# Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров

# М.А. Медведева, Д.А. Макаров, А.А. Сирин

#### Институт лесоведения РАН, Московская обл., с. Успенское, 143030, Россия E-mail: medvedeva@ilan.ras.ru

Показана возможность детектирования гарей от торфяных пожаров на основе анализа данных о природных пожарах и картографической информации о границах торфяных болот и антропогенно изменённых торфяников. Для более точного выявления гарей на примере данных спутника Landsat-5 были изучены возможности применения индексов NBR, NBR2, ВАІ, MIRBI, NDVI и NDMI для следующего после пожаров 2010 г. в Московской обл. сезона вегетации с наземной проверкой. Пройденные огнём площади имели различный допожарный земной покров, что характерно для болот как в естественном состоянии, так и после воздействия человека. Определены диапазоны значений детектирования гарей для каждого из индексов на послепожарный период и для разницы индексов по сравнению с допожарным. Наиболее точным был определён разностный индекс ΔNDMI, который был использован далее для выявления всех гарей 2010 г. на торфяниках Московской обл. Показатель  $\Delta NDMI$  в сочетании с классификацией без обучения и с обучением позволил с высокой точностью (95%) выделить гари на торфяниках. При этом большая часть гарей не была выявлена ранее тепловыми аномалиями по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км. Апробированная методика выявления гарей может быть применима на базе спутниковых данных с подобными Landsat-5 спектральными характеристиками не только для торфяных, но и для других природных пожаров, включая лесные.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, многоспектральные изображения, торфяники, растительный покров, торфяные пожары, Landsat-5, вегетационные индексы

Одобрена к печати: 12.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166

#### Введение

Торфяные пожары отличаются спецификой течения, длительностью, загрязнением воздуха опасными для человека веществами, выбросом в атмосферу большого количества диоксида углерода и сажи («чёрный углерод») и другими экологическими последствиями (Сирин и др., 2020), что определяет их особое место среди природных пожаров (IPCC 2019..., 2019). Торфом покрыто более 1/5 территории страны (Вомперский и др., 2011), и торфяные пожары имеют место в разных природных условиях от тундры до степи, однако наиболее часто — в лесной зоне (Minayeva et al., 2013). Многие регионы лесной зоны сильно заболочены (Вомперский и др., 2011), и лесные пожары часто затрагивают торфяные почвы. Из-за заглубления огня лесные подземные (торфяные) пожары характеризуются значительными повреждениями сосущих корней деревьев с последующей гибелью древостоя (Вомперский и др., 2007), а также большой потерей углерода (Сирин и др., 2019).

В сухие годы могут гореть и естественные болота, однако наибольшую опасность представляют торфяники, осушенные для фрезерной добычи торфа и для сельского хозяйства, причём заброшенные и не контролируемые пользователем (Сирин и др., 2011). Торфяные болота и осушенные торфяники относятся к разным категориям земель: лесной и водный фонд, сельскохозяйственные земли, земли запаса и др., — что усложняет их учёт и получение данных об их распространении (Торфяные..., 2001). В то же время разнообразие естественной и производной после воздействия человека растительности усложняет анализ состояния торфяников по дистанционным данным (Медведева и др., 2011, 2017, 2019; Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2018). При значимости экологических последствий торфяных пожаров, включая влияние на газовый состав атмосферы и изменение климата, их выделение из других природных пожаров (лесных, травяных и др.) проблематично. Поэтому методика оценки их вклада в эмиссию парниковых газов не определена (IPCC 2014..., 2014), в том числе по причине сложности установления площадей, пройденных торфяными пожарами. Это определяет актуальность разработки и проверки методики картографирования гарей от торфяных и лесоторфяных пожаров, которая для обширных и в большинстве случаев труднопроходимых территорий может быть выполнена только на основе дистанционных спутниковых данных.

