

УДК 528.88:614.849

А.Т. Гизатуллин¹, Н.А. Алексеенко², Н.А. Моисеева³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ ТОРФОРАЗРАБОТОК

Рассмотрена возможность прогноза возгораний торфяных разработок с использованием свободно доступных данных дистанционного зондирования. Проанализировано пространственно-временное распределение пожаров на торфяных разработках в европейской части России, как наиболее уязвимой с точки зрения торфяно-пожарных рисков области нашей страны. Яркостная температура и индекс влажности NDWI были выявлены как наиболее характерные параметры, чувствительные к изменению пожарной опасности торфяных участков и устанавливаемые по данным спутников Aqua/Terra, Landsat-8 и Sentinel-2. Посредством исследования участков, горевших в 2013–2017 гг., были установлены пороговые значения этих параметров, которые позволяют интерпретировать потенциальные возгорания торфяных разработок. Корреляционный анализ порогов параметров с температурой поверхности дал возможность распространить выявленные значения на другие неисследованные торфяные разработки европейской части России. По итогам исследования были даны методические рекомендации для прогноза возгораний торфяных разработок по данным дистанционного зондирования.

Ключевые слова: торфяные пожары, прогноз, дистанционное зондирование, яркостная температура, NDWI

Введение. Обширные территории в России заняты болотами и заболоченными землями, освоение которых происходит путем осушения. В настоящее время таким образом разработано более 10 млн га болот, в том числе 1,5 млн га из них – для добычи торфа. Наибольшие темпы развития торфодобывающей промышленности на территории современной России приходятся на 1970–80 гг. Однако после упадка этой отрасли в конце XX века большинство торфяных участков было заброшено без необходимой противопожарной обработки – рекультивации, обводнения. Суммарная площадь этих участков составляет более 240 тыс. га [Афанасьев с соавт., 2005]. Это привело к возникновению ряда проблем, главной из которых является высокая возгораемость участков торфяных разработок, в особенности, действующих. Проблема повышенной пожароопасности остро стоит и на сегодняшний день, требуя современных и эффективных вариантов решения.

Фрагментарность и повсеместность распространения торфяных разработок на больших территориях, высокая опасность их возгораний для человека обуславливают преимущества дистанционных методов перед наземными в исследованиях торфяных пожаров. Текущий опыт подобных исследований фиксируется при решении вопросов более общей тематики с применением данных дистанционного зондирования. Торфяные возгорания рассматриваются как одна из составляющих объекта в рамках:

– экологических исследований, изучающих загрязнение природной среды в результате эмиссии

углекислого газа при торфяных пожарах [Втюрин с соавт., 2007];

– мониторинга чрезвычайных ситуаций [Овчинникова, Пранцузова, 2011];

– выявления пожаров. В большинстве исследований применяется методика детектирования пожаров по данным съемочной системы MODIS (спутники Aqua/Terra), которая не учитывает особенностей возгорания торфа и нацелена на выявление существующих пожаров, а не на их предупреждение [Justice et al., 2002].

Частный вклад в развитие методической поддержки изучения торфяных разработок вносят исследования на локальном уровне на примере участков с однородными условиями воспламенения торфяной толщи. В начале XXI в. с использованием космических снимков MODIS и ETM+ (Landsat-7) в инфракрасных каналах были предприняты первые попытки детектирования подземных торфяных пожаров в тропических районах Ботсваны и Конго [McCarthy et al., 2002; Siegert et al., 2004]. В нашей стране также проводятся разносторонние исследования пожаров на торфяниках. Группой ученых из Сибирского отделения РАН [Голованов с соавт., 2008] были исследованы возможности математического моделирования и превентивного выявления воспламенения торфа на примере участков торфяных разработок Томской области. Интенсивность проведения исследований была повышена в результате сильных торфяных пожаров на территории Мещерской низменности в 2010 году: возникла необходимость в предупреждении возгораний рассматрива-

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, магистрант 1 года обучения; *e-mail:* dr.freeboy@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail:* valtuz@mail.ru; Институт географии РАН, лаборатория картографии, мл. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* valtuz@mail.ru

³ ГК СКАНЭКС, департамент тематического картографирования, руководитель, *e-mail:* nina.moiseewa2011@yandex.ru

емого типа [Мироненко с соавт., 2015; Медведева с соавт., 2017].

