для данного канала константы, взятые из файла метаданных. Для вычисления температуры поверхности использовалось уравнение

$$T = T_B / \left( 1 + \lambda T_B \frac{s}{hc} \ln(\varepsilon) \right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны (10.6–11.19  $\mu\text{м}$  для 10 канала);  $s$  – постоянная Больцмана;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\varepsilon$  – излучательная способность поверхности. Температуры поверхности приведены в шкалу Цельсия.

В уравнении (1) для оценки излучательной способности поверхности суши используют индекс NDVI [6]. На исследуемом объекте могут находиться два типа поверхностей – вода и лед, что упрощает задачу. На панхроматическом изображении зимой в 8 канале Landsat Operational Land Imager выделяется незамерзающая полынья. Ее границы, выделенные при помощи дифференциального оператора Лапласа и векторизованные в Quantum GIS, разделяют поверхности с различной излучательной способностью: для воды  $\varepsilon = 0,995$ , для льда  $\varepsilon = 0,98$ . На ледовой поверхности также проявляется циркуляционный поток охлаждаемой воды от сбросного канала к водозаборному каналу (рис. 2).

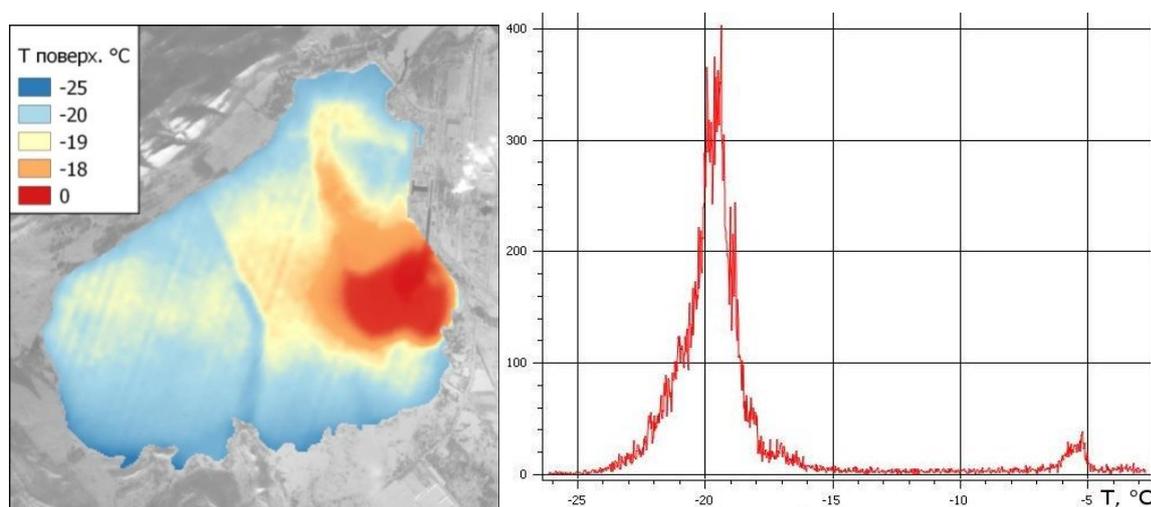


**Рис. 2. Выделение кромки льда на панхроматическом изображении Landsat 8 OLI (8 канал Landsat 8, 15 ноября 2016 года)**

### Результаты и их обсуждение

Максимальные пространственные вариации температур поверхности водоема-охладителя наблюдаются в зимние месяцы, когда станция работает наиболее интенсивно. Летом энергия, поступающая в водоем от теплового сброса БГРЭС-1, мала по сравнению с энергией, поступающей от солнечного излучения и от теплообмена с атмосферой. Зимой большая часть водоема покрыта льдом, теплообмен с атмосферой прекращается, и возрастает влияние теплового сброса на температуру поверхности, что проявляется в большей разнице температур между зонами по разную сторону от дамбы. Так, пространственные вариации температур поверхности водоема зимой достигают  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а летом – около  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зимой наибольшие температуры наблюдаются возле устья сбросного канала, а наименьшие – на мелководье.

Карта пространственного распределения температур поверхности (рис. 3) показывает направление течений отепленной воды от точки сброса к водозабору. Циркуляционный поток захватывает площадь около  $6,5\text{ км}^2$ , его направление определяется рельефом дна, температурой водных масс, течением впадающих в водоем рек Береш, Базыр и Кадат, направлением ветра. Циркуляционный поток не затрагивает южную часть водоема, где расположены мелководья с глубинами до 3 м. В дамбе имеется проход шириной около 40 м, через который отепленная вода попадает в западную часть водоема, температура воды здесь отличается от фоновой на  $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 3. Пространственное распределение температур поверхности водоема (изображение Landsat 8 TIRS от 15 ноября 2016 года по 10 каналу)**

### **Заключение**

По данным тепловой инфракрасной съемки Landsat 8 TIRS получены карты пространственного распределения температур поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1, отражающие тепловое воздействие электростанции на водоем. Циркуляционный поток от сбросного канала к водозабору БГРЭС-1 проходит в основном в малой по площади зоне возле станции, что снижает эффективность охлаждения воды и приводит к риску эвтрофикации водоема. Использование панхроматического канала Landsat 8 OLI для выделения кромки льда позволяет различать водную и ледовую поверхности и использовать при расчете температуры соответствующие коэффициенты излучательной способности.

### **Список литературы**

1. Морозова О. Г., Пен Р. З., Фоменко Ю. П. Принципы оптимизации качества воды водоема-охладителя БГРЭС-1 для технологических целей и аквакультуры. Красноярск: СФУ, 2011. 185 с.
2. Щур Л. А. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 (Красноярский край) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 597–605.
3. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. 2016.
4. Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures / M. Lürling, F. Eshetu, E. J. Faassen, S. Kosten, V. L. M. Huszar // Freshwater Biology. 2013. 58: P. 552–559.
5. Meheub S., Raihan A., Haroon S. Analyzing land surface temperature distribution in response to land use/land cover change using split window algorithm and spectral radiance model in Sundarban Biosphere Reserve, India // Model. Earth Syst. Environ. (2016) 2:81.
6. Valor E., Caselles V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas // Remote Sensing of Environment. 57(3):167–184. September 1996.
7. Xiaolei Yu, Xulin Guo, Zhaocong Wu. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS – Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method // Remote Sensing. 2014. 6. 9829–9852.

**Л. Г. Свердлик**

Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек  
e-mail: lsverdlik@istc.kg, e-mail: l.sverdlik@mail.ru

## **ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД РЕГИОНАМИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

Представлены результаты спутниковых (*MODIS/Terra*) измерений межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщи и показателя Ангстрема в регионах Центральной Азии в 2002–2014 годы. Проанализированы линейные тренды изменения параметров.

*Ключевые слова:* спутниковые измерения, аэрозольная оптическая толщина, показатель Ангстрема, пространственная изменчивость, временной тренд.

### **Введение**

Решение многих задач в экологических и климатических исследованиях требует получения информации о пространственно-временных вариациях параметров атмосферного аэрозоля [1]. Наиболее эффективным средством мониторинга глобального и регионального распределения дисперсного состава и содержания аэрозоля, которые характеризуются показателем Ангстрема (*AE*) и аэрозольной оптической толщиной (*AOD*), являются приборы дистанционного зондирования атмосферы [2; 3]. В последние годы благодаря систематическим и долгосрочным наземным измерениям (*AERONET*) [4; 5] и спутниковым наблюдениям выполнены многочисленные исследования пространственной изменчивости свойств различных типов аэрозоля [6; 7]. Вместе с тем до настоящего времени подобные исследования для регионов Центральной Азии не проводились. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы восполнить этот пробел в аэрозольных измерениях.

### **Регион исследования и используемые данные**

Для проведения настоящего исследования была выбрана область (СА), ограниченная координатами 38.5–44.5 °N и 68.5–81.5 °E по широте и долготе соответственно, которая включает всю территорию Кыргызстана. Чтобы обеспечить детальное описание свойств аэрозоля в этой области, были выделены 10 участков размером 1°×1° (см. таблицу), семь из которых расположены в Кыргызстане, а также по одному в Казахстане (Алма-Ата) и Таджикистане (Душанбе). С целью изучения степени влияния Азиатской пыли на пространственное распределение *AOD* использовались данные участка в пустыне Такла-Макан.

Таблица

**Символическое обозначение участков и координаты их центров**

Site	Sym	Lat.	Long.	Site	Sym	Lat.	Long.
		(°N)	(°E)			(°N)	(°E)
Taklamakan	TM	40.5	79.5	Naryn	NA	41.5	76.5
Issyk-Kul	IK	42.5	77.5	Talas	TA	42.5	72.5
Djalal-Abad	DA	41.5	73.5	Batken	BA	40.5	70.5
Bishkek	BI	42.5	74.5	Osh	OS	40.5	72.5
Almaty	AL	43.5	76.5	Dushanbe	DU	38.5	68.5

Для выделенных участков на основе данных *MODIS/Terra (MOD08\_M3.051)* [8] были построены временные ряды среднегодовых значений аэрозольной оптической толщи на длине волны 550 нм ( $AOD_{MODIS}$ ) и показателя Ангстрема ( $AE_{MODIS}$ ) для длин волн  $\lambda_1 = 470$  нм и  $\lambda_2 = 660$  нм. Пространственное разрешение спутниковых данных составляло  $1^\circ \times 1^\circ$  [1]. Точность данных *MODIS AOD* над земной поверхностью составляет  $\Delta AOD = \pm 0.05 \pm 0.15 \times AOD$ . Способность спутниковых измерений адекватно отражать состояние атмосферы оценивалось путем сопоставления со значениями  $AOD_{AERONET}$  ( $\lambda = 500$  нм), полученными из базы данных измерений солнечными фотометрами *CIMEL* сети *AERONET* в пункте мониторинга *Issyk-Kul* [9]. При этом данные наземного наблюдения  $AOD$  в процессе обработки пересчитывались с использованием показателя Ангстрема на длину волны 550 нм. Проверка достоверности результатов спутниковых измерений  $AOD_{MODIS}$  на участке ИК показала хорошее согласие с данными *AERONET* на двух уровнях коррекции (*Level 1.0* и *Level 1.5*) с коэффициентами корреляции  $R^2 = 0,76$  и  $R^2 = 0,73$  соответственно.

Анализ временных рядов  $AOD_{MODIS}$  и  $AE_{MODIS}$  в исследуемой области охватывает период с 2002 по 2014 год. В пределах этого интервала производилась оценка коэффициента линейного тренда аэрозольных характеристик и вычисление параметров линейной регрессионной модели на основе метода наименьших квадратов.

### Межгодовая изменчивость MODIS AOD и AE

Спутниковые данные девяти участков (рис. 1), рассредоточенных по всей области исследования, позволили проанализировать особенности аэрозольного загрязнения атмосферы и оценить его долгосрочные тенденции, для чего использовалась аппроксимация линейных трендов среднегодовых значений  $AOD_{MODIS}$  и  $AE_{MODIS}$ .

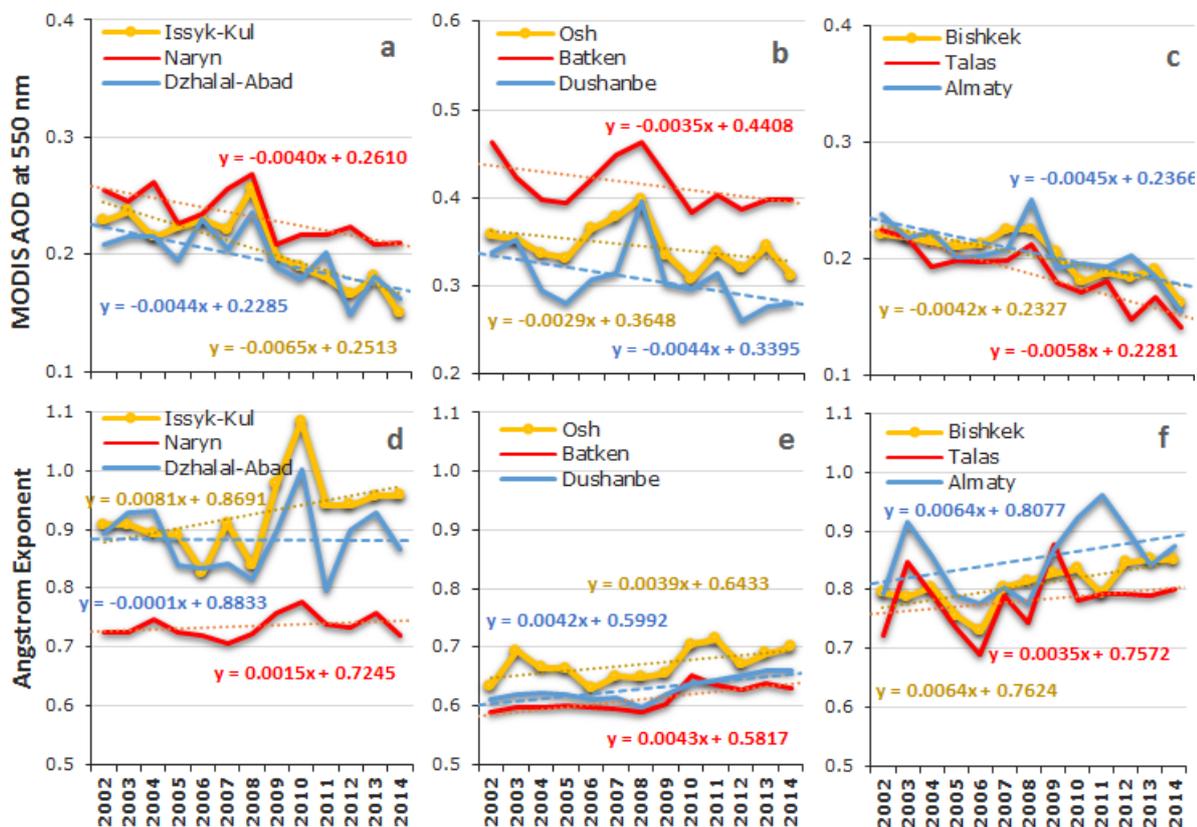


Рис. 1. Временные ряды и линейные тренды среднегодовых значений  $MODIS AOD$  (a, b, c) и  $AE$  (d, e, f) в регионах исследуемой области

Результаты многолетних наблюдений показали сильные региональные различия и определенные закономерности распределения параметров аэрозоля, в соответствии с которыми все рассматриваемые участки были разделены на три группы: а) ИК, НА, DA; б) OS, BA, DU; в) BI, TA, AL. Основанием для выделения однотипных участков послужила хорошая взаимосвязь между изменениями параметров ( $R^2 > 0,5$ ) и достаточно близкие уровни  $AOD$  и  $AE$  за исключением группы (б), в которой вариации  $AOD$  были качественно подобными, но диапазон изменения существенно отличался.

