

## Использование оптических и радарных спутниковых данных для оценки состояния растительного покрова под воздействием внешних факторов: постпирогенные нарушения

П. А. Черненко, В. Иванов, М. А. Медведева

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

Точное выявление площадей пожаров, особенно торфяных, имеет большое значение для решения задачи по оценке выбросов парниковых газов и потерь углерода. По опубликованным прогнозам, именно торфяные пожары могут стать ключевым препятствием для достижения задачи сокращения выбросов парниковых газов в рамках Парижского соглашения по климату. Использование методов обнаружения гарей после пожаров, основанных на радарной съёмке, обеспечивает явные преимущества перед другими типами датчиков: данная часть спектра обычно не зависит от атмосферных эффектов, достаточно чувствительна к структуре растительности и влажности почв, а существующие недостатки легко минимизируются добавлением оптических данных. Цель работы заключалась в исследовании возможностей применения данных радара с синтезированной апертурой в диапазоне С для выявления гарей на торфяных почвах. Были протестированы однополяризационные и кросс-поляризационные данные на примере Рязанской области. Кроме того, были проанализированы оптические данные, а также их комбинация с радарными. Оценка точности полученных результатов проводилась сравнением с полевыми данными. Наше исследование показало, что при совместном использовании двух диапазонов повышается общая точность классификации.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, торфяные болота, торфяные пожары, Sentinel-1, Sentinel-2, радиолокационный диапазон, оптический диапазон

Одобрена к печати: 13.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-195-205

### Введение

Природные пожары — мощные естественные экологические факторы, воздействующие на растительные сообщества. Они приводят к негативным последствиям для биоразнообразия, структуры и устойчивости природных экосистем. Во многих регионах мира пожары остаются важным фактором трансформации землепользования. Согласно недавним оценкам, основанным на использовании спутниковых данных дистанционного зондирования Земли, ежегодно во всём мире выгорает около 4 млн км<sup>2</sup> (Chuvieco et al., 2019).

Для лесных зон умеренных широт, в силу высокой степени заболоченности, особо актуален вопрос о мониторинге торфяных пожаров. Торфяные пожары отличаются от лесных длительностью горения, скоростью распространения и трудностью обнаружения. Экологические последствия таких пожаров более серьёзны: с одной стороны, из-за загрязнения воздуха опасными для человека веществами, в том числе диоксидом углерода и сажей (Сирин и др., 2020; Hu et al., 2018; Marlier et al., 2019; Rein et al., 2021), с другой, из-за значительного повреждения сосущих корневых систем деревьев, приводящего к последующей гибели древостоев (Вомперский и др., 2007).

Около 20 % площади нашей страны покрыты торфом (Вомперский и др., 1994), а в европейской части — 17 % (Tanneberger et al., 2017). Запасы углерода в торфах превышают таковые в растительности, поэтому, сгорая, торфяники оказывают более сильное влияние на климат нашей планеты (Assessment..., 2008). Пожароопасность торфяников возрастает после их осушения, особенно, если не проводилась рекультивация и отсутствует дальнейший контроль (Сирин и др., 2011; Joosten et al., 2016).

Точное выявление площадей пожаров, особенно торфяных, имеет большое значение для решения задачи по оценке выбросов парниковых газов и потерь углерода. По опубликованным прогнозам, именно торфяные пожары могут стать ключевым препятствием для достижения задачи сокращения выбросов парниковых газов в рамках Парижского соглашения по климату (Leifeld et al., 2019; Loisel et al., 2021). Ранее в международных стандартах («Руководящие принципы инвентаризаций парниковых газов» МГЭИК, 2006) рассматривались методологии оценки выбросов только при сгорании биомассы. Сейчас, на основании дополнения 2013 г., методика включает оценку выбросов парниковых газов в результате сгорания органических почв (Blain et al., 2006; IPCC..., 2014, 2019).

Для эколого-экономической оценки пострадавших территорий важно оперативное определение масштабов пожаров и их возможных последствий. Частая труднодоступность болотных систем предполагает использование материалов космической съёмки, которые позволяют быстро проводить исследования и охватить большие площади.

Наши предыдущие работы были посвящены исследованию возможностей оптического диапазона (Медведева и др., 2020; Сирин и др., 2022; Sirin, Medvedeva, 2022) для дешифрирования торфяных гарей. Для оценки возможности повышения точности дешифрирования было принято решение провести анализ данных радарного диапазона.