Основной целью этого исследования является продление решения проблемы предупреждения торфяных возгораний в России с акцентом на использование данных дистанционного зондирования, в частности, расширение опыта проведения подобных исследований.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- определить параметры, устанавливаемые по данным дистанционного зондирования и чувствительные к изменению пожарного состояния на торфяном участке, а также выявить их пороговые значения, указывающие на высокую вероятность возгорания;

- выбрать материалы космической съемки, пригодные для задач превентивного мониторинга пожарной опасности торфяных возгораний;

- проанализировать пространственно-временное распределение пожаров на торфяных участках в России с целью выбора эталонных репрезентативных участков для изучения их на космических снимках;

- выполнить тестирование полученных параметров для предупреждения торфяных возгораний.

Материалы и методы исследований. Торфом называется разновидность полезного ископаемого, основу которого составляют растительные остатки и продукты их разложения. Сформированные массивы торфа образуют торфяники. При добыче участок торфяника определяется как торфяная разработка – основной объект данного исследования. Горение торфа – основа предмета исследования – представляет собой процесс, состоящий из совокупности физико-химических превращений под воздействием различных факторов – ускоряющих и лимитирующих. Главными из этих факторов являются ускоряющий тепловой и ограничивающий водный: чем выше температура торфа и чем ниже содержание воды в нем, тем выше вероятность его возгорания [Лиштван с соавт., 1989].

Исходя из вышеперечисленных особенностей горения торфа, температура и влагосодержание были рассмотрены в качестве параметров, отражающих пожарную опасность торфяной разработки. Температура как показатель теплового излучения объектов земной поверхности фиксируется в инфракрасном (ИК) диапазоне электромагнитного спектра. Для определения содержания воды по космическим снимкам используют индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), который вычисляется на основе излучения в ближней и коротковолновой частях ИК-диапазона ($\approx 0,867$ и $\approx 1,241$ мкм) [Gao, 1996].

Таким образом, одним из критериев выбора материалов космической съемки являлось наличие инфракрасных каналов в съемочной системе спутника. Другой критерий представлял собой наличие открытого доступа к регулярно поставляемым материалам, что создает основу для последующего применения опыта исследований. Этим критериям

соответствуют три серии съемочных систем, установленных на спутниках Landsat-8, Sentinel-2A/2B и Aqua/Terra. Рассмотрим основные характеристики этих систем, наиболее существенные при оценке пожарной опасности торфяных разработок.

Landsat-8 – спутник, выведенный на орбиту 11 февраля 2013 года и производящий съемку посредством сканеров OLI/TIRS в видимом и инфракрасном (в том числе в тепловом) диапазонах. Пространственное разрешение получаемых снимков составляет от 15 до 100 м, периодичность съемки одной и той же территории – 16 суток [Landsat-8 ..., 2019]. С использованием тепловых снимков с этого спутника можно определить яркостную температуру поверхности торфяных разработок и индекс влажности NDWI по снимкам в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне.

Aqua/Terra – два спутника серии EOS, функционирующих с 1999 и 2002 года соответственно. Одним из ключевых инструментов этих спутников является гиперспектральная съемочная система MODIS, позволяющая вести съемку в 36 узких каналах видимого и инфракрасного диапазонов. Снимки с этого сканера имеют среднее и низкое пространственное разрешение (250, 500 и 1000 м) и периодичность 1–2 раза в сутки, что обеспечивает высокое временное разрешение [About MODIS ..., 2019]. Данные съемки MODIS широко применяются для обнаружения природных пожаров, однако в нашем случае их можно использовать для вычисления температуры поверхности и индекса влажности поверхности торфяных разработок.

Sentinel-2A/2B – семейство из двух спутников, запущенных в 2015 и 2017 годах соответственно. На них установлена оптико-электронная съемочная система MSI, с помощью которой возможна гиперспектральная съемка в видимом и инфракрасном диапазонах. Пространственное разрешение данных MSI варьируется в зависимости от съемочного канала – от 10 до 60 м, а интервал съемки одной и той же территории составляет 5 суток [Missions: Sentinel-2 ..., 2019]. При оценке пожароопасности торфяной поверхности, используя эти снимки, мы можем рассчитать индекс влажности NDWI.

Данные описанных выше съемочных систем являются различными по своим характеристикам, однако это позволяет наиболее комплексно исследовать проблему возгорания торфяных разработок. Общим интервалом времени действия рассматриваемых спутников на орбитах является период с 2013 года, когда был запущен Landsat-8, а затем (через два года) и Sentinel-2A. Поэтому для анализа пространственно-временного распределения возгораний торфяных разработок был выбран период с 2013 по 2017 гг.