Как видно, самые низкие среднегодовые значения  $0.15 \leq AOD \leq 0.25$  наблюдались на северных участках (ТА, BI, AL), и несколько более высокая аэрозольная нагрузка ( $AOD = 0.25-0.30$ ) зарегистрирована в регионах, расположенных на северо-востоке и в западной части области (ИК, НА, DA). Наиболее загрязненными аэрозольными частицами участками являлись OS, BA и DU ( $AOD = 0.3-0.5$ ). Значения показателя Ангстрема на участках варьировали в пределах от 0.6 до 1.1, что соответствует показателям, характеризующим пылевой аэрозоль ( $AE < 0.7$ ) и смешанные в различной пропорции составы ( $0.7 < AE < 1.1$ ), состоящие из крупных частиц пыли и тонкодисперсных частиц, главным образом, продуктов сгорания и сульфатов [4; 5].

Результаты показали наличие отрицательных линейных трендов  $AOD$  и положительных трендов  $AE$ . Рост  $AE$  за рассматриваемый период не превышал 15 %, тогда как средний уровень содержания атмосферного аэрозоля в южных регионах (ТМ, OS, BA, DU) уменьшился на 10–15 %, а на менее загрязненных участках произошло более значительное снижение  $AOD$  на 20–25 % (НА, AL, BI, DA). Наибольший спад аэрозольной нагрузки (~30 %) наблюдался на участках ИК и ТА. Следует отметить, что длительные периоды устойчивого изменения  $AOD_{MODIS}$  и  $AE_{MODIS}$ , не наблюдались. Отрицательную годовую динамику  $AOD_{MODIS}$  во всей области (СА) можно оценить величиной  $-0.0052$  ( $-1.66$  %), при том что отдельные изменения происходили в пределах от  $-0.0029$  ( $-0.84$  %) на участке OS до  $-0.0065$  ( $-3.16$  %) в ИК (рис. 2).

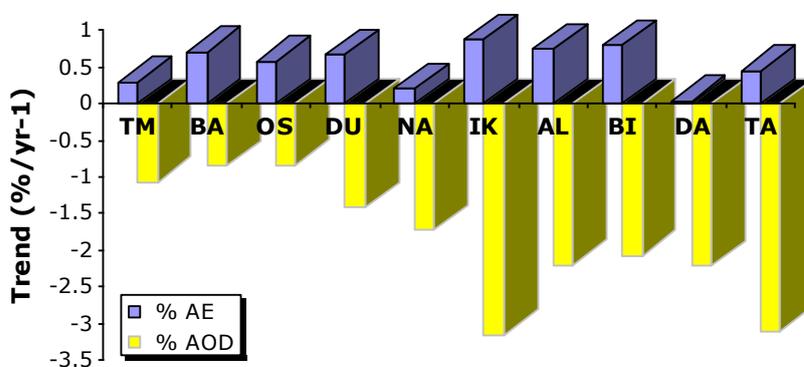


Рис. 2. Средние годовые линейные тренды  $AOD_{MODIS}$  и  $AE_{MODIS}$

Долгосрочные тенденции пространственного распределения показателя Ангстрема свидетельствуют о некотором уменьшении содержания крупных частиц пыли в атмосфере, в большей степени над северными и северо-восточными участками (ИК, BI, AL), где положительный тренд  $AE$  составлял 0.75–0.87 % в год. Напротив, исключительно низкий тренд  $AE$  (0.001 %) наблюдался на участке DA.

Таким образом, анализ спутниковых данных (2002–2014) показал наличие явной тенденции уменьшения общего содержания аэрозоля ( $AOD$ ) над всей областью исследования ( $-1.66$  %), что согласуется с соответствующими тенденциями в других регионах мира. В то же время на всех участках обнаруживается небольшой, в пределах 1 % в год, рост  $AE$ , что не позволяет связать тренд  $AOD$  с убыванием тонкодисперсного

аэрозоля антропогенного происхождения. Наиболее вероятно это может быть обусловлено естественными природными процессами: таким, например, как уменьшение эмиссии пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан и многолетняя изменчивость общей циркуляции атмосферы, проявляющаяся в перестройке (повторяемости и интенсивности) зональной компоненты на меридиональную составляющую [3; 10]. И, как следствие, снижением запыленности атмосферы в исследуемой области. Проведенные оценки региональных различий аэрозольной нагрузки атмосферы показали, что воздействие Азиатской пыли в различной степени подвержена большая часть территории Кыргызстана. Наиболее сильное влияние пылевых бурь в пустыне Такла-Макан наблюдалось на участках NA, IK и DA и приходилось на весенний период. Из полученных данных также следует, что на пространственное распределение *AOD* и *AE* существенно влияет топография местности. На высокогорных участках доминировал аэрозоль тонкодисперсной фракции.

### **Заключение**

Результаты спутниковых измерений оптической толщи и показателя Ангстрема (*MODIS/Terra*) в период с 2002 по 2014 год были использованы для исследования особенностей пространственного распределения и временной (среднегодовые данные) изменчивости аэрозольного загрязнения в регионах Центральной Азии. Полученные результаты являются первым этапом анализа, основанного на возможностях современных спутниковых систем. Важным результатом проведенного исследования является создание большой базы данных спутниковых измерений для исследуемого региона. Объединение этой базы с данными других систем космического и наземного базирования и использование более высокого временного разрешения даст более полное представление о процессах трансформации атмосферного аэрозоля и будет способствовать решению актуальных задач экологического мониторинга.

*Автор выражает благодарность всем сотрудникам проектов MODIS/Terra и AERONET (Issyk-Kul) за обеспечение свободного доступа к наборам данных, используемым в настоящем исследовании.*

### **Список литературы**

1. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land / R. C. Levy, L. A. Remer, R. G. Kleidman, S. Mattoo, C. Ichoku, R. Kahn, T.F. Eck // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. 10399–10420.
2. Yoon J. W., von Hoyningen-Huene A.A., Kokhanovsky M., Vountas, Burrows J. P. Trend analysis of aerosol optical thickness and Angstrom exponent derived from the global AERONET spectral observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. 5. 1271–1299.
3. Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L. G. Sverdlik, B. B. Chen, Y. S. Balin, G. P. Kokhanenko, I. E. Penner, S. V. Samoilova // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics.* 2014. С. 92923J.
4. Сverdlik Л. Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) // *Наука, новые технологии и инновации.* 2013. № 3. С. 3–7.
5. Сverdlik Л. Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над северным Тянь-Шанем // *Наука, новые технологии и инновации.* 2016. № 3. С. 3–9.
6. Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data / Z. P. Dong, X. Yu, X. M. Li, J. Dai // *Chin. Sci. Bull.* 2013. V. 58, № 35. 4486–4496.
7. Сverdlik Л. Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля // *Наука, новые технологии и инновации.* 2014. № 4. С.26–31.
8. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>.
9. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.
10. Ивлев Л. С. Аэрозоли и глобальные изменения климата // *Региональная экология.* 2011. № ¾. С. 83–93.

**Б. В. Содномов, А. А. Аюджанаев, Б. З. Цыдыпов,  
М. А. Жарникова, Е. Ж. Гармаев**

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ  
e-mail: sodnomov@binm.ru

## **ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЛЕСОВ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ (НА ПРИМЕРЕ ЗАЙГРАЕВСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)**

В работе представлены предварительные результаты оценки изменения лесного покрова в результате природно-антропогенного воздействия (пожары, рубки) на примере модельного участка, а также сравнительный анализ результатов, полученных по статистическим архивным данным и данным дистанционного зондирования. Выявлено, что по снимкам MODIS детектируются только крупные лесные пожары и сплошные рубки леса большой протяженности. Также обнаружено, что не детектируются разнесенные в пространстве небольшие рубки в пределах пикселя.

*Ключевые слова:* лесной покров, рубки, пожары, NDVI, MODIS, временные ряды.

### **Введение**

Леса России относятся к важнейшей составляющей биоресурсного потенциала планеты, занимая более 49 % площади земель России и около 20 % общей площади лесного покрова планеты [1]. В связи с крупными лесными пожарами в 2015–2017 годы на территории Восточной Сибири и, в частности, Республики Бурятия актуальной задачей является определение степени нарушенности лесов [2]. Для региона характерно циклическое наступление засушливых периодов, способствующих возникновению лесных пожаров [3]. В случаях возникновения очагов поражения леса возрастает необходимость расширения санитарных рубок, их безотлагательного проведения [4].

Важнейшей информацией, которая позволяет исследовать происходящие на поверхности Земли процессы, являются данные дистанционного зондирования Земли [5]. Для задач непрерывного мониторинга растительного покрова в региональном масштабе оптимальным представляется использование данных MODIS высокого временного разрешения (частота съемки может достигать до четырех раз в сутки) и более высокого пространственного разрешения по сравнению с AVHRR. Отмечается, что к числу ключевых преимуществ спектрорадиометра MODIS при решении задач картографирования земного покрова можно отнести возможность формирования и использования временных рядов спутниковых данных [6].

Целью работы является оценка изменения лесного покрова в результате природно-антропогенного воздействия на примере Заиграевского лесничества, а также сравнительный анализ результатов, полученных по статистическим архивным данным и данным ДЗЗ.

В качестве тестового участка выбрано Заиграевское лесничество, расположенное в центральной части Республики Бурятия на территории муниципального образования «Заиграевский район». Протяженность территории лесничества с севера на юг составляет 85 км, с востока на запад – 70 км. Климат района расположения лесничества резко континентальный, с низкой среднегодовой температурой, большой сухостью воздуха, резкими суточными и годовыми колебаниями температуры, небольшим

количеством осадков и неравномерным распределением их по месяцам. Общая площадь лесничества 285 372 га, из них 241 532 га относятся к I классу пожарной опасности [7].

Непрерывный процесс почвообразования в условиях лесничества протекает синхронно с обратным процессом – разрушением почвенного покрова под воздействием ветра, воды и сейсмостектонических воздействий. Вся территория лесничества эрозионно опасна и всякое нарушение растительного покрова может повлечь за собой активное развитие водной эрозии и привести к уничтожению почвенного покрова [8].

### **Материалы и методы**

Для построения временных рядов NDVI использованы 16-дневные композиты NDVI спутника Terra с 2000 по 2016 год (продукт MOD13Q1). Для создания композита применяется метод максимального значения MVC (Maximum Value Compositing). Использование MVC позволяет минимизировать влияние атмосферных эффектов, включая облачность и дымку [9].

Проведена предварительная обработка данных, заключающаяся в восстановлении отсутствующих значений и сглаживании временного ряда NDVI. Обозначенные специальным флагом отсутствующие значения пикселя за 16-дневный период (например, вследствие постоянной облачности) заменены его средним значением за весь период. При отсутствии двух значений подряд (то есть более чем за 32 дня) пиксель не участвует в дальнейшем анализе.

Из-за присутствия шумовой составляющей использование несглаженных временных рядов значительно повышает вероятность ложного детектирования рубок. Для сглаживания временных рядов использован фильтр Савицкого – Голея, который часто применяется для снижения уровня шумов при значительном объеме данных.