Радиолокатор с синтезированной апертурой SAR (*англ.* Synthetic Aperture Radar) обеспечивает возможность проводить съёмку вне зависимости от облачности. Данные SAR широко используются для обнаружения гарей, так как пожары уменьшают количество отражающих элементов растительности, что приводит к снижению коэффициента обратного рассеяния.

В литературе данные SAR активно применяются для обнаружения гарей, в основе всех методов лежит вычисление разницы коэффициента обратного рассеяния между парами или сериями изображений до пожара и после него. Наиболее часто используют SAR-индексы: радарный индекс сгорания RBD (*англ.* Radar Burn Difference), десятичный логарифм RBD —  $\log RBD$  (логарифмически масштабированный индекс сгорания), разностный радарный вегетационный индекс  $\Delta RVI$  (*англ.* Radar Vegetation Index), разностный радарный индекс растительности с двойной поляризацией  $\Delta DPSVI$  (*англ.* Dual Polarization SAR Vegetation Index). В некоторых работах применяют методы поляриметрического разложения на основе данных с полной поляризацией, чтобы полностью описать процесс отражения, усиливая или подавляя вклады отдельных конкретных механизмов рассеяния, что, в свою очередь, позволяет улучшить поиск интересующих биофизических характеристик для выявления гарей (Chuviesco et al., 2019; De Luca et al., 2021; Stroppiana et al., 2015).

Чтобы снизить влияние влажности почв во многих работах используют радарный диапазон вместе с оптическим, сравнивая полученные результаты с изображениями индексов NDVI/NBR, где NDVI — нормализованный относительный индекс растительности (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и NBR — нормализованный индекс гарей (*англ.* Normalized Burn Ratio) (Копылов и др., 2007).

Целью нашего исследования было сравнение эффективности применения данных радарного и оптического диапазонов для дешифрирования торфяных гарей.

## Объекты и методы

### Объект исследования

Исследования проводились на примере сгоревшего участка в Рязанской области, часть которого расположена на территории национального парка «Мещерский» (*рис. 1*). Объект включает в себя обширные заболоченные, благодаря плоскому пониженному рельефу, участки, покрытые берёзово-сосновыми лесами. По данным температурных аномалий спектрорадиометра среднего разрешения MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) огнём было пройдено 42 650 га с 6 августа по 21 сентября 2022 г., местами выгорела вся растительность целиком.

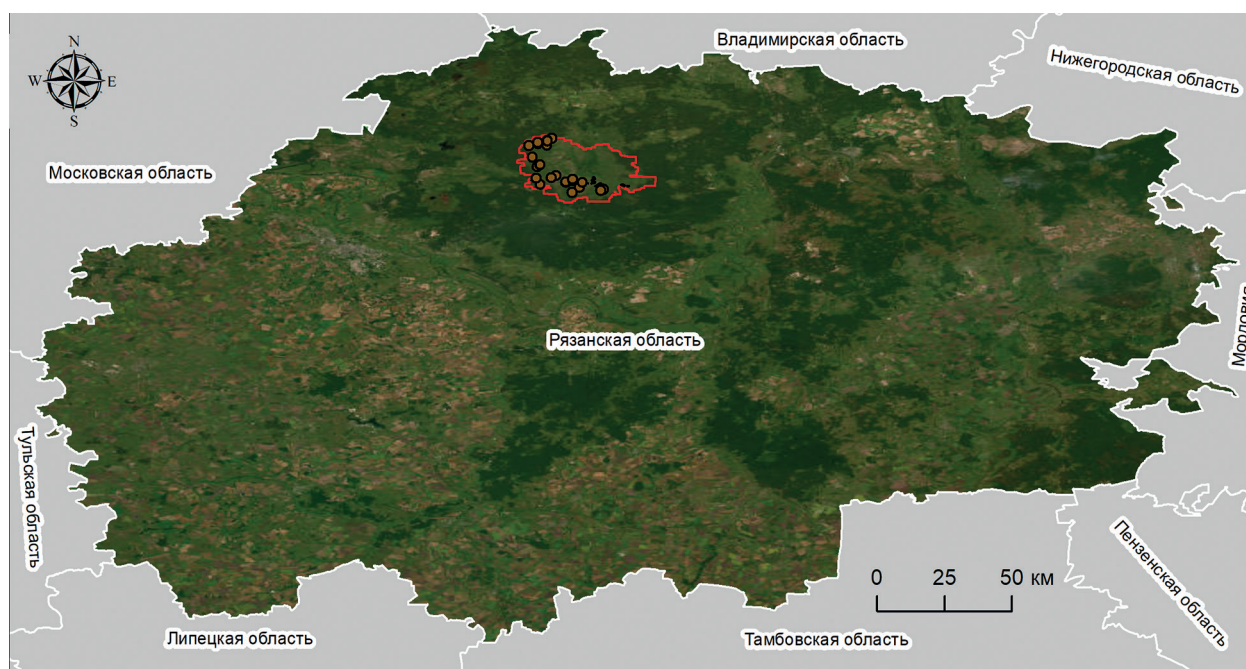


Рис. 1. Размещение объекта исследования (красная линия) и места получения наземных данных (коричневые точки)