Торфяная промышленность в России на сегодняшний день представлена на региональном и локальном уровнях. Наибольшее развитие она получила в европейской части страны, что обуславливается природными и социально-экономическими причинами: оптимальными условиями температуры

и увлажнения, способствующими торфонакоплению, и близостью к потребителю. Этим критериям отвечает северная часть Русской равнины. Таким образом, большинство участков торфоразработок (в том числе бывших) располагается на территории европейской части России, в частности, в Московской, Ленинградской, Псковской и других областях.

Выявление пространственно-временного распределения торфяных возгораний производилось путем наложения двух слоев данных: торфоразработок европейской части России и природных пожаров (источник слоев – система выявления пожаров Scanex Fire Monitoring System / SFMS [Карта пожаров ..., 2019]). Перекрытие этих слоев с последующей верификацией по текстовым источникам (поисковые интернет-сайты) указывает на местоположение торфоразработок, которые горели за указанный период.

Выявленные горевшие торфоразработки были рассмотрены в качестве эталонных участков для анализа поведения параметров температуры и индекса влажности на космических снимках в ходе возникновения и развития торфяного пожара. Для этого использовались космические снимки MODIS, OLI/TIRS и MSI, которые фиксировали состояние торфоразработок в этом временном интервале. На основе изображений в инфракрасных каналах рассчитывались значения температур и индекса влажности, а затем их статистические параметры как характеристики всей горевшей площади (совокуп-

ности пикселей снимка): медиана, среднее, экстремальные значения и квартили.

Для обеспечения возможности использования результатов анализа горевших участков для предупреждения возгораний на всю совокупность торфоразработок (в том числе и незатронутых пожарами) был проведен корреляционный анализ между среднемесячными температурами поверхности европейской части России (источник данных – база данных NASA POWER / SSE [NASA ..., 2019]) и рассматриваемыми параметрами пожарной опасности торфоразработок. Расчет корреляции между показателями происходил по формуле [Берлянт, 1978]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - M_a)(b_i - M_b)}{n \sigma_a \sigma_b},$$

где a_i и b_i – текущие значения явлений А и В, M_a , M_b и σ_a , σ_b – их средние арифметические значения и среднеквадратические отклонения соответственно, n – число сравниваемых точек. Явление А, в данном случае, представляется как среднемесячная температура поверхности, а В – температура и индекс влажности торфоразработки.

Результаты исследований и их обсуждение.

Пространственное распределение торфяных пожаров (рис. 1) за 2013–2017 гг. ежегодно представляет собой неизменную картину: наибольшая концентрация возгораний достигается вдоль западной гра-