Для детектирования антропогенного влияния, при котором индекс NDVI падает (рубки и пожары), был построен куб данных NDVI, в котором оси X и Y – пространственные координаты, а Z – временная. Размер тестового полигона составил 486×1273 пикселей. Временной ряд представлен данными за 17 лет с 2000 по 2016 год по 23 композита в каждом году (391 значение для каждого пикселя). В случае если во временном ряду обнаружено падение индекса NDVI на значение большее, чем порог детектирования, то во временном ряду для данного года выставляется флаг детектирования.

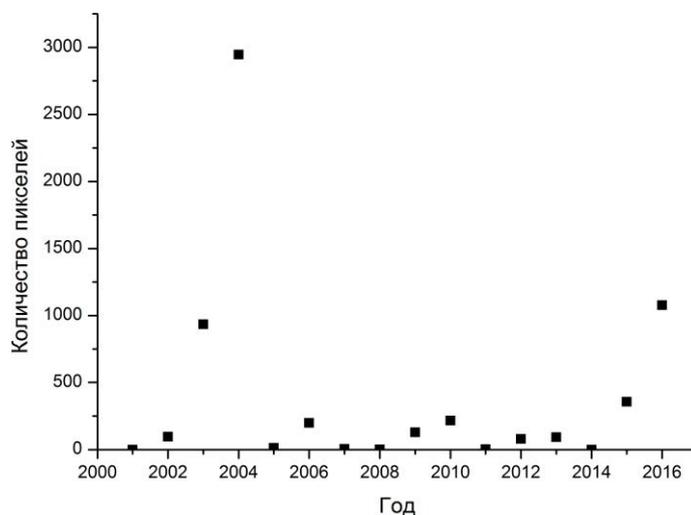
Использована информация о вырубке леса и пожарах на территории Заиграевского лесничества с 2008 по 2016 год, предоставленная Республиканским агентством лесного хозяйства (РАЛХ) Министерства природных ресурсов Республики Бурятия. Представленные материалы о рубках и пожарах включают следующие данные: год, лесной квартал, тип и площадь рубки (пожара). Для дальнейшего анализа использована информация только о сплошных рубках площадью более 3,125 га (половина пикселя MODIS NDVI) и верховых или сильных низовых пожарах.

### **Результаты и обсуждение**

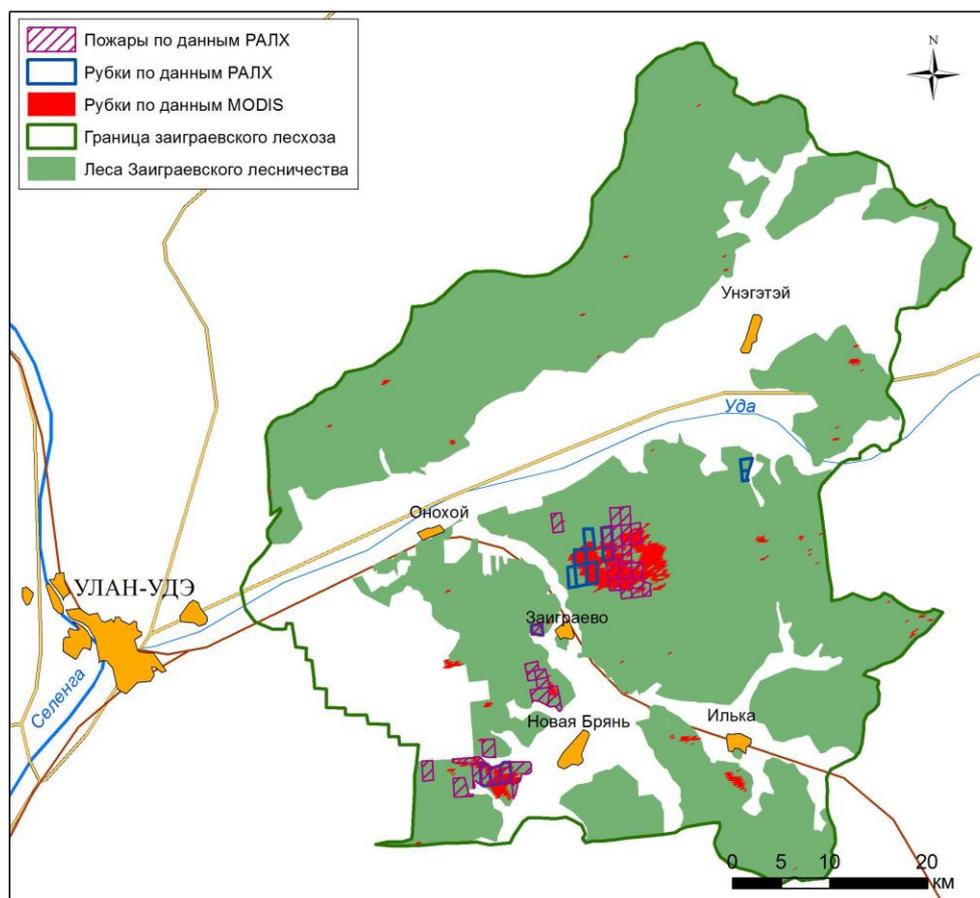
На рис. 1 показано количество пикселей, в которых обнаружено падение индекса NDVI на значение более чем 0,2. В 2003 и в 2015 годы в Республике Бурятия зафиксировано малое количество осадков и как следствие – большое число крупных лесных пожаров. Из рисунка видно, что наибольшее падение происходит в год, следующий после лесных пожаров (2004 и 2016).

На рис. 2 представлена картосхема рубок в 2016 году и лесных пожаров в 2015 году, по данным MODIS и статистическим архивным данным. В результате анализа данных NDVI зафиксированы крупные концентрированные рубки в центральной и юго-западной частях лесничества. Небольшие рубки, расположенные

удаленно друг от друга, не были обнаружены. Однако найдена крупная область падения индекса NDVI вблизи с. Илька. Стоит также отметить большое количество небольших по площади областей, в которых наблюдалось падение NDVI в 2016 году. Это может быть вызвано как незаконными рубками, мелкими неотмеченными лесными пожарами, так и деградацией растительности в целом. Из рис. 2 видно, что падение индекса NDVI связано не только с рубками в текущем году, но и с пожарами в 2015 году. Это связано как с оперативно проводимыми санитарными рубками леса, так и с деградацией растительности после лесного пожара в целом (рис. 2).



**Рис. 1. Количество пикселей, в которых обнаружено падение индекса NDVI**



**Рис. 2. Картограмма вырубке лесов и пожаров Заиграевского лесничества в 2016 году**

## **Заключение**

Полученные результаты настоящего исследования носят предварительный характер. Выявлено, что часто архивные материалы региональных центров лесного хозяйства о рубках и пожарах не совпадают с картиной, полученной по данным MODIS. Для более точной валидации ареалов поражения лесов пожарами и сплошными рубками требуется привлечение снимков более высокого пространственного разрешения (например, линейки Landsat), а также применения средств малой авиации (дельталетов и БПЛА). Данная методика выявления нарушенности лесного покрова требует доработки с учетом неантропогенного влияния (климат, природные пожары, поражение лесов насекомыми-вредителями и т. п.).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-01059.*

## **Список литературы**

1. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Е. А. Лупян, Д. Е., Плотников С. А. Хвостиков, Н. В. Шабанов. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Украинцев А. В., Плюснин А. М. Лесные пожары в Заиграевском районе Республики Бурятия в 2010–2012 гг.: причины возгорания и ущерб // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 60–65.
3. Реконструкция водности рек и исторические хроники экстремальных природных явлений Байкальской Азии / С. Г. Андреев, Е. Ж. Гармаев, А. А. Аюржанаев, Э. А. Батоцыренов, Б. О. Гуржапов // Научное обозрение. 2016. № 5. С. 35–38.
4. Мелехов И. С. Лесоводство. М.: МГУЛ, 2003. 320 с.
5. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 582 с.
6. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia / S. Bartalev, A. Belward, D. Ershov, A. Isaev // International Journal of Remote Sensing. 2003. V. 24. Is. 9. P. 1977–1982.
7. Об утверждении Сводного плана тушения лесных пожаров на территории Республики Бурятия на период пожароопасного сезона 2017 года: указ главы Республики Бурятия № 59 от 17.03.2017. URL: <http://www.alh-rb.ru/upload/iblock/b54/ukaz-ob-utverzhdanii-spt-059.pdf>.
8. Об утверждении Лесохозяйственного регламента Заиграевского лесничества: приказ Республиканского агентства лесного хозяйства РБ № 662 от 11.11.2014. URL: [http://egov-buryatia.ru/uploads/tx\\_npa/Заиграевский\\_регл.rar](http://egov-buryatia.ru/uploads/tx_npa/Заиграевский_регл.rar).
9. Van Leeuwen W. J. D., Huete A. R., Laing T. W. MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data // Remote Sens. Environ. 1999. № 69. P. 264–280.

**Е. Н. Сутырина**

Иркутский государственный университет, Иркутск  
e-mail: ensut78@gmail.com

## **МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВО-ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА AVHRR**

В рамках данного исследования изучались особенности межгодовой изменчивости параметров ледово-термического режима озера Байкал с применением данных радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за 1998–2016 годы. С применением спутниковых материалов изучены факторы, оказывающие влияние на ряд ключевых характеристик ледового и термического режимов озера.

*Ключевые слова:* озеро Байкал, радиометр AVHRR, температура поверхности воды, сроки полного очищения ото льда.

### **Введение**

Целью данного исследования являлось изучение межгодовой изменчивости параметров ледово-термического режима озера Байкал с применением спутниковых данных. Характеристики ледово-термического режима являются значимыми параметрами состояния экосистемы озера и одними из важнейших индикаторов, позволяющими выявить климатические изменения, к которым они чувствительны, поэтому получение информации о межгодовой изменчивости температуры поверхности воды и сроков наступления ледовых явлений важно для изучения изменений регионального и локального климата.

Размеры оз. Байкал с площадью акватории в 31,7 тыс. км<sup>2</sup> оправдывают использование для изучения его ледово-термического режима данных дистанционного зондирования, позволяющих следить за состоянием всего водоема и получать пространственно-временную информацию о протекающих в озере процессах, которую невозможно обеспечить с применением только судовых и экспедиционных изысканий.

### **Материалы и методы исследования**

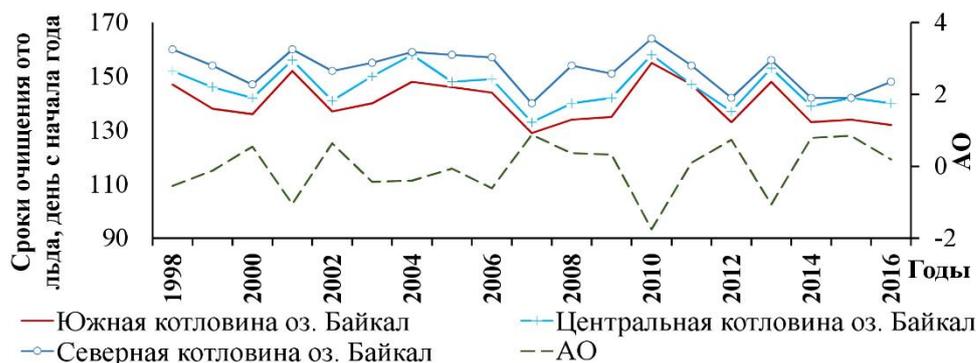
Для изучения особенностей пространственно-временного распределения прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал в период открытого водоема были использованы данные радиометра AVHRR за период с 1998 по 2016 год. В весенний период использование данных AVHRR об отражательной способности поверхности позволяют определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова и чистую воду [1], а, следовательно, и сроки полного очищения акватории ото льда. При изучении таяния льда облачность является помехой. По сопоставлению сроков, определенных по спутниковым данным, со сроками, определенными на береговых станциях озера Байкал за 2009–2012 годы была найдена средняя квадратическая ошибка, которая не превышает 2 суток. С учетом существенной межгодовой изменчивости, обсуждаемой ниже, данная оценка представляется удовлетворительным результатом.

Для оценки температуры поверхности воды оз. Байкал использовались авторские региональные алгоритмы обработки данных AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы

(июнь-июль, август-сентябрь, октябрь-декабрь), применении квадратичной модификации метода «расщепленного окна прозрачности» и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток [2], обладающих точностью до 0,4 К в ночное время, и до 0,3 К в дневное время суток.

### Результаты исследования

По спутниковым данным изучены региональные особенности очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал. На рис. 1 показан межгодовой ход сроков очищения ото льда исследуемых акваторий, а в табл. 1 приведены средние и крайние сроки полного очищения и их межгодовая изменчивость, определенные по данным AVHRR за период с 1998 по 2016 год.