### Исходные данные

Анализировались две серии радиолокационных данных Sentinel-1 (до пожара и после него), по три снимка в каждой серии в двух поляризациях и два снимка Sentinel-2 (табл. 1), предоставленные Центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Таблица 1. Характеристики использованных в работе спутниковых данных

| Серия                      | Дата съёмки | Спутник     | Диапазон; № канала | Поляризация | Разрешение, м |
|----------------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|---------------|
| Радиолокационный диапазон  |             |             |                    |             |               |
| До пожара (за 1 месяц)     | 27.06.2022  | Sentinel-1A | С                  | VV; VH*     | 10            |
|                            | 21.07.2022  |             |                    |             |               |
|                            | 09.07.2022  |             |                    |             |               |
| После пожара (через 1 год) | 09.08.2023  |             |                    |             |               |
|                            | 14.09.2023  |             |                    |             |               |
|                            | 02.09.2023  |             |                    |             |               |
| Оптический диапазон        |             |             |                    |             |               |
| До пожара (за 1 месяц)     | 02.07.2022  | Sentinel-2B | 2, 3, 4, 8, 11     |             | 20            |
| После пожара (через 1 год) | 31.08.2023  |             |                    |             |               |

\* VV — вертикальная поляризация, VH — кросс-поляризация (V, *англ.* vertical; H, *англ.* horizontal).

Полевые исследования на объекте проводились в августе 2023 г. и включали следующие работы: наземное обследование участков, определение границ пожаров, картографирование и фотосъёмку участков, выявление мощности оставшегося торфа. Автомобильный маршрут составил около 1,3 тыс. км, пеший — примерно 25 км. Наземные данные собирались в 32 точках и на 15 участках общей площадью 2,7 км<sup>2</sup>. Точки расположены в северо-западной,

западной и южной части гари, участки — в северо-западной, южной и юго-восточной части. В выборку, использовавшуюся для оценки точности классификаций, вошло 683 точки. Она включает в себя все полевые точки (32) и точки (651), равномерно распределённые по контрольным участкам гарей на основе регулярной сетки с шагом 60 м. Всего 200 принадлежало к классу «не гарь» и 483 — к классу «гарь».

Для обработки данных использовались программные пакеты QGIS 3.28 (англ. Quantum Geographic Information Systems) и SNAP (англ. Sentinel Application Platform) (ESA (англ. European Space Agency)).