Спутниковые данные дистанционного зондирований Земли (ДЗЗ) широко используются для выявления гарей. Определение сгоревших участков в глобальном масштабе основано преимущественно на данных низкого пространственного разрешения AVHRR (*англ*. Advanced Very-High-Resolution Radiometer), GOES (*англ*. Geostationary Operational Environmental Satellite) и MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Long et al., 2019). Большое внимание уделяется разработке продуктов на основе данных Landsat (Барталев и др., 2012; Мячина, Павлейчик, 2017; Шинкаренко, 2019; Шихов, Зарипов, 2018 и др.), которые стали основой ряда региональных оценок. Однако подходы, успешно применяемые для MODIS, Vegetation и т.д., не работают должным образом из-за ограниченного временного разрешения Landsat. Анализ отражающей способности может быть осложнён облачностью и быстрым послепожарным изменением растительности (Alonso-Canas, Chuvieco, 2015). Использование снимков Landsat для обширных территорий требует подбора и обработки большого объёма данных. И в целом имеющиеся наработки касаются определения участков со сгоревшим растительным покровом и не апробированы непосредственно на выявление гарей от торфяных пожаров.

Нами сделана попытка рассмотреть применимость ряда известных спектральных индексов, как специально разработанных для обнаружения гарей, так и не специфичных, для определения на примере данных Landsat площадей, пройденных торфяными пожарами 2010 г. в Московской обл., с проверкой по наземным данным.

#### Объекты и исходные данные

Исследования проводились на примере гарей 2010 г. в Московской обл., где наблюдались наиболее масштабные лесоторфяные пожары в Европейской части России за последние десятилетия (Сирин и др., 2011, 2020; Safronov et al., 2015). При общей площади 44 329 км<sup>2</sup> (вместе с Москвой — 46 890 км<sup>2</sup>) северная и особенно восточная части области сильно заболочены. Торфяные болота и осушенные торфяники занимают более 2500 км<sup>2</sup>, или 6 % её территории (Сирин и др., 2014). Регион лидирует по площади заброшенных полей фрезерной добычи торфа, которые вместе с неиспользуемыми осушенными сельскохозяйственными землями оказываются наиболее проблемными с точки зрения торфяных пожаров. В 2010–2013 гг. для снижения опасности торфяных пожаров в Московской обл. были обводнены 77 осушенных торфяных массивов общей площадью 73 049 га, что стало наиболее масштабным опытом таких мероприятий в Северном полушарии (Сирин и др., 2020).

В работе были использованы спутниковые данные Landsat-5, которые отличаются большой шириной покрытия съёмки (185 км), наличием NIR (*англ*. near infrared, ближний инфракрасный) и двух SWIR (*англ*. short wave infrared, коротковолновый инфракрасный) спектральных каналов и свободным доступом. Использовались два пролёта для допожарного периода: две сцены за 01.07.2010 с покрытием 67 % исследуемой площади и три сцены за 15.07.2010 с покрытием 33 % площади (*puc. 1*). Для послепожарного периода использовались три пролёта, которые включали две сцены за 02.06.2011 (67 % площади), одну сцену за 07.06.2011 (7 %) и три сцены за 28.08.2011 (26 %). При перекрытии данных 2011 г. приоритетными выбирались снимки за 02.06.2011 и 07.06.2011. Для тематической обработки использовались снимки с радиометрической калибровкой и атмосферной коррекцией.



*Рис. 1.* Положение сцен спутниковых снимков Landsat-5: *a* — 2010 г., до пожаров; *б* — 2011 г., после пожаров. Красным цветом показаны торфяные болота и торфяники (Сирин и др., 2014), жёлтым — обследованные территории

Анализ данных проводился в рамках границ болот и торфяников Московской обл. (Сирин и др., 2014). Для проверки точности определения гарей случайным образом было выбрано 598 точек на 151 торфяниках. В 2017 г. было проведено их наземное обследование на предмет наличия или отсутствия последствий торфяных пожаров. Общая длина автомобильных маршрутов составила около 2 тыс. км, пеших — около 25 км. На них делались почвенные прикопки для установления следов торфяных пожаров. Общая площадь участков с точками проверки составила 243 км<sup>2</sup> (см. *рис. 1*). Наличие/отсутствие гарей после пожаров 2010 г. дополнительно уточнялось по спектральным характеристикам спутниковых данных за 2010 и 2011 гг.

#### Анализ применимости спектральных индексов

Для проверки возможности выявления гарей от торфяных пожаров были протестированы индексы, наиболее часто используемые для оценки состояния растительного покрова (*табл. 1*).