**Рис. 1. Межгодовые колебания сроков очищения ото льда исследуемых акваторий по данным радиометра AVHRR в сопоставлении с ходом значений индекса АО, осредненных за период с ноября по апрель**

Таблица 1

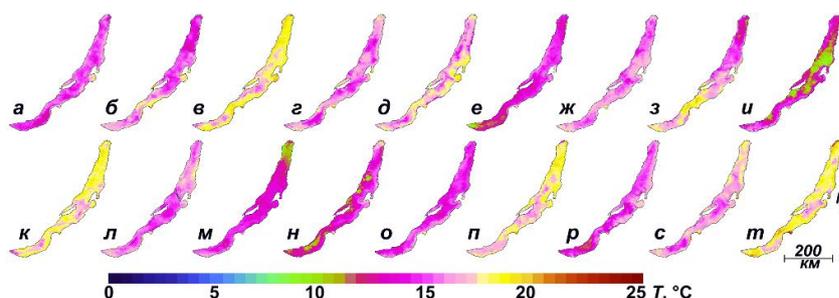
**Характерные сроки полного очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин озера Байкал**

Характеристика	Южная котловина	Центральная котловина	Северная котловина
Средний срок полного очищения	20 мая	25 мая	1 июня
Срок наиболее раннего полного очищения	9 мая	13 мая	20 мая
Срок наиболее позднего полного очищения	4 июня	7 июня	13 июня
Разброс сроков полного очищения, дни	26	25	24
Среднее квадратическое отклонение, дни	8	7	7

В ходе исследования проанализирована связь сроков очищения водоема ото льда по данным AVHRR с индексом Арктической осцилляции (АО), которая является основным крупномасштабным атмосферным процессом, определяющим межгодовую изменчивость погодных условий в высоких и средних широтах Северного полушария в холодное время года. Когда индекс АО находится в положительной фазе, кольцо циркулирующих вокруг Северного полюса сильных ветров ограничивает поступление более холодного воздуха из полярных регионов. В отрицательной фазе этот пояс ветров ослабевает и искажается, способствуя более легкому проникновению на юг холодных арктических воздушных масс и увеличению штормовой активности в средних широтах [3] и посредством этого влияя на ледовый режим водоема. На рис. 1 можно видеть, что межгодовые колебания сроков очищения ото льда акваторий трех котловин озера в целом находятся в противофазе к межгодовым колебаниям значений индекса АО. В ходе исследования обнаружена тесная и весьма тесная связь сроков очищения ото льда

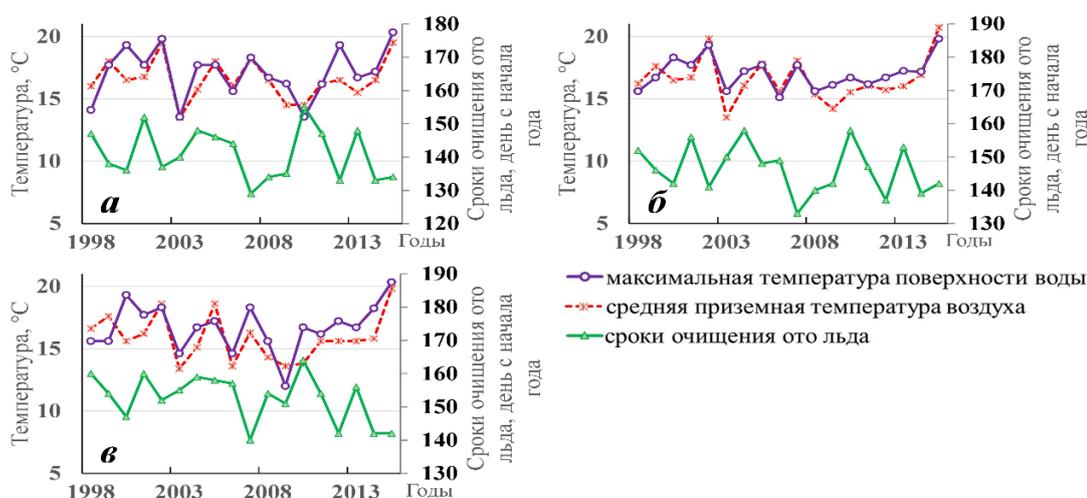
всех котловин оз. Байкал со значениями индекса АО, осредненными за период с ноября по апрель или по май, с коэффициентом корреляции достигающим  $-0,89 \dots -0,91$ .

Составлены серии электронных карт температуры поверхности воды оз. Байкал с 1998 по 2016 год для периодов открытой воды. Установлено, что наибольшие межгодовые различия в распределении температуры на поверхности озера приурочены к периодам наибольшего прогрева, поэтому для анализа межгодовой изменчивости температурного режима водоема наиболее оправдано изучение вариаций температуры воды на поверхности в указанные периоды. Ниже приведены карты распределения температуры, соответствующие наибольшему прогреву воды на поверхности оз. Байкал (рис. 2), отобранные для каждого года за период с 1998 по 2015 год и иллюстрирующие существенную межгодовую изменчивость в распределении температуры.



**Рис. 2.** Распределения температуры воды на поверхности озера Байкал: 30.08.1998 (а), 2.08.1999 (б), 8.08.2000 (в), 12.08.2001 (г), 8.08.2002 (д), 28.08.2003 (е), 18.08.2004 (ж), 3.08.2005 (з), 15.08.2006 (и), 15.08.2007 (к), 13.08.2008 (л), 1.09.2009 (м), 23.08.2010 (н), 17.08.2011 (о), 11.08.2012 (п), 30.08.2013 (р), 29.7.2014 (с), 21.08.2015 (т)

За период исследования максимальные значения температуры на поверхности в открытых частях исследуемых акваторий заметно изменялись: в Южной котловине оз. Байкал от 13,5 (2010) до 20,3 °С (2015), в Центральной – от 15,1 (2006) до 19,8 °С (2015), в Северной – от 12,0 (2009) до 20,3 °С (2015). С привлечением данных реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center of Atmospheric Research) проведен анализ связи величины приземной температуры воздуха и максимальных значений температуры на поверхности открытых частей данных акваторий оз. Байкал (рис. 3).



**Рис. 3.** Ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях Южной (а), Центральной (б), Северной (в) котловин озера Байкал, сроков очищения данных акваторий ото льда и средней приземной температуры воздуха за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды

На рис. 3 приведен межгодовой ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях изучаемых акваторий и приземной температуры воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, в целом показывающий наличие синхронности изменения этих параметров в указанных акваториях, что соответствует наличию заметной линейной связи между данными параметрами в Северной котловине с коэффициентом корреляции, равным 0,65, и тесной линейной связи с коэффициентами корреляции 0,79 и 0,83 в Южной и Центральной котловинах соответственно. Установлено, что связь максимальных значений температуры воды со сроками очищения ото льда в Южной и Северной котловинах оз. Байкал характеризуется как заметная и умеренная с коэффициентами корреляции  $-0,52$  и  $-0,44$  соответственно, в Центральной – как слабая с коэффициентом корреляции  $-0,22$ .

В работе выявлены положительные тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях исследуемых акваторий (табл. 2).

**Таблица 2**

**Тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий, приземной температуры воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, сроков очищения ото льда в 1998–2016 годы**

Акватория	Тренды максимальных значений температуры поверхности воды, °C/10 лет	Тренды приземной температуры воздуха, °C/10 лет	Тренды сроков полного очищения ото льда, дней/10 лет
Южная котловина	0,2	-0,1	-2,8
Центральная котловина	0,3	0,3	-3,6
Северная котловина	0,7	-0,2	-7,3

Положительные тренды значений приземной температуры, как за весь летний период, так и только за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры на поверхности в открытых частях, зафиксированы только для условий Центральной котловины. При этом во всех котловинах отмечаются отрицательные тренды сроков полного очищения ото льда. Можно предположить, что рост температуры воды на поверхности озера в исследуемый период по крайней мере в Южной и Северной котловинах обусловлен более ранним очищением водоема ото льда, что в свою очередь связано с тенденцией к усилению в холодное время года в исследуемый период циркумполярной циркуляции, описываемой индексом АО.

### **Заключение**

По полученным с применением данных AVHRR материалам изучены региональные особенности очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин озера Байкал и распределения температуры на их поверхности, исследован вклад различных факторов в формирование ледово-термического режима. Выявлены положительные тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий всех котловин озера и сопоставлены с трендами приземной температуры воздуха и трендами сроков очищения акваторий ото льда.

### **Список литературы**

1. Сутырина Е. Н. Межгодовая изменчивость и прогноз весенних ледовых явлений на оз. Байкал и водохранилищах Ангарского каскада // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 108–116.
2. Сутырина Е. Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
3. Arctic Oscillation (AO). URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao/>.

**О. А. Томшин, В. С. Соловьев**

Институт космических исследований и аэрономии  
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск  
e-mail: tomshinoa@gmail.com

## **ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОПОЖАРНОЙ АКТИВНОСТИ В МЕРЗЛОТНОМ РЕГИОНЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

Представлены результаты исследований динамики лесных пожаров в бореальных лесах Якутии (Восточная Сибирь) за 2001–2016 годы. Проведено исследование вариаций аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ, 550 нм), аэрозольного индекса (АИ) и общего содержания угарного газа в период май – сентябрь в годы с различным уровнем лесопожарной активности. Показано, что сезонный ход АОТ, АИ и СО в наиболее пожароопасные годы существенно отличается от сезонного хода в года со средним и низким уровнем лесопожарной активности.

*Ключевые слова:* лесные пожары, аэрозоль, угарный газ, дистанционное зондирование.

### **Введение**

Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим значительное влияние на окружающую среду [1–3]. В ходе пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество парниковых газов и аэрозольных частиц, влияющих на химические процессы в атмосфере, радиационный баланс и в целом климат. Исследованиям крупномасштабных лесных пожаров и их влияния на характеристики атмосферных аэрозолей посвящен ряд публикаций [4–6].

Цель работы – исследование влияния лесопожарной активности на сезонный ход аэрозольных характеристик атмосферы и общего содержания СО в бореальных лесах Восточной Сибири (Якутии).

### **Данные**

Информация об очагах лесных пожаров получена по данным радиометров MODIS/Terra (продукт MOD14A1 v6) и AVHRR/NOAA в период 2001–2016 годов. Уровень лесопожарной активности на исследуемой территории оценивался количеством «хотспотов», аномально горячих точек (пикселей), обнаруженных на космоснимках. Оценка выгоревших площадей проведена по данным MODIS/Terra, Aqua (продукт MCD45A1).

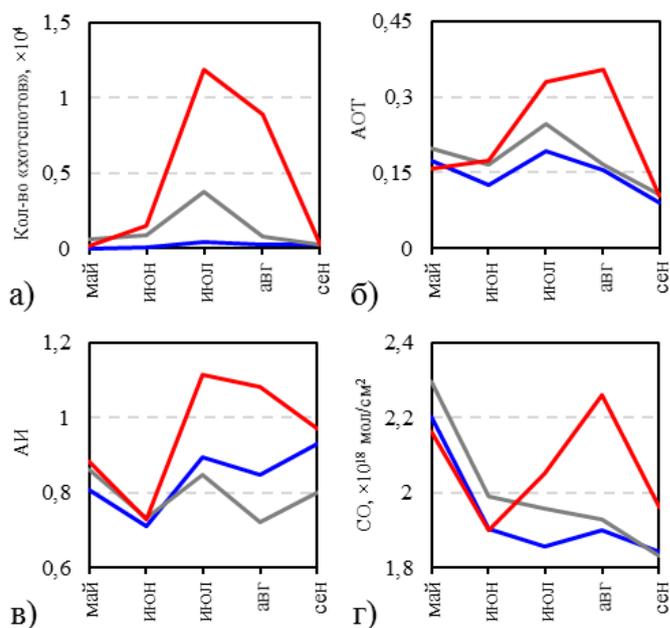
Среднемесячные значения АОТ атмосферы на длине волны 550 нм получены по данным радиометра MODIS/Terra (MOD08\_M3 v6). Среднесуточные значения аэрозольного индекса (АИ) получены по данным приборов OMI/Aqua (продукт OMT03d v003), TOMS/Earth Probe (продукт TOMSEPL3 v008). АИ отражает присутствие в атмосфере сильно поглощающих УФ-излучение аэрозолей, доминирующих в выбросах от ЛП. Для исследования сезонных вариаций общего содержания СО в атмосфере использованы среднемесячные данные прибора AIRS/Aqua (продукт AIRX3STM v006). Данные приборов MODIS, OMI, AIRS и TOMS получены из открытых ресурсов Центра космических полетов им. Р. Годдарда НАСА [7].

Данные о температуре, влажности и осадках были взяты из NCEP-реанализа [8]. Метеоданные были приведены к виду отклонений среднесезонных (май-сентябрь) значений от среднесезонных.

Для оценки степени возмущающего воздействия лесопожарной активности на параметры атмосферы, из рассматриваемого периода были выделены сезоны с высоким (2001, 2002, 2012–2014), средним (2003, 2005, 2008–2011) и низким (2004, 2006, 2007, 2015, 2016) уровнем лесопожарной активности, обозначенные на рис. 1 красным, серым и синим, соответственно. Критерием разделения служило итоговое (суммарное) количество «хотспотов» по годам, которое для пожароопасных сезонов составило в среднем 23 тыс., для средних 6 тыс. и для низких 1 тыс. в год.