### Методика

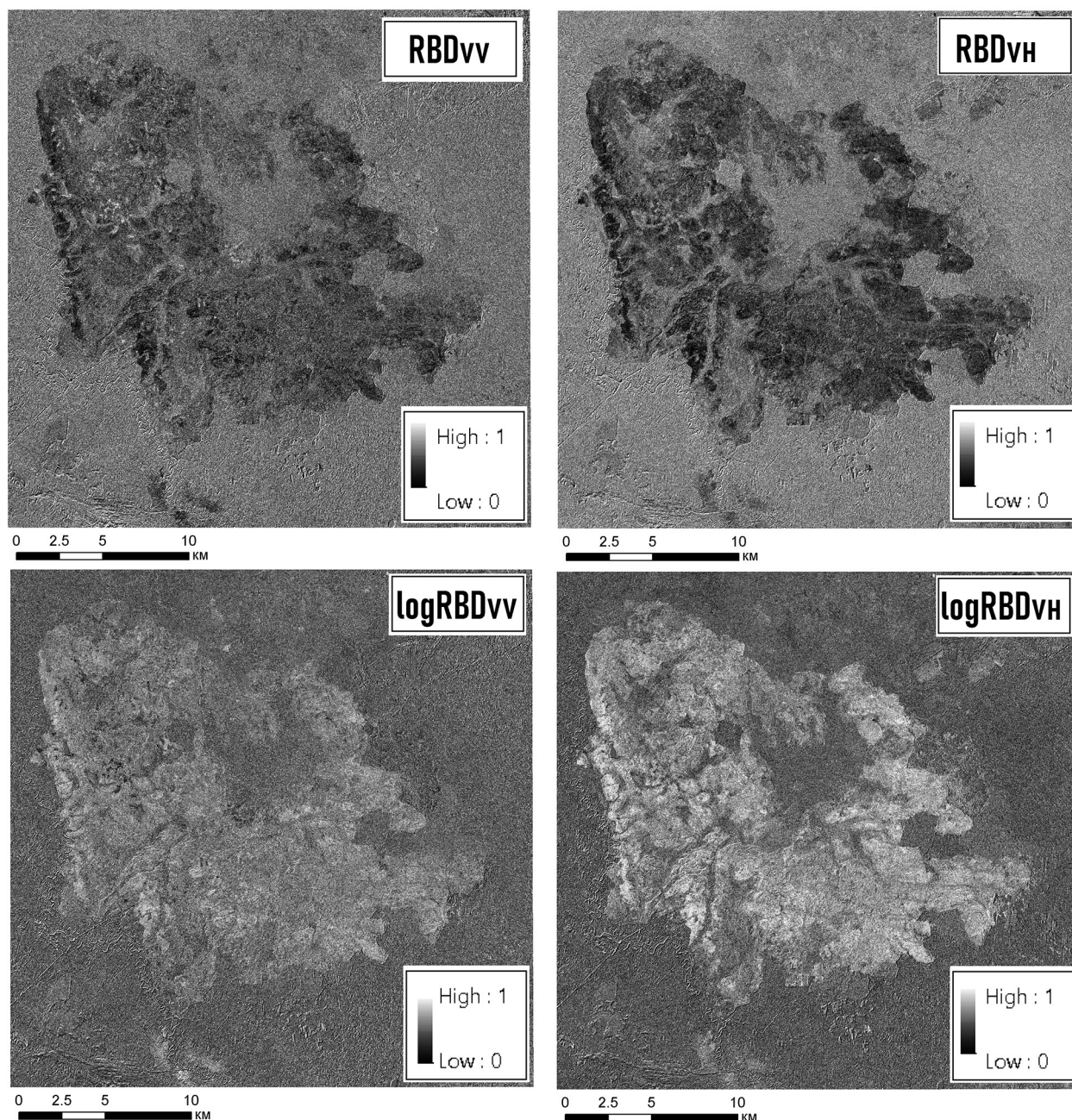


Рис. 2. Примеры однополяризационных радарных индексов  $RBD_{vv}$ ,  $RBD_{vh}$ ,  $\log RBD_{vv}$ ,  $\log RBD_{vh}$  при отображении исследуемого пожара

Для радиолокационных данных проводилось сравнение двух серий снимков: ДО и ПОСЛЕ пожара (De Luca, 2021). Работа состояла из трёх этапов:

#### 1. Расчёт индексов.

Сначала были вычислены средние значения для двух серий снимков для каждой поляризации, а затем были рассчитаны однополяризационные радарные индексы растительности (рис. 2):

- индекс RBD представляет собой разницу между средним временем обратного рассеяния до возгорания и после него и рассчитывается по формуле:

$$RBD_{xy} = \text{ПОСЛЕ пожарное среднее}_{xy} - \text{ДО пожарное среднее}_{xy},$$

где  $xy$  отражает вид поляризации (VV или VH);

- $\log RBD$  — логарифмически масштабированный RBD, который вычисляется следующим образом:

$$\log RBD_{xy} = \log_{10} \left( \frac{\text{ПОСЛЕ пожарное среднее}_{xy}}{\text{ДО пожарное среднее}_{xy}} \right).$$

Для получившихся слоёв значений индексов были вычислены пять текстурных признаков GLCM (*англ.* Grey Level Co-occurrence Matrix): Dissimilarity (несходство/различие), Entropy (энтропия), Correlation (корреляция), Mean (среднее), Variance (дисперсия) — с размером окна поиска  $11 \times 11$  пикселей. Это позволило усилить контраст между изменёнными и неизменёнными областями на снимках. Выбор оптимальных слоёв для последующей классификации изображений проводился экспертным методом.

Нормализация значений данных выполнялась по формуле:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}},$$

где  $x_{norm}$  — новое нормализованное значение;  $x$  — значение, которое необходимо нормализовать;  $x_{min}$  и  $x_{max}$  — наименьшее и наибольшее значение данных соответственно.

Отдельно на базе оптических данных вычислялся индекс dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio) (Key, Benson, 1999) по следующим выражениям:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}, \quad dNBR = NBR_{\text{ДО пожара}} - NBR_{\text{ПОСЛЕ пожара}},$$

где NIR (*англ.* near infrared) — ближний инфракрасный диапазон; SWIR (*англ.* short wave infrared) — коротковолновый инфракрасный диапазон.