Индекс	Формула расчёта	Источник
NDVI ( <i>англ</i> . Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный вегетационный индекс	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(Rouse et al., 1973)
NDMI ( <i>англ</i> . Normalized Difference Moisture Index) — нормализованный разностный индекс влажности	$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	(Gao, 1996)
NBR ( <i>англ</i> . Normalized Burn Ratio) — нормализованный индекс гарей	$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$	(Key, Benson, 1999)
NBR2 ( <i>англ</i> . Normalized Burn Ratio 2) — нормализованный индекс гарей	$NBR2 = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2}$	(Key, Benson, 1999)
MIRBI (англ. Mid-Infrared Burned Index) — индекс гари в среднем инфра- красном диапазоне	MIRBI = 10 SWIR2 - 9,8 SWIR1 + 2	(Trigg, Flasse, 2001)
BAI ( <i>англ</i> . Burned Area Index) — индекс гари	$BAI = \frac{1}{(NIR - 0.06)^2 + (RED - 0.1)^2}$	(Chuvieco et al., 2002)

Таблица 1. Используемые в работе вегетационные индексы

Примечание: Спектральные каналы Landsat-5: RED — 0,63–0,69 мкм; NIR — 0,75–0,90 мкм; SWIR1 — 1,55–1,75 мкм; SWIR2 — 2,08–2,35 мкм.

Определение наиболее подходящего индекса проводилось на основе модельной пары пролётов спутниковых данных 01.07.2010–02.06.2011 (см. *рис. 1*) и включало этапы: 1) уточнение наличия/отсутствия гарей в рамках наземных контуров путём сопоставления спутниковых данных до и после пожара — устранение водных объектов и несгоревшей растительности; 2) вычисление вегетационных индексов (см. *табл. 1*) по спутниковым данным до (2010) и после (2011) пожара (Index2010 и Index2011); 3) вычисление разницы индексов  $\Delta$ Index = Index2010 – Index2011; 4) экспериментальное определение значений Index2011 и  $\Delta$ Index для выявления гарей путём выбора значений, наиболее полно охватывающих уточнённые наземные гари и максимально избегающих включение инородных участков; 5) выбор наиболее оптимального индекса путём оценки точности результатов определения гарей Index2011 и  $\Delta$ Index на базе полученных случайным образом 598 точек (*табл. 2*).

	Index2011		ΔIndex	
	Значение	Точность, %	Значение	Точность, %
NDMI	-0,250,03	81	>0,23	93
NBR	-0,30,3	78	>0,3	92
NBR2	00,25	76	>0,1	87
NDVI	0,20,55	68	>0,2	86
BAI	40120	65	<-30	72
MIRBI	1,41,7	58	<-0,2	59

Таблица 2. Значения вегетационных индексов и точность детектирования гарей

# Оценка площадей торфяных пожаров

Выявление гарей 2010 г. на торфяниках Московской обл. проводилось с использованием показателя  $\Delta$ NDMI, продемонстрировавшего наибольшую точность — 93 % (*maбл. 2*), и включало несколько этапов (*puc. 2*, см. с. 161). Для каждого из трёх пролётов 2011 г. вычислялась разность  $\Delta$ NDMI = NDMI2010 – NDMI2011. Далее на основе установленных наземным путём и уточнённых по спутниковым данным контуров гарей проводился на всех пролётах анализ применимости для выявления гарей найденного ранее порога  $\Delta$ NDMI > 0,23.

Для повышения эффективности выявления гарей была проведена классификация без обучения исходных данных после пожара на 50 классов в рамках границ торфяников только тех пикселей, у которых значения  $\Delta$ NDMI > 0,23. Большее число классов обеспечивает более дробное деление покрова и увеличивает точность выявления необходимых категорий покрова. При классификации были исключены классы с водными объектами, ошибка детектирования которых была отмечена при оценке применимости шести индексов и их временных разностей. Классы водных объектов визуально интерпретировались экспертом на базе наземных данных.

При детектировании по разности ΔNDMI > 0,23 на одном из трёх пролётов был выделен ряд «посторонних» участков, относящихся преимущественно к сельскохозяйственным полям и речным поймам. Для повышения качества детектирования были добавлены образцы пожаров на основе имеющихся наземных данных. К ранее полученной классификации без обучения, включающей 50 классов, были добавлены ещё 4 класса, полученные с помощью обучения. Присвоение полученным классам значения «гарь»/«не гарь» проводилось методом визуального экспертного анализа на основе имеющихся наземных данных.