### Обсуждение результатов

Для пожароопасных периодов с высоким, средним и низким уровнем пирогенной активности на территории Якутии, построены среднемесячные графики количества детектированных «хотспотов» и значений АОТ, АИ, СО (рис. 1). На рис. 1, а показаны вариации количества «хотспотов» в годы с различным уровнем лесопожарной активности. Количество «хотспотов» в мае и июне в годы с высоким и средним уровнем активности отличается незначительно. Максимум лесных пожаров во всех трех периодах приходится на июль, однако его величина значительно различается. Так, для наиболее пожароопасных периодов максимальное значение составляет ~12000, для средних ~4000 и ~400 для наименее пожароопасных. В августе для средних и непожароопасных периодов наблюдается значительный спад активности ЛП в среднем на 70 % по сравнению с июлем, в то время как для пожароопасных периодов спад составляет только 25 %. В сентябре лесопожарная активность во всех трех периодах прекращается.

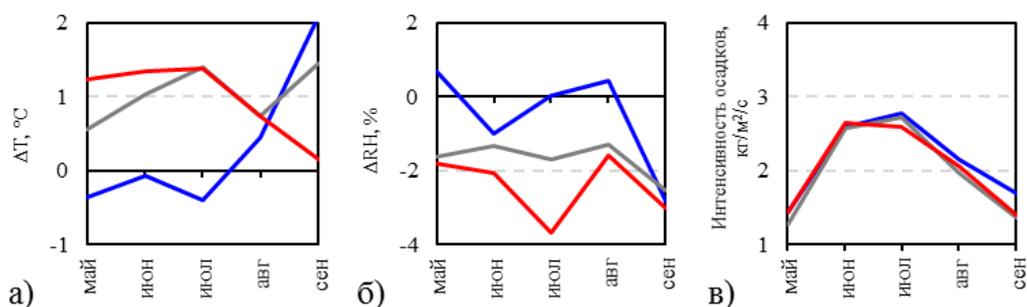


**Рис. 1. Вариации: а – количества «хотспотов»; б – АОТ; в – АИ; г – общего содержания СО в период май – сентябрь в годы с высоким (красные линии), средним (серые линии) и низким (синие линии) уровнем лесопожарной активности**

Вариации АОТ в период май – сентябрь представлены на рис. 1, б. Сезонный ход АОТ в периоды со средним и низким уровнем лесопожарной активности отличается незначительно. Значения АОТ в эти периоды спадают с мая по июнь, затем наблюдается рост и максимум в июле (~0,2–0,25) и плавное падение до минимума в сентябре (~0,1). В пожароопасные периоды рост значений в июле более значителен и достигает ~0,3, после чего следует максимум в августе (~0,35) и резкий спад до

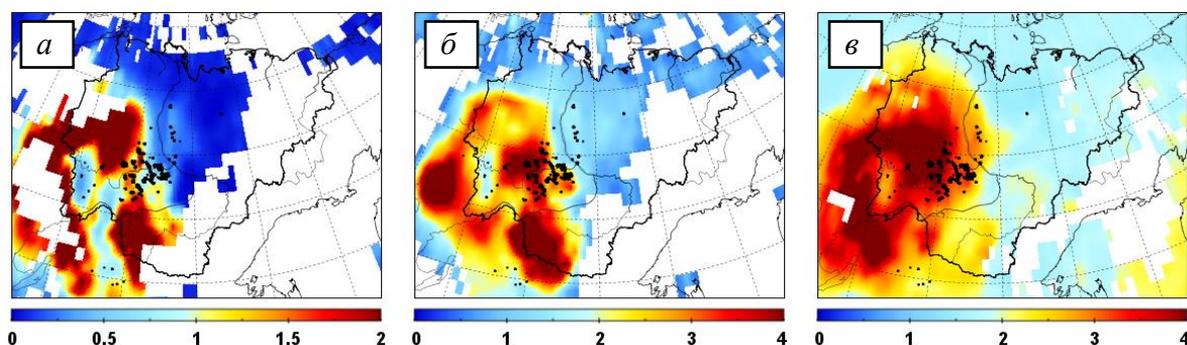
минимума в сентябре ( $\sim 0,1$ ). Отклик на ЛП в вариациях АИ (рис. 1, в) больше по сравнению с АОТ и лучше согласуются с вариациями пожаров – резкий рост значений с максимумом в июле, после чего следует небольшой спад в августе. Более слабая реакция АОТ обусловлена априорным занижением этого параметра, вследствие крайне высокой плотности дымовых шлейфов (соответственно, критически высоких для методики расчета АОТ значений альbedo), экранирующих исследуемый участок.

На рис. 1, г представлены вариации общего содержания угарного газа. В годы со средним и низким уровнем лесопожарной активности сезонный ход CO имеет одинаковый вид – максимум приходится на май, после чего следует постепенный спад значений до сентября. Вариации CO в наиболее пожароопасные периоды имеют значительные отличия – после спада в мае-июне наблюдается рост значений в июле, максимум в августе ( $2,2 \times 10^{18}$  мол/см<sup>2</sup>) и спад в сентябре. Рост общего содержания CO в этот период наиболее вероятно вызван именно лесопожарной активностью.



**Рис. 2. Вариации: а –  $\Delta T$ ; б –  $\Delta RH$ ; в – интенсивности осадков в период май – сентябрь в годы с высоким (красные линии), средним (серые линии) и низким (синие линии) уровнем лесопожарной активности**

Вариации отклонений значений метеопараметров от среднемноголетних представлены на рис. 2. В годы с высоким и средним уровнем лесопожарной активности наблюдались повышенные значения температуры воздуха в период май-июль относительно среднемноголетних (рис. 2, а), что способствовало возникновению и развитию ЛП. Значения относительной влажности (рис. 2, б) в период май-сентябрь в годы с высоким и средним количеством ЛП более низкие, в то время как в наименее пожароопасные года значения влажности ближе к среднемноголетним. Как следует из рис. 2, в, сезонный ход осадков во все периоды примерно одинаков.



**Рис. 3. Карты пространственного распределения значений: а – АОТ; б – АИ; в – общего содержания CO ( $\times 10^{18}$  мол/см<sup>2</sup>) за 22 июля 2014 года. Черными точками отмечены «хотспоты»**

На рис. 3 приведены карты пространственного распределения среднесуточных значений АОТ (рис. 3, а), АИ (рис. 3, б) и общего содержания угарного газа (рис. 3, в) за 22 июля 2014 года. Максимальные среднесуточные значения многократно превысили фоновые и составили: в распределении АОТ 4,9 (фоновые значения ~0,2), АИ – 6 (фоновые значения ~0,8), общего содержания СО –  $5,4 \times 10^{18}$  мол./см<sup>2</sup> (фоновые значения  $1,85 \times 10^{18}$  мол./см<sup>2</sup>). Как видно из рисунков, аэрозольное облако, образовавшееся вследствие лесных пожаров в западной части Якутии, выносится воздушными массами в западном направлении, причем концентрация угарного газа сохраняется высокой на протяжении всего пути перемещения аэрозольного облака.

### **Заключение**

Лесные пожары в Якутии оказывают значительное воздействие на сезонный ход аэрозольной компоненты атмосферы, формируя существенный рост АОТ/АИ в июле-августе. В отдельные месяца с наиболее высоким уровнем пирогенной активности среднемесячные значения АОТ по исследуемому участку (Якутия) значительно превышали фоновые, достигая значений 0,48. При этом значения АОТ в отдельных ячейках среднемесячной карты распределения достигали 1,73.

Распределение АИ дает более адекватную оценку содержания аэрозолей в атмосфере при высоких значениях альbedo подстилающей поверхности, поскольку АОТ, в силу методических ограничений не рассчитывается в условиях сильной задымленности, характеризующейся высокими значениями альbedo.

В годы с высоким и средним уровнем лесопожарной активности наблюдались повышенные значения температуры воздуха в период май – июль относительно среднемноголетних. Значения относительной влажности в период май – сентябрь в годы с высоким и средним количеством ЛП более низкие, в то время как в наименее пожароопасные года значения влажности ближе к среднемноголетним. Сезонный ход осадков во все периоды примерно одинаков.

### **Список литературы**

1. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, Е. А. Ваганов, А. И. Сухинин, Ш.Ш. Максютлов, И. МкКаллум, И.П. Лакида // Доклады академии наук. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
2. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса / И. П. Щербаков, О. Ф. Забелин, Б. А. Карпель и др. Новосибирск: Наука. 1979. 226 с.
3. Соловьев В. С., Козлов В. И., Муллаяров В. А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии; отв. ред. С. И. Соловьев. ИКФИА СО РАН. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.
4. Соловьев В. С., Будищев А. А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 626–629.
5. Томшин О. А., Протопопов А. В., Соловьев В. С. Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 145–150.
6. Tomshin O. A., Solovyev V. S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35, № 15. P. 5742–5749.
7. Acker J. G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Transactions AGU. 2007. V. 88. № 2. P. 14–17.
8. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, D. Joseph // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. № 77. P. 437–470.

**Е. С. Турчанинова<sup>(1)</sup>, О. Э. Якубайлик<sup>(1, 2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета, Красноярск

<sup>(2)</sup>ИВМ СО РАН, ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск  
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

## **ПОСТРОЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОДОСБОРОВ РЕЧНОЙ СЕТИ**

Рассматривается задача формирования водосборных бассейнов на территорию южной и центральной частей Красноярского края. В процессе выполнения работы использовались алгоритм GRASS r.watershed и цифровая модель рельефа SRTM. Обсуждаются технологии построения иерархически связанных водосборных бассейнов, методы их идентификации, построения логических взаимосвязей.

*Ключевые слова:* гидрология, водосборные бассейны, дистанционное зондирование, рельеф, ЦМР изображения, векторные данные, цифровая модель рельефа.

### **Водосборные бассейны**

Водосборным бассейном, или водосбором, называется площадь земной поверхности, находящаяся выше по течению от замыкающего створа этого бассейна (проектируемого искусственного сооружения), с которого возможен к нему сток по склонам, логом и долинам.

Бассейн в общем случае состоит из поверхностного и подземного водосборов. Поверхностный водосбор представляет собой участок поверхности, с которого поступают воды в водный объект, а подземный водосбор образует толщи почвогрунтов. Как правило, подземный и поверхностный водосборы по площади не совпадают. Однако из-за больших затруднений в определении границы подземного водосбора обычно в расчетах размеры бассейна принимают в пределах только поверхностного водосбора и вследствие этого не делают различия между терминами «бассейн» и «водосбор» или объединяют их термином «водосборный бассейн» [1].

Формирование водосборных бассейнов задействовано в различных сферах науки и деятельности человека, не взаимосвязанных между собой, поэтому создание речной сети происходило разными способами на протяжении многих лет.

Ранее для создания бассейнов речной сети были использованы методы построения бассейнов, основанные на математических подходах без использования компьютерных технологий.

Альтернативой классическим подходам в исследовании водосборных бассейнов могут служить методы, основанные на анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности, как правило, относящееся к поверхности земли. Точность этих данных определяется главным образом разрешением (расстоянием между опорными точками), средствами современных геоинформационных систем (ГИС), получивших развитие и ставших широкодоступными пользователям в 90-х годах XX века. Появление ЦМР достаточно высокого пространственного разрешения, а также рост вычислительных возможностей персональных компьютеров способствовали развитию в геоинформационных системах функционала по анализу гидрологических и морфометрических характеристик территорий.

Задача определения границ водосборных бассейнов и их площади в «докомпьютерную эпоху» решалась разными методами. В частности, рассматривались следующие подходы:

– Метод планиметрирования.

Рекомендуется при определении площади больших бассейнов. Для этой цели применяется планиметр. Обвод площади производится плавно, без перерыва, с одинаковой скоростью.

– Графический способ.

Площадь водосборного бассейна разбивается на ряд простейших геометрических фигур (треугольников, прямоугольников, квадратов и т. п.), определяется площадь каждой фигуры в соответствующем масштабе карты или плана, и затем эти площади суммируются.

В представленной работе были использованы методы создания бассейнов речной сети с помощью ПО ГИС, что в разы уменьшает и ускоряет работу создания карты речных бассейнов.

Данная работа может быть использована в широком спектре задач. Она касается экологии, по рекам можно определить загрязнения, идущие от заводов. Общее состояние чистоты воды в различных частях Енисея. Общее состояние здоровья рыб и всех водных обитателей.

#### **Описание инструментов, материалов и методов, использовавшихся в работе**

В данной работе в качестве источника информации для создания ЦМР были использованы данные высотной съемки SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) с пространственным разрешением 30 м/пиксел.

Последующая обработка высотных данных осуществлялась средствами Quantum GIS 2.14.12 и MapInfo, позволяющей проводить построения гидрографической сети и получение ее морфометрических характеристик с использованием расширенного набора средств анализа, применяемой для создания итогового картографического материала [2]. Для формирования бассейнов использовался метод `r.watershed` программы GRASS GIS [3]. Данный алгоритм предполагает обработку цифровой модели рельефа (ЦМР) функциями гидрологического моделирования, которые встроены в расширение GRASS GIS `r.watershed` [4].