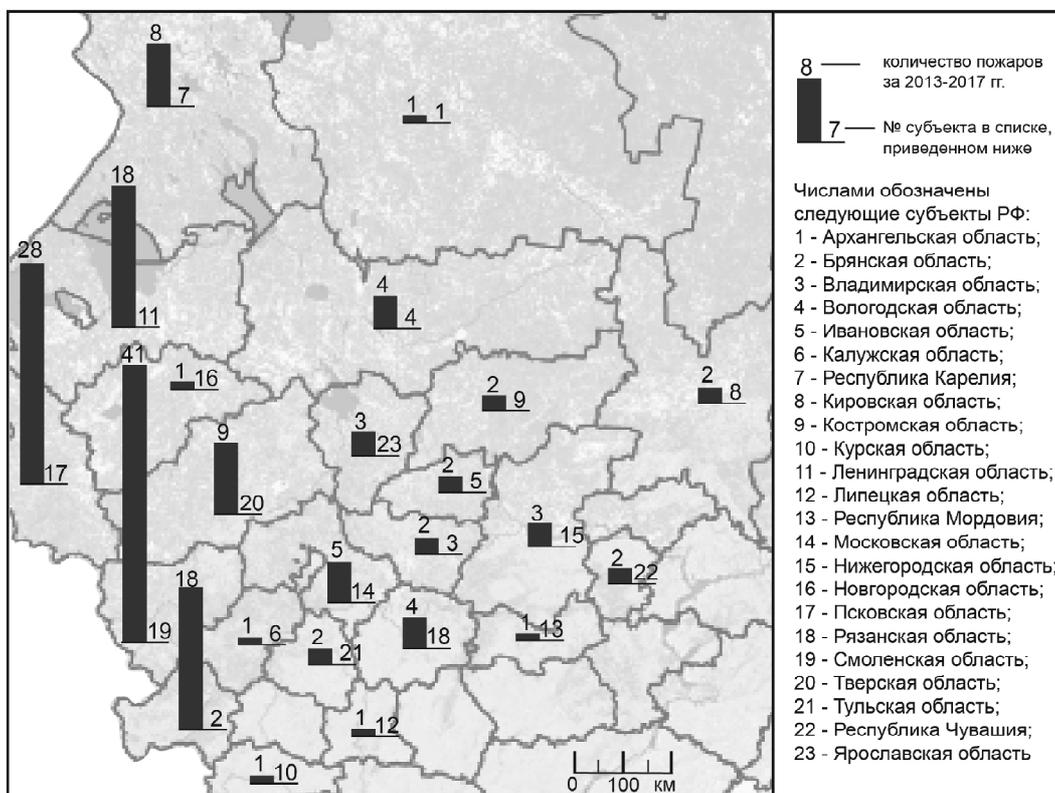


Рис. 1. Количество возгораний торфоразработок по регионам европейской части России за 2013–2017 гг.

Fig. 1. Number of peat field fires in the regions of the European Russia during 2013–2017

ницы России в пределах 50-х градусов широты, к востоку их количество значительно уменьшается. Наибольшее число пожаров зафиксировано в Смоленской, Псковской, Ленинградской и Брянской областях, в остальных же регионах значения варьируются в пределах первых единиц. Следует отметить, что большинство торфяных возгораний приходится на районы с заброшенными участками разработок, тогда как в регионах, где торфодобыча ведется (Кировская и Нижегородская области), количество пожаров невысокое.

Временное распределение возгораний торфоразработок (рис. 2) рассматривалось относительно внутригодовых изменений в их количестве. Пожарный сезон на торфяных участках согласно полученным результатам продолжается с марта по октябрь. Было выявлено, что больше всего торфоразработки горят в весенние месяцы, когда происходит резкое интенсивное прогревание воздуха и земной поверхности, а также высыхание подземных слоев торфа после таяния снега. На весну приходится пик антропогенного воздействия: на возгораемость влияют поджоги сухой прошлогодней травы и образование травяных палов.

Летом и осенью количество пожаров существенно уменьшается. Выявленная закономерность может быть следствием используемых данных. Летом общая температура земной поверхности намного выше, чем весной, следовательно, разница между температурами в очаге возгорания торфа и на окружающей земной поверхности в это время сглаживается. Такая разница может оказаться меньше порогового значения, заданного в методике [Justice et al., 2002] по детектированию пожаров, примененной в исследовании.

При рассмотрении временного хода медианы температуры и индекса влажности поверхности в пределах более 130 горевших участков была выявлена следующая закономерность: за некоторое время до непосредственного возгорания (даты пожара) происходит резкое изменение параметров мониторинга, то есть явное увеличение температуры

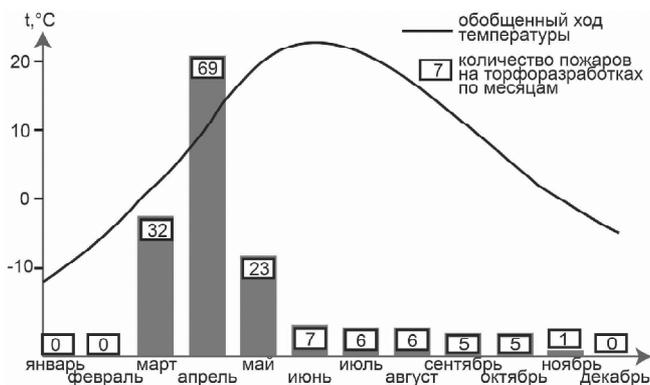


Рис. 2. Изменение количества возгораний торфоразработок в европейской части России по месяцам за 2013–2017 гг.

Fig. 2. Changing number of peat field fires in the European Russia by months during 2013–2017

поверхности и уменьшение индекса влажности. Этот момент был интерпретирован как начало активизации условий для возгорания, а значения параметров, зафиксированные в это время – пороговыми или превентивными, то есть их превышение на основе сравнения будет указывать на интерпретацию рассматриваемых торфоразработок как потенциально пожароопасных.

