

## ОБНАРУЖЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ПОЖАРООПАСНЫХ ТОРФОРАЗРАБОТОК НА ОСНОВЕ ПРЕВЕНТИВНОГО МОНИТОРИНГА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Гизатуллин А. Т.,  
Алексеевко Н. А.,  
Моисеева Н. А.*

**Резюме** – На сегодняшний день в России остро стоит проблема высокой пожароопасности заброшенных торфопредприятий, контроль за которыми практически не осуществляется. Настоящее исследование направлено на разработку методики выявления потенциально пожароопасных торфопредприятий по данным дистанционного зондирования. На основе рассмотрения хода температуры и влажности торфопредприятий в период возгорания по космическим снимкам были определены ключевые положения методики.

**Ключевые слова** – пожароопасность торфопредприятий, превентивный мониторинг, данные дистанционного зондирования, индекс влажности, радиояркостная температура

## DETECTION OF POTENTIALLY FIRE-DANGEROUS PEATS ON THE BASE OF PREVENTIVE MONITORING BY SPACE IMAGES

*Gizatullin A. T.,  
Alexeeenko N. A.,  
Moiseeva N. A.*

**Abstract** – Currently, in Russia, there is almost no control over abandoned peatlands. Therefore, there is a problem of high flammability of peat sites. The present study is aimed at developing a methodology for detecting potentially fire-hazardous peat extraction by remote sensing data. Based on the consideration of the temperature and humidity of peat extraction during the ignition period, the key positions of the methodology were determined from space images.

**Keywords** – fire danger of peatlands, space images, preventive monitoring, fire detection, water index, brightness temperature

### Введение

Торфяная промышленность России на сегодняшний день находится в упадке: она существует лишь в локальном и областном масштабах и имеет тенденцию к сворачиванию производства. После закрытия многих торфяных предприятий значительно возросли риски возгорания на бывших участках добычи вследствие несоблюдения мер по их уходу и контролю. Торфяной пожар имеет свои специфические особенности: в отличие от лесного, он возникает и развивается без визуальных изменений на земной поверхности, следовательно, вероятность его обнаружения наземными способами является минимальной. Специфика физических свойств торфа заключается в гидрофобности его битумированных частиц, то есть его тушение при помощи воды пред-

ставляется невозможным [Иванов, 1981]. Влага просачивается мимо частиц торфа, а пожар продолжается вплоть до полного выгорания торфяного слоя. Следовательно, важно обнаруживать торфяной пожар на самых ранних этапах его развития или более оптимальный, но и более сложный вариант – предпринимать меры при наступлении условий для возгорания.

Следует отметить, что существующие системы выявления природных пожаров (FIRMS – The Fire Information for Resources Management System, SFMS – Scanex Fire Monitoring System) занимаются обнаружением уже существующих очагов возгорания. Это значительно осложняет реализацию мер по предотвращению и тушению пожаров.

В данной работе показана методика обнаружения потенциально пожароопасных торфоразработок по материалам космической съемки. Разработка методики потребовала решения ряда частных задач:

- изучение географии торфоразработок и анализ их фактической горимости: выбор региона исследования;
- выбор съемочных систем для мониторинга пожароопасности торфяных участков;
- дешифрирование участков торфоразработок;
- выбор параметров мониторинга и анализ их изменения при наступлении пожара: выделение их пороговых значений;
- апробация и оценка адекватности разработанной методики.

### Исходные данные и методы

На современном этапе развития космических технологий по данным дистанционного зондирования возможно всеобъемлющее и детальное изучение различных участков земной поверхности. Благодаря съемке в широком диапазоне электромагнитного спектра значительно расширяется перечень решаемых задач. Инфракрасная область спектра является наиболее информативной при исследовании теплового распределения земной поверхности, что немаловажно для выявления потенциально высокой пожароопасности объектов, в том числе и торфоразработок.

Космическая съемка Земли в инфракрасном диапазоне на сегодняшний день ведется несколькими десятками спутников, однако предоставление данных с большинства из них является коммерчески ограниченным. Свободное приобретение и использование снимков доступно для продуктов съемочных систем спутников серии Landsat, Sentinel-2, Terra/Aqua. Преимуществами снимков этих систем являются высокое пространственное разрешение: 20 и 60 м – Sentinel-2A (сканер MSI), 30 и 100 м – Landsat-7 и Landsat-8 (OLI и TIRS), а также частая периодичность съемки: 1–2 раза в сутки – Terra/Aqua (спектрорадиометр MODIS).