**Рис. 1. Алгоритм определения водосборного бассейна реки**

Для описания информации бассейнов рек использовалась программа Microsoft Office Excel. В ней была создана таблица с уникальными идентификаторами рек, бассейнов и бассейнов родителей рек, в дальнейшем данная таблица Excel была экспортирована в Quantum GIS, по окончании создания таблицы был вручную вписан 461 бассейн.

### Технологии создания геоинформационной модели бассейна

Ниже представлена блок-схема поэтапного создания карты бассейнов рек.



Рис. 2. Блок-схема этапов создания карты бассейнов рек

Первый этап работы был основан на разделении одного фрагмента SRTM данных на 14 более мелких частей для ускорения работы алгоритма r.watershed. Это было произведено в программе QuantumGIS с помощью инструментов оцифровки. На втором этапе был применен алгоритм r.watershed к ЦМР данным. Далее следует этап формирования бассейнов из полубассейнов, получившихся на этапе работы алгоритма r.watershed. Все описанные этапы были реализованы в программе QuantumGIS. Далее перешли в ПО MapInfo для объединения частей в одну общую карту бассейнов рек. Далее с конечным слоем в программе QGIS провели завершающую коррекцию слоя, в программе Microsoft Excel создали таблицу с уникальными идентификаторами рек, бассейнов и бассейнов родителей рек. Конечным этапом работы является программа принадлежности водосборных бассейнов к отдельным рекам, в ходе работы программы было создана таблица с числом строк 4091.

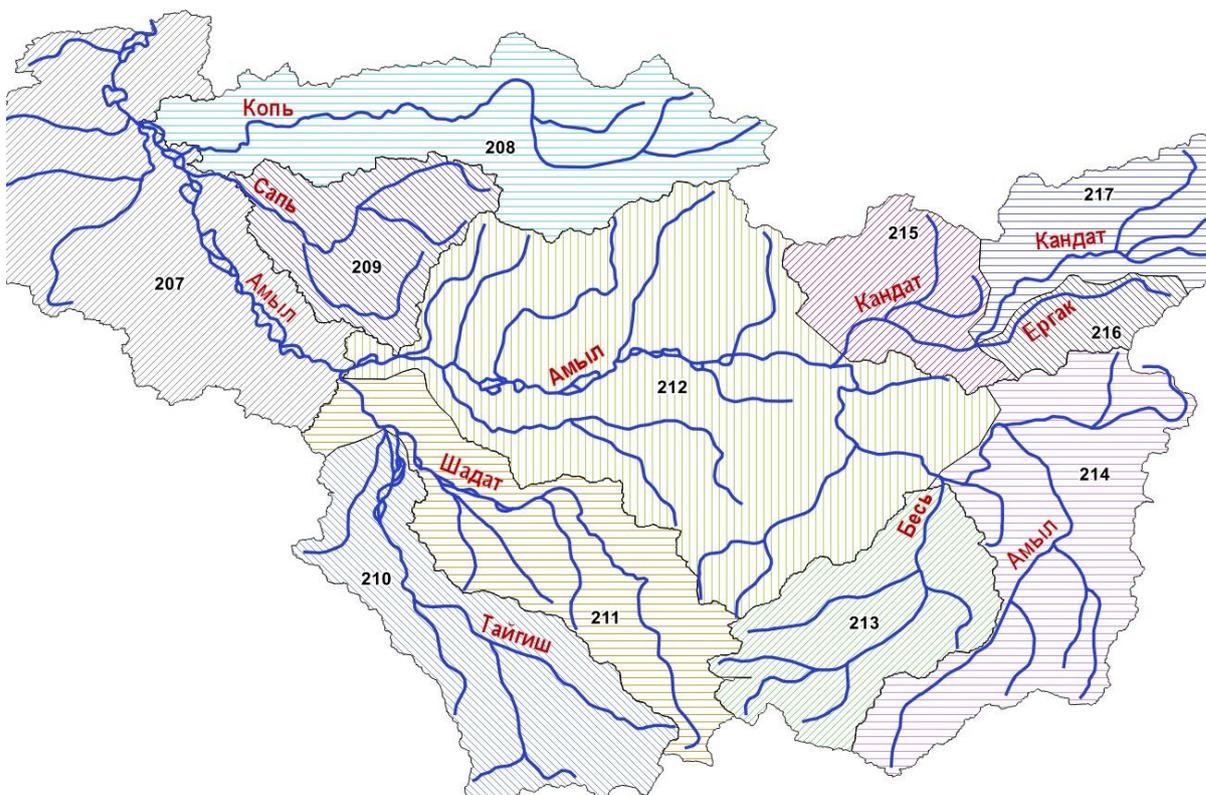


Рис. 3. Схема речной сети с водосборными бассейнами. Числа на схеме – уникальные идентификаторы водосборных бассейнов

Результат работы проиллюстрирован на рис. 3. Представлена иерархическая модель данных водосборных бассейнов с подклассами бассейнов рек. Показан водосборный бассейн р. Амыл с номером бассейна 212, в него впадает бассейн р. Кандат с номером 215 и бассейн р. Ергак с номером 216.

### **Результаты работы**

Результатом работы стала модель данных с иерархией бассейнов рек, которая позволяет анализировать направление траектории течения, решать разные прикладные задачи на основе пронумерованных соответствующим образом подбассейнов. Например, можно отследить перемещение загрязнения воды от отдельного ручья через последовательность иерархически вложенных подбассейнов рек – притоков до устья Енисея. На основе иерархической модели данных можно анализировать, в каком направлении будут двигаться выбросы по речной сети.

Самостоятельную ценность имеет сформированный набор геоданных по водосборным бассейнам юга Красноярского края.

### **Заключение**

В настоящей работе рассмотрена и применена на практике технология формирования сети водосборных бассейнов, основанная на методах геоинформационных систем. Создан набор данных на территории юга Красноярского края, включающий 478 бассейнов отдельных рек, в том числе подбассейнов. Полученные результаты могут быть использованы для решения различных научных и прикладных задач.

### **Список литературы**

1. Горбачев В. П., Кормильцына Л. В. Определение характеристик водосборного бассейна и расчетного расхода стока: метод. указания к практическим занятиям и дипломному проектированию малых дорожных водопропускных сооружений для студентов специальности 291000 «Автомобильные дороги и аэродромы» заочной и очной форм обучения. Изд-во ХГТУ, 2003. 35 с.
2. Свободная географическая информационная система с открытым кодом QGIS. URL: <http://qgis.org>.
3. Metz M., Mitasova H., Harmon R. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search, Hydrol. Earth Syst. Sci. V. 15. P. 667–678.
4. R. Watershed GRASS hydrological module reference manual. URL: <https://grass.osgeo.org/grass73/manuals/r.watershed.html>.

**А. Н. Шихов, А. В. Быков**

Географический факультет Пермского государственного национального  
исследовательского университета, Пермь  
e-mail: and3131@inbox.ru

## **АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ СМЕРЧЕЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ**

Рассмотрены синоптические и мезомасштабные условия возникновения восьми случаев сильных смерчей и торнадо-вспышек (tornado outbreaks) над территорией России в 2007–2016 годы. Для моделирования глубокой конвекции использована мезомасштабная модель атмосферы WRF. Валидация результатов выполнена с применением данных о пути смерчей, полученных на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова по данным космической съемки. Также для валидации результатов моделирования мезомасштабных конвективных систем использованы снимки Terra/Aqua MODIS. Показано, что в ряде случаев модель воспроизводит развитие конвективных штормов с мезоциклонами, в которых сформировались смерчи.

*Ключевые слова:* смерчи, мезомасштабные конвективные системы, модель WRF, ветровалы, данные дистанционного зондирования.

### **Введение**

Смерчи представляют собой одно из наиболее редких и опасных явлений погоды, наблюдающихся в умеренных широтах. Большинство смерчей на территории России характеризуются малой интенсивностью (F0–F1). Основной ущерб связан с сильными смерчами, которые случаются достаточно редко. Наиболее сильные смерчи за всю историю наблюдений в России были зафиксированы 9 июня 1984 года. Данное событие известно как *1984 Ivanovo Tornado Outbreak* или *1984 Soviet Union Tornado Outbreak*, его детальный анализ представлен в работах (Васильев и др., 1985; Finch & Vikos, 2012).

В последние годы сильные смерчи на территории России, вызвавшие человеческие жертвы и масштабные разрушения, были зафиксированы в Московской области (3 июня 2009 и 13 июля 2016), а также в Предуралье 29 августа 2014 года. Эти случаи привлекли большое внимание со стороны научного сообщества и средств массовой информации. В частности, исследованию условий формирования сильного смерча на севере Башкортостана 29 августа 2014 года посвящены работы (Чернокульский и др., 2015; Новицкий и др., 2016; Дмитриева, Песков, 2016). Также в последние годы в России наблюдался ряд других сильных смерчей и торнадо-вспышек в малонаселенных районах, которые не вызвали больших материальных потерь за исключением ущерба для лесного хозяйства (Шихов, Быков, 2015). Таким образом, исследование условий возникновения сильных смерчей на территории России и оценка возможностей их прогнозирования остается весьма актуальной задачей.

В последние десятилетия в странах, где смерчи наблюдаются часто и наносят значительный ущерб, изучаются возможности их прогнозирования с помощью мезомасштабных моделей атмосферы (Xue et al., 2014; Das et al., 2016; Taszarek et al., 2016). Большое распространением в мировом научном сообществе получила негидростатическая модель WRF (Weather Research and Forecasting), подробное описание которой приведено в работе (Skamarock et al., 2008). Модель WRF в диагностическом и прогностическом режимах применяется для моделирования условий возникновения торнадо, а также формирования и эволюции мезомасштабных

систем глубокой конвекции, генерирующих смерчи. В отдельных работах приведены примеры успешного воспроизведения интенсивности смерча (Xue et al., 2014).

Модель WRF ранее также применялась для изучения условий возникновения некоторых случаев смерчей в России. На основе выходных данных модели рассчитывались параметры конвективной неустойчивости атмосферы при возникновении смерчей в 2013 году в Обнинске и в 2014 году в Предуралье (Новицкий и др., 2016). В работах (Шихов, Быков, 2015; Дмитриева, Песков, 2016) описаны численные эксперименты с моделью WRF, выполненные с целью моделирования эволюции мезомасштабных конвективных систем со смерчами.

Целью настоящей работы является исследование синоптических и мезомасштабных условий возникновения нескольких случаев сильных смерчей и tornado outbreaks, наблюдавшихся на территории России в 2007–2016 годы. Для моделирования возникновения и эволюции мезомасштабных конвективных систем с мезоциклонами использована негидростатическая модель атмосферы WRF.

### Исходные данные

Для анализа были выбраны 8 случаев смерчей и торнадо-вспышек, наблюдавшихся на территории России с 2007 по 2016 год (табл. 1). Основными источниками данных об исследуемых случаях смерчей была Европейская база данных опасных явлений погоды (ESWD; Dotzek et al., 2009) и данные о ветровальных нарушениях лесного покрова, вызванных прохождением смерчей. В базе данных ESWD приведены подробные сведения о смерчах 03.06.2009 в Краснозаводске (Московская область), 29.08.2014 в Янауле и 13.07.2016 в Пуршево (Московская область). Интенсивность перечисленных смерчей оценивается как F3 по шкале Фуджита. Остальные случаи смерчей были выявлены на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова. Для идентификации ветровалов использовались данные Global Forest Change Map (Hansen et al., 2013), полученные по многолетнему ряду спутниковых снимков LANDSAT с детальностью 30 м, а также космические снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. Для получения более полной информации о случаях смерчей и сопровождавших их опасных явлений погоды были использованы данные сети метеостанций, отчеты о нанесенном ущербе, фотографии и видеозаписи смерчей и их последствий.

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых случаев смерчей и торнадо-вспышек

№ п/п	Дата	Координаты (начало)	Координаты (конец)	Число смерчей	Максимальная длина и ширина пути смерча, км	Общая площадь ветровала, га	Интенсивность по шкале Фуджита (ESWD)
1	23.06.2007	61,22 N 60,47 E	64,14 N 58,47 E	6	11,9/0,8	660	–
2	26.06.2008	60,94 N 46,25 E	61,11 N 46,12 E	2	22,1/2,0	1457	–
3	03.06.2009	56,42 38,24	56,88 38,73	2	27/0,7	302	F3
4	07.06.2009	59,39 N 53,31 E	61,61 N 55,49 E	9	50/0,9	2404	–
5	12.06.2010	57,93 N 39,05 E	56,92 N 44,83 E	3	21/0,7	490	F2
6	07.08.2012	59,56 N 34,69 E	60,17 N 35,41 E	2	80/1,0	1583	–
7	29.08.2014	55,98 N, 54,36 E	56,26 N, 54,95 E	1	47/0,6	143	F3
8	13.07.2016	55,58 N, 35,89 E	55,67 N, 36,56 E	1	44/0,57	414	F3

В качестве основного инструмента исследований была использована мезомасштабная негидростатическая модель атмосферы WRF v 3.6.1. (Skamarock et al., 2008). Модель запускалась в режиме прямого моделирования конвекции с шагом сетки 9 и 3 км. При таком пространственном разрешении явное моделирование смерча невозможно. Однако модель позволяет воспроизвести возникновение и развитие мезомасштабной конвективной системы, с которой был связан смерч, в том числе развитие мезоциклона (Das et al., 2016). Расчеты с шагом 9 км были выполнены для всех случаев смерчей, а с шагом 3 км – только тогда, когда модель успешно воспроизводила глубокую конвекцию при расчете с низким разрешением. В качестве начальных и граничных условий для модели WRF использовались данные реанализа NCEP CFSR (Coupled Forecast System reanalyses) и GFSR (Global forecast system reanalyses) с шагом сетки 0,5°, а также (для случая смерча 13.07.2016 г.) и прогноз NCEP/GFS (с шагом сетки 0,5°).