Такие резкие изменения параметров выявлялись в 85% случаев горевших участков, при этом относительное время таких перепадов варьировалось от нескольких часов до 8 дней до непосредственного возгорания торфа. Зафиксированные пороговые значения на более 100 участках по температуре составляют от $\approx 10^\circ$ до $\approx 45^\circ\text{C}$, по индексу влажности – $\approx -0,3 \dots 0,3$. Также следует отметить, что при анализе торфоразработок, горевших от двух и более раз, было установлено, что пороговые значения параметров зависят от сезона и имеют годовые изменения в пределах одного участка, а также являются частными, т. е. относятся к конкретным участкам.

Для торфоразработок, которые не горели в рассматриваемый период, пороговые значения параметров пожарной опасности были установлены путем экстраполяции ранее выявленных значений. По результатам анализа их связи со среднемесячной температурой поверхности была выявлена высокая степень зависимости: коэффициенты корреляции для пороговых значений яркостной температуры и индекса влажности составили $+0,89$ и $-0,77$ соответственно. Также в ходе визуального анализа пространственной изменчивости пороговых значений были зафиксированы минимальные их различия в пределах зон широтного простираения с шагом среднемесячной температуры в 2°C . С учетом этих замечаний пороговые значения рассматриваемых параметров были распространены на участки торфоразработок всей территории европейской части России согласно температурным зонам: в пределах участков одной зоны значения являются постоянными, а при увеличении температуры земной поверхности возрастает температурный порог и уменьшается индексный (NDWI) (рис. 3, табл.).

Полученные таким образом территориально и сезонно изменчивые пороговые значения параметров температуры и индекса влажности были протестированы в режиме реального времени в период с 3 по 11 марта 2017 года на территории Брянской, Орловской и Курской областей. Выбор такой территории обусловлен пространственным совпадением фрагментов данных MODIS, OLI/TIRS и MSI, что упрощает процесс их получения и создает комплексное обеспечение участка космическими снимками с различными параметрами. По полученным снимкам рассчитывались значения параметров, которые сравнивались с пороговыми значениями: для температурных зон марта $-4^\circ \dots -2^\circ\text{C}$ и $-2^\circ \dots 0^\circ\text{C}$ они составляют соответственно $9,5^\circ\text{C}$ и $10,1^\circ\text{C}$ для температуры торфяной поверхности, $0,26$ и $0,21$ – для индекса влажности.