Выявление и оценка состояния потенциально пожароопасных торфяных участков выполняется по серии параметров. Изучение физики горения торфа показало, что *факторами, наиболее влияющими* на этот процесс, являются воздействие тепла и содержание воды, причем первый из них – ускоряющий, а второй – лимитирующий. Количественную меру влияния этих факторов, как известно, представляют в виде температуры и влажности. При работе с материалами дистанционного зондирования возможно получение аналогов этих показателей: радиояркостной температуры и индекса влажности путем обработки снимков в инфракрасном диапазоне.

*Радиояркостная температура* – физическая характеристика объектов земной поверхности, которая зависит от их собственного излучения в тепловой области инфракрасного диапазона ( $\approx 10\text{--}13$  мкм). Расчет этого параметра по космическим снимкам

ведется в два этапа [Northrop, 2015; Bertolini и др., 2015; Vermote и др, 2011]. Первый – пересчет яркости пикселей изображения в интенсивность излучения, достигшего орбиты спутника:

$$R = k_1 \times DN + k_2,$$

где  $R$  – поток излучения, падающий на единицу площади земной поверхности сквозь телесный угол в 1 стерadian относительно единицы длины волны, Вт/м<sup>2</sup>/стер/мкм,  $DN$  – безразмерная яркость пиксела,  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты конвертации, зависящие от диапазона допустимых значений яркостей (радиометрического разрешения) и максимального и минимального значений зарегистрированного излучения.

На втором этапе интенсивность конвертируется в яркостную температуру:

$$t = K_2 / \ln (K_1/R + 1) - 273,15,$$

где  $t$  – радиояркостная температура, °C,  $R$  – интенсивность излучения на сенсоре ( $I$ ),  $K_1$  и  $K_2$  – калибровочные коэффициенты.

Индекс влажности ( $NDWI$  – *Normalized Difference Water Index*) – показатель, предложенный Gao [1996], представляет собой отношение разности величин отражательной способности в ближней ( $NIR \approx 0,857$  мкм) и коротковолновой ( $SWIR \approx 1,241$  мкм) частях спектра к их сумме:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}.$$

Следовательно, для вычисления этого параметра необходимы снимки, отражающие распределение излучения в соответствующих частях спектра. Однако по причине использования материалов различных съемочных систем перед вычислением индекса следует выполнить преобразование яркости пикселей в отражательную способность:

$$p = \frac{\pi R d^2}{E \sin \theta}$$

$p$  – отражательная способность,  $R$  – интенсивность излучения на сенсоре,  $d$  – расстояние между Землей и Солнцем (зависит от дня съемки в году),  $E$  – значение светимости канала;  $\theta$  – высота стояния Солнца над горизонтом в момент съемки.

Коэффициенты для конвертации и параметры съемки приводятся в метаданных продуктов, которые предоставляются вместе с ними, что существенно упрощает процесс вычисления рассмотренных выше показателей.

Обработка космических снимков с вычислением параметров мониторинга по вышеприведенным формулам должна вестись только в пределах объектов исследования (пространственная выборка), что позволит существенно снизить время работы с ними. Для получения выборки торфоразработок на район исследования необходимо их дешифрирование, которое выполнялось визуально по цветным изображениям, полученным синтезом различных каналов видимого и инфракрасного диапазонов. Применение последнего (ближняя и коротковолновая область) позволяет существенно увеличить контрастность между торфяной поверхностью и окружающими объектами.

Помимо пространственной выборки необходимо ограничить временной диапазон рассматриваемых снимков для изучения возможностей и выявления закономерностей поведения параметров мониторинга во время наступления пожаров. Для этого был проведен анализ фактической горимости торфяных участков за 2013–2016 гг. Данный интервал позволит сравнить регионы между собой по количеству пожаров, тем самым оценивая пожароопасность торфоразработок, проследить их динамику.

Также этого временного ряда достаточно, чтобы использовать данные недавно запущенных спутников Landsat-8 и Sentinel-2A, который применяется для различных мониторинговых задач.