Рис. 2. Основные этапы выявления гарей после пожаров 2010 г. на торфяниках Московской обл.

После выявления всех гарей был установлен их минимальный достоверно определяемый размер не менее 9 пикселей Landsat — 0,81 га. По 598 наземным точкам была оценена точность выявленных площадей гарей на торфяниках Московской обл., которая составила 95 %.

Общая площадь гарей от пожаров 2010 г. по всем трём пролётам на торфяниках Московской обл. составила 198 км<sup>2</sup>. Из 1438 гарей 899 (63 % по числу) не совпали с тепловыми аномалиями, предоставленными Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и полученными по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км (Барталев и др., 2012). Это близко аналогичным сопоставлениям, согласно которым около половины пожаров не отражаются в тепловых аномалиях (Шинкаренко, 2019). При этом торфяные пожары обычно не отличаются большими размерами. Недоучитываются небольшие по площади пожары: дополнительные выявленные нами 899 гарей составляют в целом 34 км<sup>2</sup>, или 17 % общей площади. При более общирных пожарах оценки интегральной площади лесных пожаров на основе результатов детектирования активного горения могут иметь относительные ошибки менее 10 % (Стыценко и др., 2016).

# Заключение

Наличие картографической информации о границах торфяных болот и антропогенно изменённых торфяников позволяет путём совмещения с ними данных о природных пожарах вычленить гари от торфяных (для лесных площадей — так называемых подземных) пожаров.

Для более точного выявления гарей на примере данных Landsat-5 были изучены возможности применения индексов NBR, NBR2, BAI, MIRBI, NDVI и NDMI на следующий после пожаров 2010 г. в Московской обл. сезон вегетации с наземной проверкой. Эти площади имели различный допожарный земной покров, что характерно как для естественных болот, так

и для антропогенно изменённых торфяников. Были определены диапазоны значений детектирования гарей для каждого из индексов на послепожарный период (2011) и разницы индексов ( $\Delta$ ) по сравнению с допожарным (2010). Наиболее точным оказался разностный индекс  $\Delta$ NDMI, который далее был использован для выявления всех гарей 2010 г. на торфяниках Московской обл.

Использование разности индекса NDMI «до пожара – после пожара» (ΔNDMI) с проведением комбинированной классификации без обучения и с обучением позволило с точностью 95 % выделить гари 2010 г. на торфяниках Московской обл. Было установлено 1438 гарей общей площадью 198 км<sup>2</sup>, из которых 899 (63 % по числу) не совпали с предоставленными ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) тепловыми аномалиями по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км (Барталев и др., 2012). Эти гари составили 34 км<sup>2</sup>, или 17 % их общей площади. Апробированная методика может быть применима на основе спутниковых данных с подобными Landsat-5 спектральными характеристиками не только для торфяных, но и других природных пожаров, включая лесные.

Работа проводилась при поддержке проекта Российского научного фонда № 19-74-20185 и российско-германского проекта № 11 III 040 RUS К «Восстановление торфяников».

### Литература

- 1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е. В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- 2. Вомперский С. Э., Глухова Т. В., Смагина М. В., Ковалев А. Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.
- 3. Вомперский С. Э., Сирин А. А., Сальников А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 5. *Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сирин А.А.* Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 80–88.
- 6. *Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сирин А.А., Маслов А.А.* Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 76–84. DOI: 10.7868/ S0205961417020051.
- 7. *Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сирин А.А., Маслов А.А.* Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 150–159. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
- 8. *Мячина К.В., Павлейчик В.М.* Опыт анализа гарей в степных районах южного Предуралья на основе изображений спутника Landsat // Изв. Оренбургского отд-ния Русского географ. об-ва. 2017. № 9 (42). С. 45–52.
- 9. *Сирин А.А., Минаева Т.Ю., Возбранная А.Е., Барталев С.А.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
- 10. *Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О. П. Глухова Т.В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
- 11. *Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я. И.* Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422.
- 12. Сирин А.А., Медведева М.А., Макаров Д.А., Маслов А.А., Юстен Х. Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 2. С. 314–336. URL: https://escjournal.spbu.ru/article/view/5614.