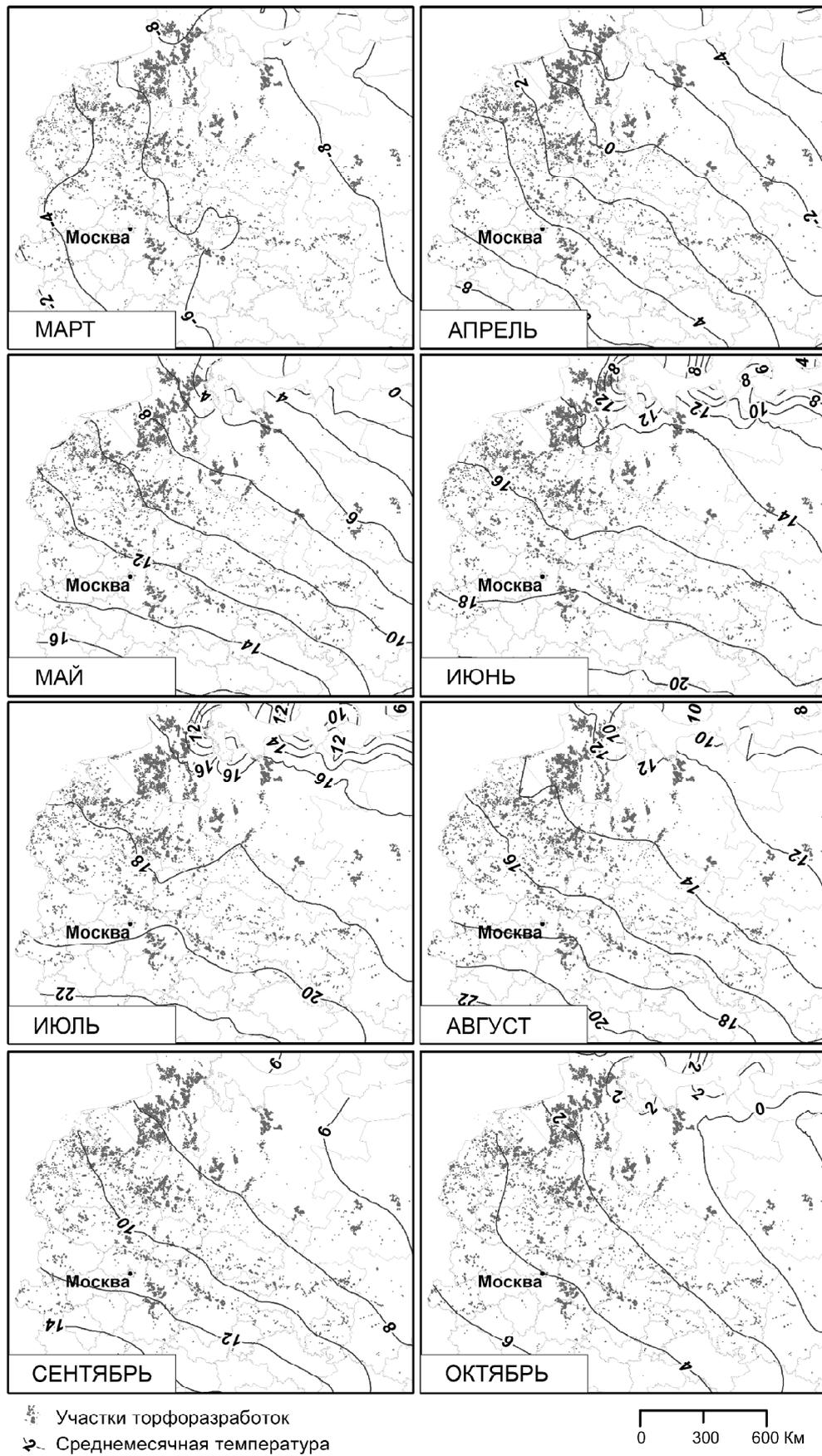


Рис. 3. Температурные зоны в европейской части России по месяцам пожарного сезона на торфоразработках
 Fig. 3. Temperature zones in the European Russia by months of the peat field fire season

Таблица

Соответствие пороговых значений яркостной температуры (ЯТ) и индекса влажности (ИВ) поверхности торфоразработок температурным зонам (ТЗ)

ТЗ, °С	–4...–2	–2...0	0...2	2...4	4...6	6...8	8...10	10...12
ЯТ, °С	9,5	10,1	11,3	12,5	14,2	16,1	19,5	22,1
ИВ	0,26	0,21	0,18	0,14	0,09	0,04	–0,01	–0,05
ТЗ, °С	12...14	14...16	16...18	18...20	20...22	22...24	24...26	
ЯТ, °С	25,7	27,8	29,1	31,4	33,5	38,3	41,5	
ИВ	–0,1	–0,13	–0,15	–0,19	–0,24	–0,28	–0,31	

В итоге, 4, 6 и 7 марта было получено три участка с потенциально высокой пожарной опасностью, на которых значения параметров превысили пороговые значения: в Брянской (п. Синезерки, п. Перекоп) и Курской (д. Арбузово) областях. Достоверность полученных результатов была оценена с помощью упомянутой выше системы детектирования пожаров SFMS, которая 10 и 11 марта выявила два из трех предупрежденных возгораний (п. Перекоп и д. Арбузово). Это указывает на возможность применения исследованных параметров яркостной температуры и индекса влажности для превентивного выявления потенциальных возгораний на торфоразработках.

Исходя из полученных результатов, можно составить методическую последовательность использования данных дистанционного зондирования для предупреждения возгораний торфоразработок:

1. Получение данных на территорию исследования торфоразработок со спутников Aqua/Terra, Landsat-8, Sentinel-2A/2B;
2. Расчет параметров температуры поверхности и индекса влажности в пределах торфяных участков;
3. Сравнение вычисленных значений с пороговыми значениями этих параметров;
4. Предупреждение потенциальных возгораний на участках со значениями, превысившими пороговые значения.

Эта последовательность достаточно простая в плане реализации и автоматизируется средствами обработки космических изображений. Как следствие, она может использоваться в самостоятельных системах превентивного мониторинга торфяных возгораний или в рамках тематической компоненты систем предупреждения и оценки пожарной опасности в целом.