Рассмотрение горимости велось с использованием оверлейного анализа – наложения слоев торфяных участков и пожаров, выявленных сервисом ИТЦ «СканЭКС» *Карта пожаров* [URL: fires.kosmosnimki.ru, 02.04.2017]. Результаты перекрытия этих слоев интерпретировались как торфяные пожары при их подтверждении по новостным лентам таких организаций, как МЧС и Гринпис России [URL: mchs.gov.ru, 13.01.17; URL: forestforum.ru, 01.11.15].

Далее по результатам пространственно-временного отбора космических снимков на участки торфоразработок и на время наступления пожаров был проведен разновременный дескриптивный анализ, целью которого было *изучение хода параметров (температуры и индекса влажности) и выявление пороговых значений*, выражающих критерии определения высокой пожароопасности участков мониторинга.

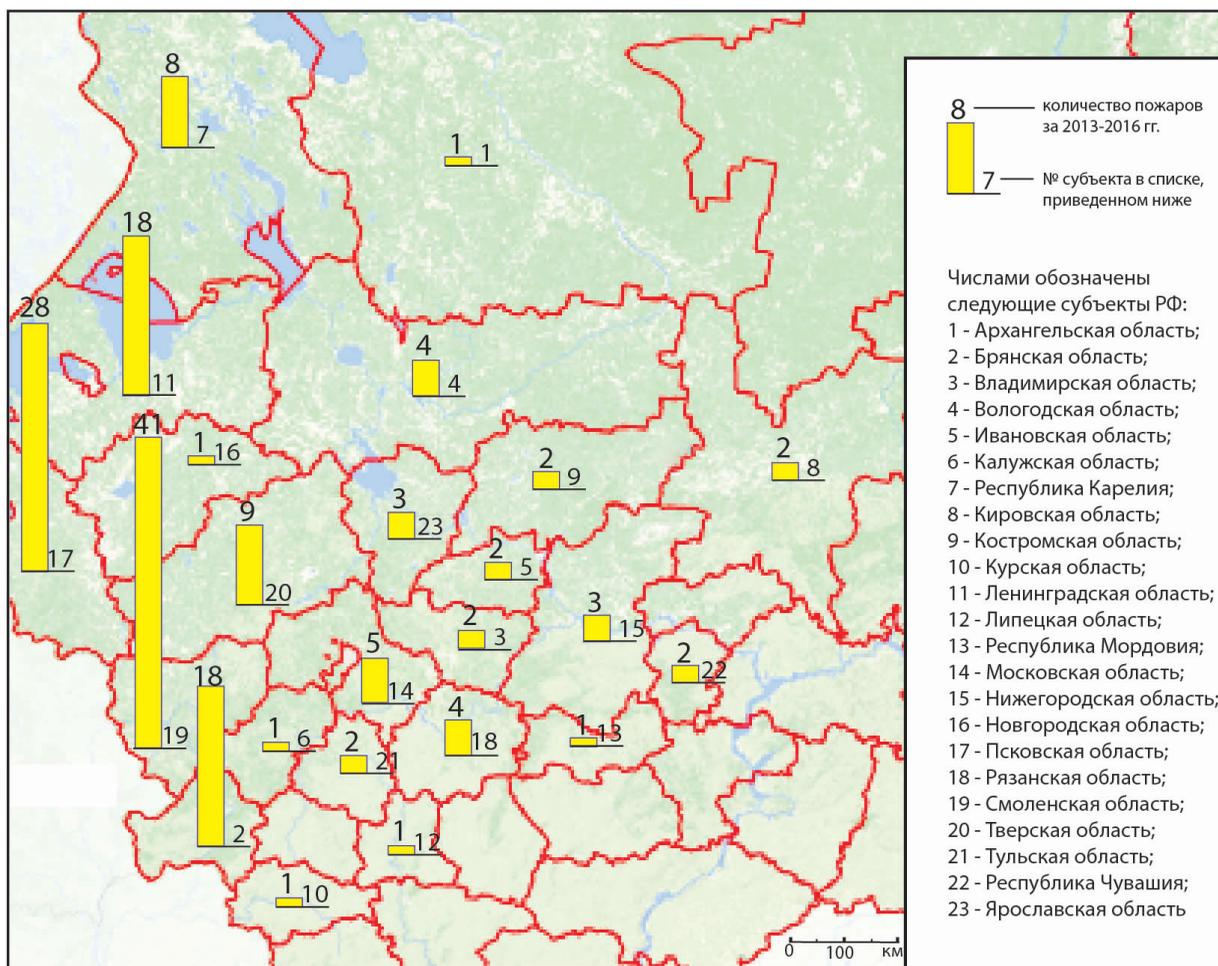
### Результаты исследований

На первых этапах работы была рассмотрена география распределения торфоразработок в России. Наибольшая их концентрация достигается в европейской части, что связано с фактором близости к потребителю [Атлас торфяных ресурсов СССР, 1968]. Проведенный для этих регионов анализ фактической горимости торфяных участков за 2013–2016 гг. показал, что больше всего горят торфоразработки западных регионов (рис. 1): Смоленской (33 пожара за рассматриваемый период), Псковской (25), Ленинградской (16) и Брянской (14) областей. Во временном диапазоне подавляющая часть торфяных пожаров происходит весной, что объясняется резким повышением температуры воздуха, а также активизацией антропогенного влияния в это время года (в основном, травяные палы). Для дальнейшего исследования в качестве эталонных участков были выбраны торфоразработки Смоленской области, которые являются наиболее пожароопасными, и Кировской области, которая лидирует по объемам добычи торфа в настоящее время в России.