#### 2. Классификация изображений (алгоритм $k$ -средних (*англ.* $k$ -means algorithm)) и создание масок гарей.

Классификация полученных изображений проводилась с использованием алгоритма  $k$ -means — метода кластеризации данных. Он известен как один из самых простых и быстрых алгоритмов машинной классификации без учителя. Основываясь на заданном наборе данных, алгоритм проводит кластеризацию пикселей с однородными характеристиками в заранее определённое экспертным методом количество кластеров  $k$ . Использовалось  $k = 6$ .

#### 3. Оценка точности результатов.

Экспертным методом полученные шесть классов были разделены на две категории: гарь и негоревшие территории. Для оценки точности классификаций созданные маски пожаров сравнивались с соответствующими эталонными площадками гарей, полученными в ходе полевых работ. Учитывались только классы, соответствующие фактической площади пожаров, остальные были объединены в «негоревший» класс. Расчёт точности проводился в программе QGIS с помощью модуля AcATaMa (*англ.* Accuracy Assessment of Thematic Maps). Для сравнения двух наборов снимков оптического диапазона был проведён расчёт общей точности классификации индекса dNBR.

## Результаты

На картосхемах результатов, полученных на основе радарных (рис. 3) и оптических (рис. 4) данных, гари выделены жёлтым цветом. На данной территории гари представляют собой леса на торфе и песках разной степени повреждения. Встречаются открытые сильно выгоревшие выделы с полностью уничтоженными древесным и травяно-кустарничковым ярусами, моховой ярус сохранился лишь на высоких кочках. Через год после пожара наблюдался начинающийся процесс восстановления, представленный в основном всходами берёзы пушистой (*Betula pubescens*). Большую площадь занимали поваленные, полусгоревшие стволы сосен и берёз.

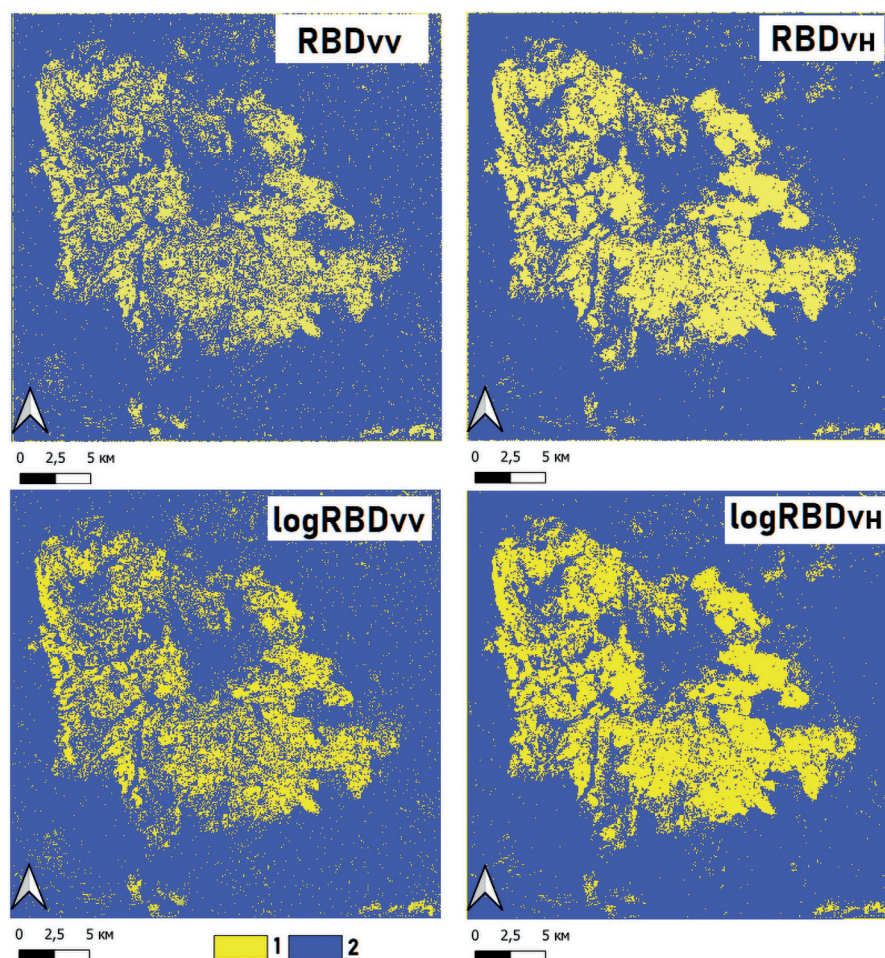


Рис. 3. Классификация изображений индексов радиолокационного диапазона. 1 — гари, 2 — негоревшие территории