Выводы:

– наибольшее количество торфяных пожаров происходит на заброшенных торфоразработках, ко-

торые сконцентрированы вдоль западной границы России, пик активности горения приходится на весенние месяцы, что важно учитывать при предупреждении возгораний;

– данные спутников Aqua/Terra, Landsat-8, Sentinel-2A/2B пригодны для использования в исследованиях пожарной опасности торфяных участков и на сегодняшний день потенциально предоставляют комплексную характеристику пожарной ситуации. Однако следует учитывать степень изношенности спутников Aqua/Terra и в дальнейших исследованиях искать альтернативные источники данных и расширять приведенный перечень спутников: потенциальной заменой может стать перспективная группировка спутников среднего разрешения Sentinel-3;

– температура и индекс влажности NDWI торфяной поверхности наиболее достоверно характеризуют изменения пожарной опасности торфоразработок, что указывает на их применимость для предупреждения торфяных пожаров;

– выявленные пороговые значения этих параметров являются достаточно чувствительными для установления пожароопасных участков вследствие их динамичности относительно территориально-сезонного аспекта, однако для повышения точности превентивного мониторинга их следует пересчитывать с учетом анализа новых возгораний;

– технические аспекты обработки материалов дистанционного зондирования, особенно в автоматическом режиме, могут вносить погрешности в результаты анализа пожарной ситуации на торфоразработках, что требует привлечения дополнительных источников для мониторинга и верификации его результатов в целях повышения достоверности и надежности выходных данных при использовании результатов этого исследования в системах оценки пожарной опасности торфоразработок.

Благодарности. Работа выполнена по Госзаданию № АААА-А19-119022190168-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев А.Е., Иншиева Л.И., Ковалев Н.Г. и др.* Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России. Томск: ЦНТИ. 2005. 76 с.
- Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 257 с.
- Втюрин С.А., Князев Н.А., Палатов Ю.А. и др.* Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для прогнозного моделирования экологической обстановки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 1. № 4. С. 111–118.
- Голованов А.Н., Якимов А.С., Абрамовских А.А. и др.* О математическом моделировании процессов загорания и гниения торфа // Теплофизика и аэромеханика. Новосибирск: СО РАН, 2008. № 4. С. 699–710.
- Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И. и др.* Физика и химия торфа. М.: Недра, 1989. 304 с.
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сиринов А.А. и др.* Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 76–84.
- Мироненко И.В., Осика Н.А., Новенко Е.Ю. и др.* Ландшафтная приуроченность пожаров 2010 года в юго-восточной Мещере // Фундаментальные и прикладные аспекты современной биологии: материалы II Всероссийской молодежной научной конференции. Томск: ИД ТГУ, 2015. С. 90–93.
- Овчинникова Т.В., Пранцузова И.В.* Мониторинг чрезвычайных ситуаций с использованием дистанционного зондирования Земли // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: материалы II Всероссийской научно-практической Интернет конференции. Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2011. С. 128–130.
- Gao B.* NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, p. 257–266.
- Justice C., Giglio L., Korontsi S. et al.* The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 83, p. 244–262.
- McCarthy J., Roy D., Frost P.E. et al.* Remote sensing to detect sub surface peat fires and peat fire scars in the Okavango Delta, Botswana. *South African Journal of Science*, 2002, vol. 7, p. 351–358.
- Siegert F., Zhukov B., Oertel D., Limin S., Page S.E., Rieley J.O.* Peat fires detected by the BIRD satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25:16, p. 3221–3230. DOI: 10.1080/01431160310001642377.
- Электронные ресурсы*
- Карта пожаров // ГК СКАНЭКС. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <http://fires.ru/> (дата обращения 07.02.2019).
- About MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 15.01.2019).
- Missions: Sentinel-2. ESA: Sentinel Online. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 19.01.2019).
- NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения 15.01.2019).
- Landsat-8 – The Landsat Program. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/> (дата обращения 15.01.2019).

Поступила в редакцию 19.04.2019
После доработки 21.08.2019
Принята к публикации 01.11.2019

**A. T. Gizatullin¹, N. A. Alexeenko²,
N. A. Moiseeva³**

**USING REMOTE SENSING DATA
TO MONITOR PEAT FIELD FIRES**

The article considers the possibility of peat field fire prediction using the open sources of remote sensing data. Spatial and temporal distribution of peat field fires was analyzed for the European part of Russia which is the most vulnerable area of the country in terms of peat-fire risks. The brightness temperature and the NDWI moisture index were identified as the most characteristic parameters. They are sensitive to changing flammability of peateries and could be calculated using Aqua/Terra, Landsat-8 and Sentinel-2 data. The threshold values of these parameters were determined by surveying the fields burned during 2013–2017, thus providing for the interpretation of potential peat field fires. Correlation analysis of threshold values with the surface temperature made it possible to extend the established values to other unsearched peateries of the European Russia. Following the results of the study, recommendations to forecast peat field fires by remote sensing data were given.