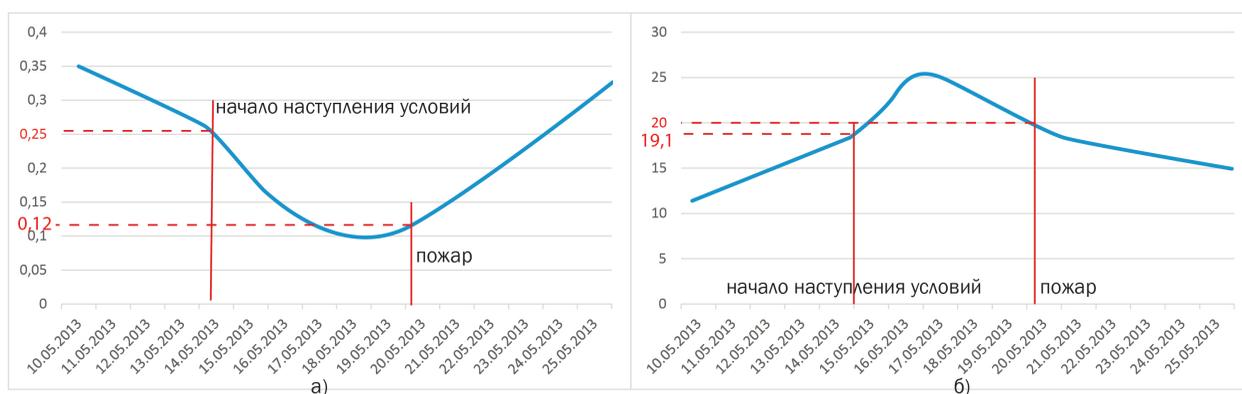
Статистический анализ показателей (пример приведен на рис. 2) выявил, что в период до возгорания в некоторый момент происходит их резкое изменение – повышение температуры и понижение влажности. Этот момент можно считать началом наступления условий для возгорания торфа, а значения показателей, зафиксированные в это время, критическими для оценки потенциальной пожароопасности торфоразработок. Таким образом, на основе анализа эталонных участков (горевших торфяников Смоленской области) было выявлено, что пороговые значения для температуры поверхности торфяников являются динамическими и изменяются от 10 °С весной до 45 °С в середине лета, тогда как для индекса влажности это значение находится в диапазоне от –0,2 до 0,3 и менее чувствительно к сезонным изменениям.

Также был создан проект системы мониторинга потенциально пожароопасных торфоразработок. На рис. 3 представлен **алгоритм функционирования** данной системы:

1. получение растровых изображений, пространственная выборка;
2. пересчет яркостей в анализируемые показатели;
3. проверка условия на превышение пороговых значений;
4. при подтверждении превентивной опасности возгорания торфа информация направляется в различные системы оповещения.



**Рис. 1.** География распределения торфоразработок в европейской части России



**Рис. 2.** Изменение а) температуры и б) индекса NDWI торфяной поверхности: торфоразработка в 50 км к востоку от г. Холм-Жирковский в период с 10 по 25 мая 2013 г.