Негоревшие территории для удобства были объединены в один класс и на картосхемах отмечены синим цветом (см. рис. 3, 4). Изменение на этих выделах были минимальными и можно говорить о том, что никакого существенного воздействия на данную территорию за период с 2022 по 2023 г. не произошло. Сюда были отнесены все территории с неповреждённой растительностью. Точность всех классификаций при сравнении с полевыми данными составила более 70 %.

Использование радарного диапазона (см. рис. 3) позволяет достаточно точно (78,45–92,68 %) выделять гари (табл. 2). Лучше работает поляризация VH: наиболее точными здесь оказались индексы  $RBD_{VH}$  и  $\log RBD_{VH}$ , общая точность (табл. 2) составляет 92,68 и 92,37 % соответственно.

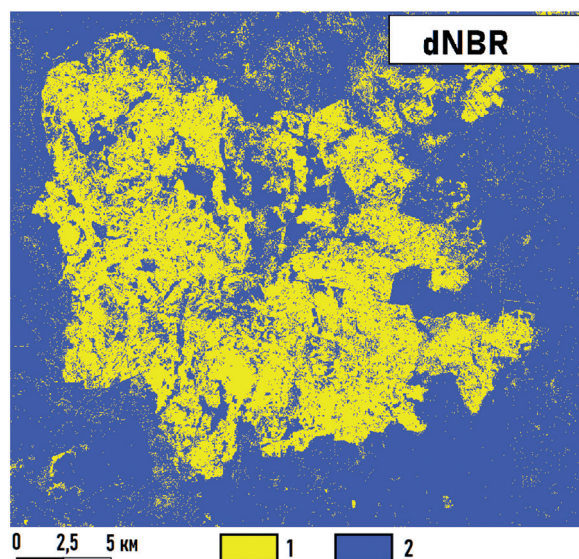


Рис. 4. Классификация изображения индекса оптического диапазона dNBR Sentinel-2B. 1 — гари, 2 — негоревшие территории

Таблица 2. Оценка точности результатов классификации

| Индекс           | Общая точность, % | Индекс                | Общая точность, % | Индекс                 | Общая точность, % |
|------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| $RBD_{VV}$       | 78,45             | $RBD_{VV} + RGB^*$    | 88,00             | $RBD_{VV} + dNBR^*$    | 91,65             |
| $RBD_{VH}$       | 92,68             | $RBD_{VH} + RGB$      | 96,05             | $RBD_{VH} + dNBR$      | 93,41             |
| $\log RBD_{VV}$  | 80,67             | $\log RBD_{VV} + RGB$ | 79,80             | $\log RBD_{VV} + dNBR$ | 72,77             |
| $\log RBD_{VH}$  | 92,37             | $\log RBD_{VH} + RGB$ | 80,67             | $\log RBD_{VH} + dNBR$ | 96,34             |
| dNBR Sentinel-2B | 90,04             |                       |                   |                        |                   |

\* RGB — синтез каналов Red (красного), Green (зелёного) и Blue (синего).

Индекс dNBR по снимкам Sentinel-2B (см. рис. 4) на данном наборе наземных данных достаточно хорошо выделяет участки гари — 90,04 % (табл. 2).

При синтезировании двух диапазонов, в варианте со снимками RGB, произошло увеличение точности для  $RBD_{VV}$  и  $RBD_{VH}$  до 88,00 и 96,05 % соответственно (табл. 2). Тогда как для логарифмированных индексов значения точности незначительно снизились. Синтез с dNBR оказался наиболее точным для индексов  $RBD_{VV}$ ,  $\log RBD_{VH}$  (96,65 и 96,34 % соответственно).

В целом все классификации достаточно точно выделили контур гари, с успехом отличая гарь от неповреждённой растительности, даже с учётом того, что степень выгорания сильно варьируется в пределах территории. При этом точность результатов для некоторых индексов радарного диапазона незначительно выше, чем для оптического.

## Заключение

Проведено сравнение эффективности использования данных радарного и оптического диапазонов для выявления торфяных гарей. Использование серий ДО и ПОСЛЕ пожарных данных радарного диапазона позволяет со значительной точностью выделить площади торфяных гарей. Индекс dNBR, рассчитанный по оптическим данным Sentinel-2, также показал высокую способность к выявлению постпирогенно нарушенных участков.