Key words: peat fires, forecast, remote sensing data, brightness temperature, NDWI

Acknowledgements. The article is prepared under the research theme of the State task № AAAA-A19-119022190168-8.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, master student; *e-mail:* dr.freeboy@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Associate Professor, Ph.D. in Geography; Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Cartography, Scientific Researcher; *e-mail:* valtuz@mail.ru

³ SCANEX Group, Department of Thematic Cartography, Head of Department; *e-mail:* nina.moiseeva2011@yandex.ru

REFERENCES

- Afanas'ev A.E., Inisheva L.I., Kovalev N.G. et al. *Koncepciya ohrany i racional'nogo ispol'zovaniya torfyanyh bolot Rossii* [The concept of protection and rational use of peat bogs in Russia]. Tomsk, Center of Scientific and Technical Information Publ., 2005, 76 p. (In Russian)
- Berlyant A.M. *Kartograficheskij metod issledovaniya* [Cartographic method of research]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 1978, 257 p. (In Russian)
- Gao B. NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, p. 257–266.
- Golovanov A.N., Yakimov A.S., Abramovskih A.A. et al. O matematicheskom modelirovanii processov zazhiganiya i tleniya torfa [Mathematic modeling of peat burning and smouldering]. *Teplofizika i aehromekhanika*, Novosibirsk, Siberian Branch of the RAS Publ., 2008, no. 4, p. 699–710. (In Russian)
- Justice C., Giglio L., Korontsi S. et al. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 83, p. 244–262.
- Lishtvan I.I., Bazin E.T., Gamayunov N.I. et al. *Fizika i himiya torfa* [Physics and Chemistry of Peat]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 304 p. (In Russian)
- McCarthy J., Roy D., Frost P.E. et al. Remote sensing to detect sub surface peat fires and peat fire scars in the Okavango Delta, Botswana. *South African Journal of Science*, 2002, vol. 7, p. 351–358.
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A. et al. Vozmozhnosti razlichnyh mnogospektral'nyh sputnikovyh dannyh dlya ocenki sostoyaniya neispol'zuemyh pozharoopasnyh i obvodnyaemyh torforazrabotok [Potentials of various multispectral satellite data for assessing the status of unused fire-hazardous and flooded peat mines]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, no. 3, p. 76–84. (In Russian)
- Mironenko I.V., Osika N.A., Novenko E.Yu. et al. Landshaftnaya priurochennost' pozharov 2010 goda v yugovostochnoj Meshchere [Landscape location of 2010 fires in the southeastern Meshchera]. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty sovremennoj biologii: materialy II Vserossijskoj molodyozhnoj nauchnoj konferencii* [Fundamental and applied aspects of modern biology: proc. of the II Russian Youth Scientific Conference]. Tomsk, Tomsk State Univ. Publ., 2015, p. 90–93. (In Russian)
- Ovchinnikova T.V., Prancuzova I.V. Monitoring chrezvychajnyh situacij s ispol'zovaniem distancionnogo zondirovaniya Zemli [Monitoring of emergencies using the Earth remote sensing]. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij: Materialy II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj Internet konferencii* [Modern technologies for providing civil defense and emergency response: Proc. of the II Russian Scientific and Practical Internet Conference]. Voronezh, Voronezh Institute of the State Fire Service, Ministry of Emergencies, 2011, p. 128–130. (In Russian)
- Siebert F., Zhukov B., Oertel D., Limin S., Page S.E., Rieley J.O. Peat fires detected by the BIRD satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25:16, p. 3221–3230. DOI: 10.1080/01431160310001642377.
- Vtyurin S.A., Knyazev N.A., Palatov YU. A. et al. Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa dlya prognoznogo modelirovaniya ehkologicheskoy obstanovki [Application of the Earth remote sensing space data for predictive modeling of environmental situation] *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, vol. 1, no. 4, p. 111–118. (In Russian)
- Web sources*
- About MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> (access date 15.01.2019).
- Fire map. SCANEX. 2019. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://fires.ru/> (access date 07.02.2019).
- Landsat-8 – The Landsat Program. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/> (access date 15.01.2019).
- Missions: Sentinel-2. ESA: Sentinel Online. 2019. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (access date 19.01.2019).
- NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2019. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (access date 15.01.2019).

Received 19.04.2019

Revised 21.08.2019

Accepted 01.11.2019