Проект данной системы был протестирован на контрольных участках, условия на которых существенно отличаются от тех, по которым разрабатывалась методика. Это торфоразработки Кировской области. Например, известно, что 3 июля 2013 г. на одной из торфоразработок, находящейся недалеко от г. Кирс произошел пожар. Космические снимки на эту территорию были запущены в обработку по алгоритму планируемой системы мониторинга. Так как это летнее время, были установлены пороги 30 градусов для температуры и 0,3 для индекса влажности. Показатели, вычисленные по снимкам, превысили их соответственно 28 и 24 июня, то есть оповещение о пожаре было бы от-

правлено системой примерно за неделю до пожара, что говорит о возможной работоспособности системы.

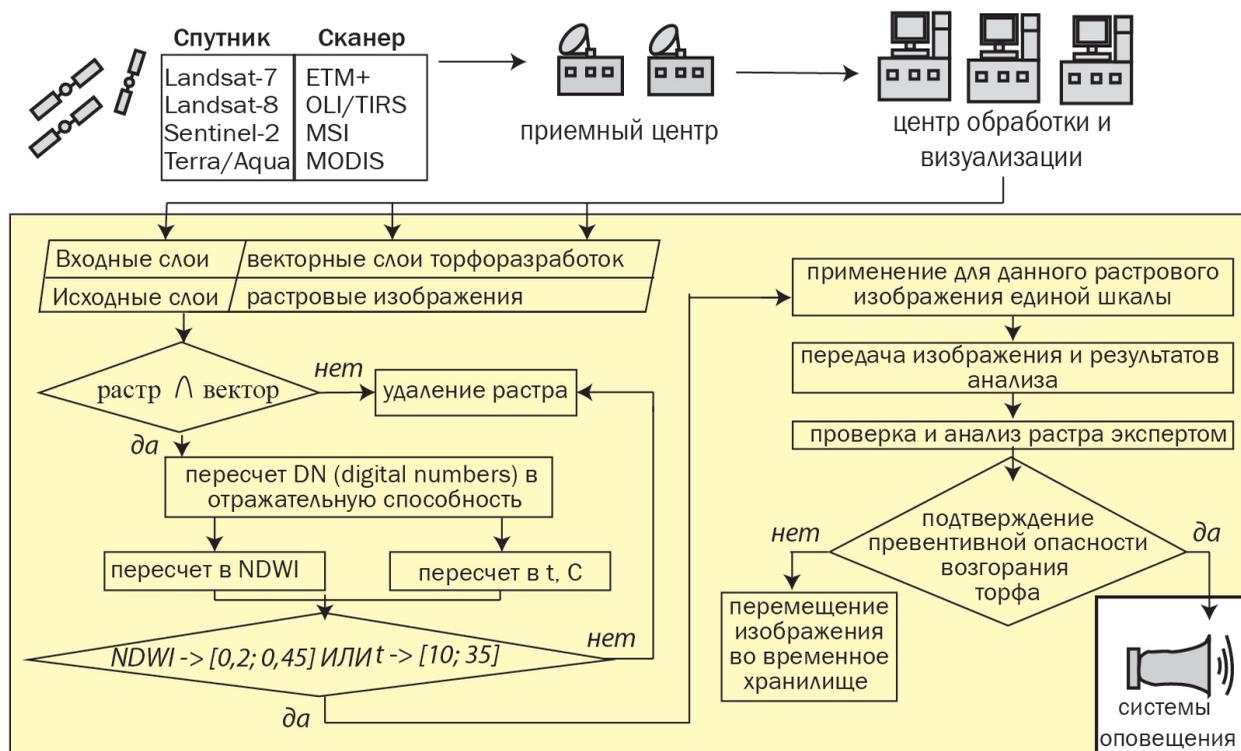


Рис. 3. Алгоритм системы мониторинга потенциальной пожароопасности торфоразработок

Таким образом, в результате исследования предложена методика обнаружения потенциально пожароопасных торфоразработок и разработан проект системы их превентивного мониторинга. Преимущественными особенностями созданной системы являются:

- возможность предупреждения пожаров до их наступления, в отличие от существующих систем обнаружения пожаров, которую дают информацию на настоящий момент;
- планируемая реализация системы базируется на геопортальных технологиях, что обеспечит доступ к ней без установки дополнительного программного обеспечения;
- осуществление свободного и оперативного доступа к данным;
- возможность интеграции с другими подобными системами;

## Выводы

- наибольшее количество торфоразработок в России расположено в европейской части;
- наибольшая горимость торфяных участков достигается в западных регионах в весенний период;
- при наступлении пожара на торфяных участках за некоторый промежуток времени происходит относительно резкое изменение параметров мониторинга, характеризующих состояние поверхности разработки: радиояркостной температуры и индекса влажности;
- пороговые значения параметров мониторинга, при превышении которых можно судить о потенциально высокой пожароопасности, являются динамическими по времени для каждой торфоразработки. Их диапазон для температуры составляет  $10^{\circ}\dots 45^{\circ}\text{C}$ , для индекса влажности —  $-0,2\dots 0,3$ .