- 13. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Иванова А.А., Лупян Е.А., Сычугов И.Г. Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 289–298.
- 14. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: ГЕОС, 2001. 190 с.
- 15. Шинкаренко С. С. Пожарный режим ландшафтов северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 121–133.
- 16. Шихов А. Н., Зарипов А. С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северовостоке европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128.
- 17. *Alonso-Canas I., Chuvieco E.* Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 163. P. 140–152.
- Chuvieco E., Martin M. P., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. P. 5103–5110. DOI: 10.1080/01431160210153129.
- 19. *Gao B.* NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 257–266.
- IPPC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / eds. T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T. G. Troxler. Switzerland: IPCC, 2014. 354 p. URL: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html.
- IPCC 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems /eds. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley. URL: https://www.ipcc.ch/srccl/ (In press).
- 22. *Key C. H., Benson N. C.* The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM Radiometric Measure of Burn Severity. United States Geological Survey. Bozeman, MT, USA: Northern Rocky Mountain Science Center, 1999.
- 23. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang Guizhou W., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // Remote Sensing. 2019. V. 11. Art. No. 489, 30 p. DOI: 10.3390/rs11050489.
- Minayeva T., Sirin A., Stracher G. B. The Peat Fires of Russia // Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V. 2: Photographs and Multimedia Tours / eds. Stracher G. B., Prakash A., Sokol E. V. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013. P. 375–394.
- 25. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3<sup>rd</sup> ERTS Symp. Washington, DC, USA: NASA, 1973. P. 309–317.
- Safronov A., Fokeeva E., Rakitin V., Grechko E., Shumsky R. Severe Wildfires near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 395–429. DOI: 10.3390/rs70100395.
- Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A. Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data // Land. 2018. V. 7. No. 2. Art. No. 71. 22 p. DOI: 10.3390/land7020071.
- 28. *Trigg S., Flasse S.* An evaluation of different bispectral different for discriminating burned shrub-savannah // Intern. J. Remote Sensing. 2001. V. 22. P. 2641–2647. DOI: 10.1080/01431160110053185.

# Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation

### M.A. Medvedeva, D.A. Makarov, A.A. Sirin

#### Institute of Forest Science RAS, Uspenskoye, Moscow Region 143030, Russia E-mail: medvedeva@ilan.ras.ru

The possibility to detect burned areas after peat fires on the basis of cartographic information about the borders of peat bogs and anthropogenically modified peatlands with the analysis of data on wild fires was shown. For more accurate detection of burnt areas on the example of Landsat-5 data, the possibilities of applying the indexes NBR, NBR2, BAI, MIRBI, NDVI and NDMI for the next after fire vegetation season with field-check data after the 2010 fires in the Moscow region have been studied. These areas had a diverse pre-fire land cover, which is typical of both peat bogs and used or abandoned drained peatlands. Ranges of burned areas detection values were determined for each of the post-fire indexes and the differences in the indexes as compared to the pre-fire one. The difference index  $\Delta$ NDMI was determined as the most accurate one, which was further used for detecting all 2010 peat fires in the Moscow Region. The  $\Delta$ NDMI index in combination with classification without training and with training made it possible to identify with a high accuracy (95%) peat burned areas. At the same time, most of the burned areas were not previously detected by thermal anomalies according to MODIS data with spatial resolution of 1 km. The tested approach of detection of burned areas can be applied on the basis of satellite data with similar Landsat-5 spectral characteristics not only for peat, but also for other wild fires, including forest fires.

**Keywords:** remote sensing, multispectral images, peatlands, vegetation cover, peat fires, Landsat-5, vegetation indexes

Accepted: 12.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166

#### References

- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multiresolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
- 2. Vompersky S. E., Glukhova T. V., Smagina M. V., Kovalev A. G., Usloviya i posledstviya pozharov v sosnyakakh na osushennykh bolotakh (The Conditions and Consequences of Fires in Pine Forests on Drained Bogs), *Lesovedenie*, 2007, Vol. 6, pp. 35–44.
- Vompersky S. E., Sirin A. A., Salnikov A. A., Tsyganova O. P., Valyaeva N. A., Estimation of Forest Cover Extent over Peatland and Paludified Shallow Peatlands in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, pp. 734–741, DOI: 10.1134/S1995425511070058.
- Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (CKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A., Sirin A.A., Otsenka sostoyaniya zabroshennykh torforazrabotok po mnogospektral'nym sputnikovym izobrazheniyam (Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 5, pp. 80–88.
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A., Capabilities of Multispectral Remote-Sensing Data in an Assessment of the Status of Abandoned Fire Hazardous and Rewetting Peat Extraction Lands, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, pp. 1070–1078, DOI: 10.1134/ S0001433817090201.

- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A., Vozmozhnosti razlichnykh mul'tispektral'nykh kosmicheskikh dannykh dlya monitoringa neispol'zuemykh pozharoopasnykh torfyanikov i effektivnosti ikh obvodneniya (Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 150–159, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
- 8. Myachina K. V., Pavleichik V. M., Opyt analiza garei v stepnykh raionakh yuzhnogo Predural'ya na osnove izobrazhenii sputnika Landsat (Experience in the analysis of burns in the steppes of the southern Urals based on Landsat satellite images), *Izvestiya Orenburgskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchest-va*, 2017, Vol. 9(42), pp. 45–52.
- 9. Sirin A., Minayeva T., Vozbrannaya A., Bartalev S., How to avoid peat fires? *Science in Russia*, 2011, Vol. 2, pp. 13–21.
- 10. Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V., Kartografirovanie torfyanykh bolot Moskovskoi oblasti po dannym kosmicheskoi s"emki vysokogo razresheniya (Mapping of peatlands of Moscow region based on high resolution satellite imagery data), *Lesovedenie*, 2014, Vol. 5, pp. 65–71.
- 11. Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gulbe Ya.I., Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom pozhare (Depth of Peat Burning and Carbon Losses from an Underground Forest Fire), *Lesovedenie*, 2019, Vol. 5, pp. 410–422.
- 12. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H., Monitoring rastitel'nogo pokrova vtorichno obvodnennykh torfyanikov Moskovskoi oblasti (Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 65, No. 2, available at: https://escjournal.spbu.ru/article/view/5614.
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Ivanova A.A., Loupian E.A., Sychugov I.G., Vozmozhnosti otsenki ploshchadei lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniya (Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 289–298.
- 14. *Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoi informatsii* (Peatlands of Russia: towards analysis of sectorial information), Sirin A. A., Minaeva T. Yu. (eds.), Moscow: GEOS, 2001, 190 p.
- 15. Shinkarenko S. S., Pozharnyi rezhim landshaftov severnogo Prikaspiya po dannym ochagov aktivnogo goreniya (Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133.
- Shikhov A. N., Zaripov A. S., Mnogoletnyaya dinamika poter' lesov ot pozharov i vetrovalov na severovostoke evropeiskoi Rossii po sputnikovym dannym (Long-term dynamics of fireand wind-related forest losses in northeast European Russia from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 114–128.
- 17. Alonso-Canas I., Chuvieco E., Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 140–152.
- Chuvieco E., Martin M. P., Palacios A., Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, pp. 5103–5110, DOI: 10.1080/01431160210153129.
- 19. Gao B., NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, pp. 257–266.
- IPPC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T. G. Troxler (eds.), Switzerland: IPCC, 2014, 354 p., available at: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index. html.
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.), available at: https:// www.ipcc.ch/srccl/ (In press).
- 22. Key C. H., Benson N. C., *The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM Radiometric Measure of Burn Severity*, United States Geological Survey, Bozeman, MT, USA: Northern Rocky Mountain Science Center, 1999.
- 23. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang Guizhou W., Yin R., 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Art. No. 489, 30 p. DOI: 10.3390/rs11050489.
- 24. Minayeva T., Sirin A., Stracher G. B., The Peat Fires of Russia, In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V. 2: Photographs and Multimedia Tours*, Stracher G. B., Prakash A., Sokol E. V. (eds.), Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013, pp. 375–394.

- 25. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *3<sup>rd</sup> ERTS Symp.*, Washington, DC, USA: NASA, 1973, pp. 309–317.
- Safronov A., Fokeeva E., Rakitin V., Grechko E., Shumsky R., Severe Wildfires near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 395–429, DOI: 10.3390/rs70100395.
- 27. Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A., Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data, *Land*, 2018, Vol. 7, No. 2, Art. No. 71, 22 p., DOI: 10.3390/land7020071.
- 28. Trigg S., Flasse S., An evaluation of different bispectral spaces for discriminating burned shrub-savannah, *Intern. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, pp. 2641–2647, DOI: 10.1080/01431160110053185.