Оценка качества результатов моделирования была выполнена на основе следующих критериев:

- сопоставлением времени возникновения и пути перемещения мезоциклона по модели WRF с фактическим треком смерча (выявленным на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова).
- сопоставлением положения и времени прохождения зон активной конвекции по модели WRF и по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS.
- сопоставлением фактической скорости порывов ветра по модели и по данным метеостанций.

Некоторые результаты оценки достоверности моделирования глубокой конвекции с применением спутниковых данных MODIS (по температуре верхней границы облаков) приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

**Результаты моделирования некоторых характеристик мезомасштабных конвективных систем со смерчами**

Дата	Время	Минимальная температура ВГО, °С (WRF)	Минимальная температура ВГО, °С (MODIS)	Максимальная расчетная отражаемость, DBz (WRF)	Расстояние между расчетным и фактическим положением центра МКС, км
23.06.2007	15.50	-60/-*	-62/-	59/-	180/-
23.06.2007	17.30	-58/-	-62/-	52/-	100/-
26.06.2008	10.20	-61/-53	-57	58/50	90/30
03.06.2009	19.10	-51/-59	-61	45/46	50/45
07.06.2009	09.25	-61/-51	-63	52/43	80/50
12.06.2010	10.45	-58/-61	-64	57/59	220/200
07.08.2012	19.05	-58/-	-62/-	52	50/-
13.07.2016	19.30	-56/-57	-61	50/56	120/0

\* В числителе и в знаменателе показаны значения, оцененные по модели WRF с использованием в качестве начальных условий данных реанализа CFS и GFS соответственно (с пространственным разрешением 0.5°), значок “\*” соответствует отсутствию данных.

**Основные результаты**

Синоптические условия формирования рассмотренных сильных смерчей и tornado outbreaks достаточно разнообразны. Смерчи наблюдались в центральных частях глубоких южных, юго-западных и западных циклонов или активных волновых возмущений, часто вблизи точки окклюзии полярного фронта. Общими особенностями являются высокая скорость ветра в средней тропосфере, сильный вертикальный сдвиг ветра на фоне умеренной или сильной конвективной неустойчивости воздушной массы.

Результаты моделирования с помощью модели WRF в основном подтверждают ранее известные (Xue et al., 2014; Das et al., 2016) выводы о применимости модели для моделирования и краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций. Прогностическое значение имеют как рассчитанные по модели WRF индексы смерчеопасности (прежде всего SRH и EHI), так и результаты прямого моделирования глубокой конвекции.

В трех рассмотренных случаях модель воспроизводит формирование конвективных штормов с мезоциклонами, траектории прохождения которых совпадают с фактическими треками смерчей. Смоделированные мезоциклоны хорошо выражены в полях относительной завихренности, приземного давления и ветра. Им соответствуют зоны высокой отражаемости, интенсивных осадков и ветра с порывами до 25 м/с. Результаты расчета индекса EHI по данным модели WRF также позволяют выделить смерчеопасные зоны, соответствующие экстремально высоким значениям EHI. При запуске модели с высоким пространственным разрешением (3 км) ни один мезоциклон не воспроизводится. Однако поля осадков, радиолокационной отражаемости и скорости ветра детальнее, чем при шаге 9 км.

Оценка качества моделирования выполнена на основе объектно-ориентированного подхода, путем сопоставления траектории прохождения мезомасштабных конвективных систем (МКС) с фактическими треками смерчей, а также с данными Terra/Aqua MODIS о температуре верхней границы облаков. Качество результатов моделирования в существенной степени зависит от выбора начальных условий. Получить однозначный вывод о том, какие начальные данные для модели WRF являются оптимальными при прогнозе МКС со смерчами, не представляется возможным. Наибольшая неопределенность возникает при прогнозе пространственного положения МКС и отдельных конвективных штормов. Характеристики интенсивности конвекции (температура верхней границы облаков, максимальная отражаемость, скорость ветра при порывах) воспроизводятся более достоверно, чем место и время возникновения опасных явлений.

*Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00245-а).*

#### **Список литературы**

1. Васильев А. А., Песков Б. Е., Снитковсей А. И. Смерчи, шквалы и град 8–9 июня 1984 г. // Метеорология и гидрология. 1985. № 1. С. 1–9.
2. Дмитриева Т. Г., Песков Б. Е. Синоптические условия, наукастинг и модельные прогнозы сильных шквалов и смерчей в Башкирии 1 июня 2007 г. и 29 августа 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 16–29.
3. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации / М. А. Новицкий, Ю. Б. Павлюков, Б. Я. Шмерлин, С. В. Махнорьлова, Н. И. Серебрянник, С. А. Петриченко, Л. А. Терев, О.В. Калмыкова // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30–40.
4. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. / А. В. Чернокульский, М. В. Курганский, Д. И. Захарченко, И. И. Мохов // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 29–37.
5. Шихов А. Н., Быков А. В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 124–133.
6. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, I. A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice and J. R. G. Townshend // SCIENCE. 2013. V. 342. P. 850–853.
7. Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model / M. K. Das, S. Das, M. A. Chowdhury, S. Karmakar // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. V. 7(5), P. 1577–1599.

8. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD / N. Dotzek, P. Groenemeijer, B. Feuerstein, A. M. Holzer // Atmospheric Research. 2009. Vol. 93. P. 575–586.
9. Finch J., Bikos D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // Electronic Journal of Severe Storms Meteorology. 2012. V. 7. P. 1–28.
10. Skamarock W., Klemp J, Dudhia J, Gill D, Barker D. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech., Note 2008. NCAR/TN-475+STR.
11. An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation / M. Taszarek, B. Czernecki, S. Walczakiewicz, A. Mazur, L. Kolendowicz // Atmospheric Research. 2016. Vol. 178–179. P. 367–379.
12. Xue M., Hu, M., Schenkman A. D. Numerical prediction of the 8 may 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data // Weather and Forecasting. 2014. V. 29(1). P. 39–62.

## СПИСОК АВТОРОВ

Абрамовских Л. Н.	178	Евстратова Л. Г.	12
Александровский Д. А.	251	Егоров В. А.	32
Алымбаева Ж. Б.	187	Елкина Е. С.	24
Андросенко О. И.	74	Ермаков В. В.	225
Архипкин О. П.	3	Жарикова М. В.	194
Асмарян Ш. Г.	183	Жарникова М. А.	295
Ауржанаев А. А.	187, 295	Замятин А. В.	157
Бабенко А. В.	178	Захватов М. Г.	127
Бабой С. Д.	191	Зеньков И. В.	229
Балашов И. В.	32	Злобина Т. Г.	106
Бандеев О. Е.	78, 137	Зотин А. Г.	109, 112
Барановский Н. В.	194	Иванова Ю. Д.	205
Баркова О. Р.	225	Им С. Т.	197, 235
Барталев С. А.	29, 37	Имашев С. А.	28
Барталев С. С.	37	Кабанов А. А.	239
Бекмухамедов Б. Э.	3	Каранина С. Ю.	194
Беликова М. Ю.	194	Карпов А. А.	243
Белов С. Ю.	82	Картушинский А. В.	116
Блинов А. В.	57	Карюкина А. А.	275
Болычев С. А.	66	Качаев А. В.	120
Ботвич И. Ю.	205	Кашкин В. Б.	217
Бран А. А.	225	Кашницкий А. В.	32
Брежнев Р. В.	36	Кобец Д. А.	49
Бриль А. А.	32	Ковалёв А. В.	123
Бронов С. А.	40	Козодеров В. В.	18
Будник У. А.	197	Коновалова Т. И.	247
Бурцев М. А.	32	Кононова Н. А.	205
Буряченко В. В.	86	Косторная А. А.	127
Бучнев А. А.	7	Кочергин Г. А.	255
Быков А. В.	311	Кочнев В. А.	171, 251
Бычков И. В.	70	Краснощеков К. В.	217
Варламова Е. В.	201	Крашенинникова Ю. С.	24
Волкова А. И.	205	Кругляков А. В.	109
Волкова О. В.	49	Куликова Ю. Д.	141
Высоцкая Г. С.	205	Куприянов М. А.	255
Гармаев Е. Ж.	187, 295	Курако М. А.	109
Гаченко А. С.	70	Кушнырь О. В.	263
Голубев Д. В.	191	Ларько А. А.	116
Григорьева О. В.	209	Лупян Е. А.	24, 32
Грищенко М. Ю.	213	Маглинец Ю. А.	36
Гук А. П.	12, 90	Мазуров А. А.	32, 49
Дамов М. В.	112	Маргарян В. Г.	267
Дементьев А. О.	18	Марков А. В.	209
Демьяненко Т. Н.	94	Матвеев А. М.	49
Дергунов А. В.	217	Матузко А. К.	271
Дмитренко Н. О.	62	Матыцин В. А.	57
Дмитриев Е. В.	18	Миков Л. С.	131
Добронец Б. С.	98	Миронов В. А.	275
Долгобородов Л. Е.	102	Митьков А. С.	134
Дунаева Е. А.	221	Михалев А. О.	57

Молокова Н. В.	74	Сибгатулин В. Г.	239
Морозов В. А.	52	Сидорова В. С.	167
Морозова О. Г.	287	Симонов К. В.	109
Мурадян В. С.	183	Содномов Б. В.	187, 295
Никулин Н. А.	40	Соколов А. А.	18
Ноговицына М. А.	247	Соловьев В. С.	201, 303
Носков М. Ф.	134	Сорокин А. В.	175
Овсепян А. А.	183	Столяренко А. А.	134
Одинцов Р. В.	217	Стыценко Ф. В.	32
Оксюкевич А. Ю.	24, 32	Сутырина Е. Н.	301
Пантелеев К. А.	74	Тепаносян Г. О.	183
Паршин А. В.	52, 57	Терентьева В. В.	209
Пахирка А. И.	112	Тимофеев Д. Н.	171
Перунов А. А.	149	Тихонова Я. В.	40
Пестунов И. А.	153	Токарева О. С.	123
Плотников Д. Е.	24	Толпин В. А.	24
Полищук Ю. М.	255	Томшин О. А.	303
Попова О. А.	98	Труханов Е. В.	149
Просекин С. Н.	57	Тряпкин Д. С.	62
Прошин А. А.	32, 49	Турчанинова Е. С.	307
Пятаева А. В.	137, 141	Уваров И. А.	32
Пяткин В. П.	7	Устюхина А. В.	213
Пяткин Ф. В.	127	Федоров Р. К.	70
Радчук Д. В.	279	Фомин С. В.	175
Раевич А. П.	144, 147	Харламов Д. В.	175
Раевич К. В.	229	Хмельков А. Е.	70
Ромасько В. Ю.	283	Хрусталев В. А.	134
Рубанович М. Г.	134	Цаплин С. В.	66
Рублева Т. В.	217	Цыдыпов Б. З.	187, 295
Рубцов А. В.	149	Чернышёв Е. В.	97
Ружников Г. М.	70	Чупрова В. В.	89
Рылов С. А.	153	Шевырногов А. П.	205
Савельев А. С.	287	Шерстнев В. С.	194
Сагатдинова Г. Н.	3	Шихов А. Н.	311
Сагателян А. К.	183	Шляхова М. М.	85
Саидов А. Г.	209	Ягунов М. Н.	191
Саринова А. Ж.	157	Якубайлик О. Э.	307
Сафонова А. Н.	161	Янкович Е. П.	194
Сахарова Е. Ю.	127	Янкович К. С.	194
Свердлик Л. Г.	28, 291		
Селютина Ю. В.	279	Kuular Kh. B.	259
Сенько К. С.	32		