## Список литературы

- [1] Атлас торфяных ресурсов СССР / Под ред. Д.В. Сыроева, Я.Н. Задунайского, А.С. Оленина, М.И. Нейштадта. М.: изд-во ГУГК, 1968. 96 С.
- [2] *Иванов Б. П.* Технические средства и способы тушения пожаров. М.: Энергоиздат, 1981. С. 36–41
- [3] Карта пожаров, сервис ИТЦ Сканэкс «Космоснимки.Ру» [Электронный ресурс] – <http://fires.kosmosnimki.ru/> (Дата обращения – 02.04.17)
- [4] Лесной форум Гринпис России. Общая информация о торфяных пожарах, основные источники данных о торфяных пожарах [Электронный ресурс] <http://www.forestforum.ru/> (Дата обращения – 01.11.15)
- [5] МЧС России [Электронный ресурс] <http://www.mchs.gov.ru/> (Дата обращения – 13.01.17)
- [6] *Bertolini A., Gatti A.* Sentinel-2 Product Specification Document. Thales Alenia Space, 2015. 496 P.
- [7] *Gao B. C.* NDWI – A normalized difference water index fir remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment, 1996. №58. P. 257–266
- [8] *Northrop A.* IDEAS – LANDSAT Product Description Document // Luton: Telespazio VEGA UK Ltd, 2015. 68 P.
- [9] *Vermote E. F., Kotchenova S. Y., Ray J. P.* MODIS Surface Reflectance User's Guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, 2011. 40 P.

## References

- [1] Atlas torfyanyh resursov SSSR / Pod red. D.V. Sysoeva, YA.N. Zadunajskogo, A.S. Olenina, M.I. Nejshtadta. M.: izd-vo GUGK, 1968. 96 p.
- [2] *Ivanov B. P.* Tekhnicheskie sredstva i sposoby tusheniya pozharov. M.: ENergoizdat, 1981. p. 36–41
- [3] Karta pozharov, servis ITC Skanehks «Kosmosnimki.Ru» [Elektronnyj resurs] – <http://fires.kosmosnimki.ru/> (Data obrashcheniya – 02.04.17)
- [4] Lesnoj forum Grinpis Rossii. Obshchaya informaciya o torfyanyh pozharah, osnovnye istochniki dannyh o torfyanyh pozharah [Elektronnyj resurs] <http://www.forestforum.ru/> (Data obrashcheniya – 01.11.15)
- [5] MCHS Rossii [Elektronnyj resurs] <http://www.mchs.gov.ru/> (Data obrashcheniya – 13.01.17)
- [6] *Bertolini A., Gatti A.* Sentinel-2 Product Specification Document. Thales Alenia Space, 2015. 496 P.
- [7] *Gao B. C.* NDWI – A normalized difference water index fir remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment, 1996. №58. P. 257–266
- [8] *Northrop A.* IDEAS – LANDSAT Product Description Document // Luton: Telespazio VEGA UK Ltd, 2015. 68 P.
- [9] *Vermote E. F., Kotchenova S. Y., Ray J. P.* MODIS Surface Reflectance User's Guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, 2011. 40 P.

## Авторы

*Гизатуллин А. Т.* – бакалавр географии по специальности картография и геоинформатика, магистрант 1-го года обучения.

*Алексеевко Н. А.* – доцент кафедры картографии и геоинформатики, кандидат географических наук.

*Моисеева Н. А.* – дипломированный специалист, выпускник кафедры картографии и геоинформатики.

## Authors

*Gizatullin A. T.* – Bachelor of Geography in the specialty of cartography and geoinformatics, Master of 1-st year.

*Alexeenko N. A.* – Associate Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Candidate of Geographical Sciences.

*Moiseeva N. A.* – graduate of the Department of Cartography and Geoinformatics.