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ .....</b>	<b>3</b>
<i>Архипкин О. П., Бекмухамедов Б. Э., Сагатдинова Г. Н.</i> Возможности применения радарных данных Sentinel-1 при проведении космического мониторинга ЧС .....	3
<i>Бучнев А. А., Пяткин В. П.</i> Классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли .....	7
<i>Гук А. П., Евстратова Л. Г.</i> Проблемы и перспективы развития алгоритмов автоматизированного дешифрирования леса по многоспектральным аэрокосмическим снимкам .....	12
<i>Дмитриев Е. В., Козодеров В. В., Дементьев А. О., Соколов А. А.</i> Методика классификации гиперспектральных изображений с использованием адаптивной оптимизации спектральных каналов .....	18
<i>Лулян Е. А., Барталев С. А., Толпин В. А., Плотников Д. Е., Елкина Е. С., Крашенинникова Ю. С., Оксюкевич А. Ю.</i> Возможности использования современных спутниковых технологий ДДЗ для решения региональных задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов .....	24
<i>Свердлик Л. Г., Имашев С. А.</i> Спутниковый мониторинг аномалий температуры атмосферы в сейсмически активных регионах Азии .....	28
<b>Секция «СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» .....</b>	<b>32</b>
<i>Барталев С. А., Лулян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. С., Бурцев М. А., Бриль А. А., Егоров В. А., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Оксюкевич А. Ю., Прошин А. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Уваров И. А.</i> Возможности создания региональных систем комплексного дистанционного мониторинга лесов .....	32
<i>Брежнев Р. В., Маглинец Ю. А.</i> Организация взаимодействия конечных пользователей с системой агромониторинга .....	36
<i>Бронов С. А., Никулин Н. А., Тихонова Я. В.</i> Автоматизация сквозного проектирования исполнительных электроприводов для космических аппаратов ДЗЗ .....	40
<i>Волкова О. В.</i> Повышение доступности информационных продуктов и услуг на основе российских данных ДЗЗ широкому кругу потребителей .....	44
<i>Кобец Д. А., Матвеев А. М., Прошин А. А., Мазуров А. А.</i> Контроль работоспособности и управление распределенными комплексами автоматической потоковой обработки спутниковых данных .....	49

<i>Морозов В. А., Паршин А. В.</i> О высших секретах летного мастерства при решении геологических задач с помощью БПЛА в сложных ландшафтных условиях .....	52
<i>Паршин А. В., Блинов А. В., Михалев А. О., Матвеев В. А., Просекин С. Н.</i> Низковысотные дистанционные зондирования Земли с БПЛА комплексом мультиспектральных и геофизических методов – новая методология поисков полезных ископаемых .....	57
<i>Трякин Д. С., Дмитренко Н. О.</i> GEOVI – платформа для создания систем поддержки принятия решений на основе данных ДЗЗ .....	62
<i>Цаплин С. В., Большев С. А.</i> Оптико-электронный телескопический комплекс микроспутника .....	66
<i>Бычков И. В., Хмельнов А. Е., Ружников Г. М., Федоров Р. К., Гаченко А. С.</i> ГИС «Адресный план города Иркутска» .....	70
<b>Секция «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ» .....</b>	<b>74</b>
<i>Андросенко О. И., Пантелеев К. А., Молокова Н. В.</i> Автоматизация процесса обработки геофизических данных, полученных методом бесконечно длинного кабеля .....	74
<i>Бандеев О. Е.</i> Исследование методов и разработка алгоритмов обнаружения пламени на открытых пространствах по видеопоследовательностям .....	78
<i>Белов С. Ю.</i> Аппаратные средства дистанционной диагностики рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн .....	82
<i>Буряченко В. В.</i> Реконструкция границ изображения при стабилизации на основе разделения кадра на фон и передний план .....	86
<i>Гук А. П., Шляхова М. М.</i> Анализ эффективности применения метода главных компонент при использовании непараметрического статистического подхода к дешифрированию снимков .....	89
<i>Демьяненко Т. Н., Чупрова В. В.</i> Использование космоснимков при картографировании структуры почвенного покрова в красноярской лесостепи .....	94
<i>Добронец Б. С., Попова О. А.</i> Кусочно-полиномиальные модели для агрегации и регрессионного анализа в задачах ДЗЗ .....	98
<i>Долгобородов Л. Е., Чернышев Е. В.</i> Использование результатов космической деятельности в интересах развития субъектов Российской Федерации .....	102

<i>Злобина Т. Г.</i> Использование космических снимков для планирования деятельности в сфере экологического надзора и мониторинга с учетом особенностей территории .....	106
<i>Зотин А. Г., Курако М. А., Симонов К. В., Кругляков А. В.</i> Сегментация и анализ границ зон затопления от катастрофических наводнений	109
<i>Зотин А. Г., Пахирка А. И., Дамов М. В.</i> Сравнение алгоритмов получения точечных особенностей для системы сопоставления кадров видеопоследовательности .....	112
<i>Картушинский А. В., Ларько А. А.</i> Обработка спутниковых данных для моделирования и оценки динамики поверхностных градиентных зон Земли .....	116
<i>Качаев А. В.</i> Модель описания структуры дендроклиматических данных .....	121
<i>Ковалёв А. В., Токарева О. С.</i> Разработка программного обеспечения для оценки динамики состояния растительного покрова с использованием данных спутникового мониторинга Земли .....	123
<i>Косторная А. А., Захватов М. Г., Сахарова Е. Ю., Пяткин Ф. В.</i> Методика распознавания облачности и восстановления ее количественных характеристик по спутниковым данным .....	127
<i>Миков Л. С.</i> Современные методы обработки радарных изображений .....	131
<i>Носков М. Ф., Хрусталева В. А., Рубанович М. Г., Митьков А. С., Столяренко А. А.</i> Повышение информативности анализа черно-белых аэрофотоснимков методом цветового кодирования .....	134
<i>Пятаева А. В., Бандеев О. Е.</i> Сегментация пламени видеопоследовательностям .....	137
<i>Пятаева А. В., Куликова Ю. Д.</i> Алгоритмическая компенсация влияния атмосферных осадков и недостаточной освещенности при обнаружении дыма по видеоданным .....	141
<i>Раевич А. П.</i> Комплексный показатель оценки решения сложных задач учащимися на примере дешифрации космоснимков .....	144
<i>Раевич А. П.</i> Методы численного вероятностного анализа в задачах дешифрации данных дистанционного зондирования Земли .....	147
<i>Рубцов А. В., Труханов Е. В., Перунов А. А.</i> Применение дистанционной съемки сверхвысокого разрешения в определении некоторых характеристик хвойных древостоев .....	149
<i>Рылов С. А., Пестунов И. А.</i> Определение площади озер по спутниковым изображениям с использованием субпиксельного анализа смешанных пикселей .....	143

<i>Саринова А. Ж., Замятин А. В.</i> Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с использованием математической обработки и учетом междиапазонной корреляции .....	157
<i>Сафонова А. Н.</i> Классификация сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли с использованием метода Гаусса .....	161
<i>Сидорова В. С.</i> Автоматизированное сравнение кластерных карт многоспектральных изображений Земли, полученных дистанционными методами, и таксационных карт леса .....	167
<i>Тимофеев Д. Н., Кочнев В. А.</i> Методика и результаты анализа регионального события Тунгусского взрыва 30 июня 1908 года .....	171
<i>Фомин С. В., Сорокин А. В., Харламов Д. В.</i> Калибровка сигналов ГЛОНАСС и GPS в мониторинге земных покровов .....	175
<b>Секция «МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ» .....</b>	<b>178</b>
<i>Абрамовских Л. Н., Бабенко А. В.</i> Роль агромониторинга с использованием космических технологий в оценке кредитоспособности сельскохозяйственных предприятий .....	178
<i>Асмарян Ш. Г., Мурадян В. С., Тепаносян Г. О., Овсепян А. А., Сагателян А. К.</i> Применение спутниковых снимков Landsat 8 OLI/TIRS для оценки экологического состояния воды озера Севан в Армении .....	183
<i>Аюржанаев А. А., Содномов Б. В., Алымбаева Ж. Б., Цыдытов Б. З., Гармаев Е. Ж.</i> Фенологические флуктуации степных сообществ Забайкалья .....	187
<i>Бабой С. Д., Голубев Д. В., Ягунов М. Н.</i> Мониторинг массового размножения сибирского шелкопряда на территории Красноярского края .....	191
<i>Барановский Н. В., Беликова М. Ю., Каранина С. Ю., Янкович Е. П., Янкович К. С., Шерстнев В. С., Жарикова М. В.</i> Технологии дистанционного зондирования и геомониторинга для оценки лесной пожарной опасности от гроз .....	194
<i>Будник У. А., Им С. Т.</i> Динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда на северной границе его обитания в Центральной Сибири по данным ДЗЗ и ГИС ...	197
<i>Варламова Е. В., Соловьев В. С.</i> Исследование вариаций NDVI и фенологических параметров растительности Восточной Сибири по данным многолетних спутниковых наблюдений .....	201
<i>Высоцкая Г. С., Волкова А. И., Ботвич И. Ю., Иванова Ю. Д., Кононова Н. А., Шевырногов А. П.</i> Использование данных полевой спектрометрии для мониторинга биоразнообразия травянистых сообществ .....	205

<i>Григорьева О. В., Марков А. В., Саидов А. Г., Терентьева В. В.</i> Определение основных классов лесных формаций по серии разносезонных данных много- и гиперспектральной съемки .....	209
<i>Грищенко М. Ю., Устюхина А. В.</i> Картографирование проявлений вулканической и поствулканической активности на основе дешифрирования тепловых космических снимков .....	213
<i>Дергунов А. В., Кашкин В. Б., Краснощеков К. В., Одинцов Р. В., Рублева Т. В.</i> Изучение озоновых аномалий над пиковыми сейсмоактивными зонами сильных землетрясений по данным дистанционного зондирования .....	217
<i>Дунаева Е. А.</i> Некоторые аспекты использования снимков среднего разрешения для решения задач сельскохозяйственного мониторинга .....	221
<i>Ермаков В. В., Баркова О. Р., Бран А. А.</i> Двухуровневый мониторинг состояния объектов размещения нефтесодержащих отходов .....	225
<i>Зеньков И. В., Раевич К. В.</i> Использование ресурсов дистанционного зондирования в оценке состояния нарушенных земель угольными разрезами Магаданской области .....	229
<i>Им С. Т.</i> Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в Енисейском районе Красноярского края .....	235
<i>Кабанов А. А., Сибгатулин В. Г.</i> Возможности дистанционного зондирования земли при сейсмическом мониторинге и оценке сейсмической опасности .....	239
<i>Карпов А. А.</i> Выявление вырубок и оценка лесовосстановления по снимкам среднего разрешения с помощью преобразования Tasseled Cap .....	243
<i>Коновалова Т. И., Ноговицына М. А.</i> Информационные возможности космических снимков для исследования геосистем .....	247
<i>Кочнев В. А., Александровский Д. А.</i> О формировании потоков жидкости на поверхности и в ядре планет под действием приливных сил .....	251
<i>Куприянов М. А., Кочергин Г. А., Полищук Ю. М.</i> Использование космических снимков Landsat 8 для мониторинга объёмов сжигания попутного газа на месторождениях нефтедобывающих регионов .....	255
<i>Kuular Kh. B.</i> Climate change in the Tyva Republic, Russia .....	259
<i>Кушнырь О. В.</i> Возможности обеспечения российскими данными ДЗЗ лесного хозяйства с учетом изменений в лесном кодексе Российской Федерации .....	263

<i>Маргарян В. Г.</i> Анализ и оценка закономерностей временной динамики изменения туманов как опасных метеорологических явлений на территории Республики Армения .....	267
<i>Матушко А. К.</i> Определение температуры поверхности воды по данным дистанционного зондирования Земли .....	271
<i>Миронов В. А., Карюкина А. А.</i> Исследование скоростных характеристик технически сложной геологической среды по данным геомониторинга .....	275
<i>Радчук Д. В., Селютина Ю. В.</i> Моделирование поверхности затопления территории на основе данных о высотах, полученных из ЦМР .....	279
<i>Ромасько В. Ю.</i> Мониторинг заснеженности речных бассейнов по данным SUOMI NPP .....	283
<i>Савельев А. С., Морозова О. Г.</i> Изучение температуры поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 по данным Landsat TIRS .....	287
<i>Свердлик Л. Г.</i> Особенности многолетней изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля над регионами Центральной Азии .....	291
<i>Содномов Б. В., Аюржанаев А. А., Цыдытов Б. З., Жарникова М. А., Гармаев Е. Ж.</i> Оценка динамики лесов, обусловленной антропогенным воздействием (на примере Заиграевского лесничества, Республика Бурятия) .....	295
<i>Сутырина Е. Н.</i> Межгодовая изменчивость характеристик ледово-термического режима озера Байкал по данным радиометра AVHRR .....	299
<i>Томишин О. А., Соловьев В. С.</i> Особенности лесопожарной активности в мерзлотном регионе Восточной Сибири .....	303
<i>Турчанинова Е. С., Якубайлик О. Э.</i> Построение иерархической модели водосборов речной сети .....	307
<i>Шихов А. Н., Быков А. В.</i> Анализ и моделирование условий возникновения сильных смерчей над территорией России .....	311
Список авторов .....	316

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы IV Международной научной конференции  
Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.

Научный редактор  
**Ваганов Евгений Александрович**

Корректурa *А. А. Быковой*  
Компьютерная верстка *Т. М. Бовкун*

Подписано в печать 28.08.2017. Печать плоская. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,9. Тираж 100 экз. Заказ № 2191

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](mailto:publishing_house@sfu-kras.ru)