Наиболее точные результаты были достигнуты при объединении двух диапазонов: синтез  $RBD_{\text{VH}}$  с RGB-изображением — 96,05 %, синтез  $\log RBD_{\text{VH}}$  с dNBR — 96,34 %. Точность данных с поляризацией VV понижается при переходе от открытых гарей к лесным и при переходе к изначально более сухим участкам. Эти индексы менее чувствительны к состоянию выгоревшего участка и уровню локального воздействия пожара во влажных условиях, и в меньшей степени — в сухих условиях.

С учётом различий в геометрии получаемых контуров при близких значениях общей точности более корректно интерпретировать полученные результаты не как оценку точности восстановления границ и площади гари, а как оценку способности разных признаков разделять классы «гарь» и «негоревшие территории». Основное достоинство радиолокационных данных относительно оптических заключается в независимости от погодных условий, но наличие шумов делает необходимым предварительную предобработку таких данных. Показавший себя одним из наиболее чувствительных для выделения гарей и её динамики среди других индексов dNBR (Медведева и др., 2020; Chuvieco et al., 2002; French et al., 2008; Moreira de Araújo, Ferreira, 2015; Veraverbeke et al., 2010) основан на спектральных характеристиках растительности, тогда как радарные данные учитывают изменение характера отражения радиосигнала и применяются для обнаружения гарей в условиях плохой видимости. Наилучшие результаты получены при совместном использовании радарных и оптических данных. Это свидетельствует о том, что комбинирование двух диапазонов усиливает различимость сгоревших и несгоревших участков за счёт объединения информации о спектральных свойствах растительности и особенностях радиолокационного рассеяния, связанных со структурой растительного покрова и состоянием поверхности.

Разработанный подход по комбинированию снимков разных диапазонов нашёл своё применение и в других направлениях дистанционного зондирования Земли, в частности при дешифрировании увлажнённых и затопленных участков в работе по анализу растительности в зонах временного затопления и подтопления Рыбинского водохранилища.

Авторы благодарны Макарову Дмитрию Александровичу (Институт лесоведения РАН) за наземное обследование торфяных гарей, Центру коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований РАН за предоставленные данные и лично Балашову Ивану Васильевичу, Бурцеву Михаилу Александровичу за подготовку данных и Лупяну Евгению Аркадьевичу за советы и поддержку.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-74-00067, обработка полученных наземных данных была проведена в рамках государственного задания Института лесоведения РАН.

## Литература

1. Вомперский С. Э., Иванов А. И., Цыганова О. П., Валяева Н. А., Глухова Т. В., Дубинин А. И., Глухов А. И., Маркелова Л. Г. Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
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. Копылов В. Н., Полищук Ю. М., Хамедов В. А. Синтез оптических и радиолокационных космических снимков при решении задачи оперативного обнаружения лесных гарей // Гео-Сибирь. 2007. Т. 3. С. 157–162.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. 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., Макаров Д. А., Сирин А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.

6. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
7. *Сирин А.А., Медведева М.А., Макаров Д.А. и др.* Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 2. С. 314–336. DOI: 10.21638/spbu07.2020.206.
8. *Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю. и др.* Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 33–45. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45.
9. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: Main report / eds. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minaeva T., Silvius M., Stringer L. Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Intern., 2008. 179 p.
10. *Blain D., Row C., Alm J., Byrne K., Parish F., Duchemin É., Huttunen J. T., Tremblay A., Delmas R., Silveira Menezes C. F., Delmas R., Minayeva T., Pinguelli Rosa L. P., Sirin A.* Chapter 7. Wetlands // 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. V. 4: Agriculture, forestry and other land use. IPCC, 2006. 24 p.
11. *Chuvieco E., Martín 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.
12. *Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G. R. et al.* Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation // Remote Sensing of Environment. 2019. No. 225. P. 45–64. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
13. *De Luca G., Silva J. M. N., Modica G.* A workflow based on Sentinel-1 SAR data and open-source algorithms for unsupervised burned area detection in Mediterranean ecosystems // GIScience and Remote Sensing. 2021. V. 58. No. 4. P. 516–541. DOI: 10.1080/15481603.2021.1907896.
14. *French N. H. F., Kasischke E. S., Hall R. J. et al.* Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results // Intern. J. Wildland Fire. 2008. V. 17. P. 443–462. DOI: 10.1071/WF08007.
15. *Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G.* Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes // Intern. J. Wildland Fire. 2018. V. 27. No. 5. P. 293–312. DOI: 10.1071/WF17084.
16. IPCC, 2014: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC Methodology Report / eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T. G. IPCC, Switzerland, 2014. 354 p.
17. IPCC, 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / eds. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. IPCC, Switzerland, 2019. 1249 p.
18. *Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al.* The role of peatlands in climate regulation // Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Ecological Reviews. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 63–76. DOI: 10.1017/CBO9781139177788.005.
19. *Key C. H., Benson N. C.* The normalized burn ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. Bozeman, MT, USA: Northern Rocky Mountain Science Center, United States Geological Survey, 1999.
20. *Marlier M. E., Liu T., Yu K. et al.* Fires, smoke exposure, and public health: An integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration // GeoHealth. 2019. V. 3. Iss. 7. P. 178–189. DOI: 10.1029/2019GH000191.
21. *Moreira de Araújo F., Ferreira L. G.* Satellite-based automated burned area detection: a performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 36. P. 94–102. DOI: 10.1016/J.JAG.2014.10.009.
22. *Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S.* Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 // Nature Climate Change 2019. V. 9. Iss. 12. P. 945–947. DOI: 10.1038/s41558-019-0615-5.
23. *Loisel J., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J. et al.* Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink // Nature climate change. 2021. V. 11. Iss. 1. P. 70–77. DOI: 10.1038/s41558-020-00944-0.
24. *Rein G., Huang X.* Smouldering wildfires in peatlands, forests and the Arctic: Challenges and perspectives // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2021. V. 24. Article 100296. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100296.
25. *Sirin A., Medvedeva M.* Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: Identification among other wildfires // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 194. DOI: 10.3390/rs14010194.
26. *Stroppiana D., Azar R., Calò F. et al.* Integration of optical and SAR data for burned area mapping in Mediterranean regions // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 1320–1345. DOI: 10.3390/rs70201320.
27. *Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al.* The peatland map of Europe // Mires Peat. 2017. V. 19. Article 22. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.264.

28. Veraverbeke S., Verstraeten W.W., Lhermitte S., Goossens R. Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2010. V. 12. P. 60–70. DOI: 10.1016/J.JAG.2009.10.004.

## Integration of optical and radar data to assess the vegetation cover condition under the influence of external factors: Post-pyrogenic disturbances

P. A. Chernenko, V. Ivanov, M. A. Medvedeva

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

The use of radar-based methods for post-fire burn scar detection offers clear advantages over other sensor types: this part of the electromagnetic spectrum is generally unaffected by atmospheric effects, is sufficiently sensitive to vegetation structure and soil moisture, and its existing limitations can be readily minimized by incorporating optical data. The aim of this study was to investigate the potential of C-band synthetic aperture radar data for detecting burn scars on peat soils. Single-polarization and cross-polarization data were tested using Ryazan Region as a case study. In addition, optical data and their combination with radar data were analyzed. The accuracy of the obtained results was assessed by comparison with field data. Our study showed that the combined use of the two spectral ranges increased the overall classification accuracy.

**Keywords:** remote sensing, peat bogs, peat fires, Sentinel-1, Sentinel-2, radar range, optical range

Accepted: 13.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-195-205

## References

1. Vompersky S. E., Ivanov A. I., Tsyganova O. P., Valyaeva N. A., Glukhova T. V., Dubinin A. I., Glukhov A. I., Markelova L. G., Paludified soils and mires of Russia and carbon pool of their peat, *Pochvovedenie*, 1994, No. 12, pp. 17–25 (in Russian).
2. Vomperskii S. E., Glukhova T. V., Smagina M. V., Kovalev A. V., The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs, *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 35–44 (in Russian).
3. Kopylov V. N., Polishchuk Yu. M., Hamedov V. A., Synthesis of optical and radar space images in solving the problem of rapid detection of forest burns, *Geo-Sibir*, 2007, V. 3, pp. 157–162 (in Russian).
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., 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, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A., Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 5, pp. 157–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
6. Sirin A., Minaeva T., Vozbrannaya A., Bartalev S., How to avoid peat fires?, *Nauka v Rossii*, 2011, No. 2, pp. 13–22 (in Russian).
7. Sirin A. A., Medvedeva M. A., Makarov D. A. et al., Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast, *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2020, V. 65, No. 2, pp. 314–336 (in Russian), DOI: 10.21638/spbu07.2020.206.
8. Sirin A. A., Medvedeva M. A., Itkin V. Yu. et al., Peat fire detection to estimate greenhouse gas emissions, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 10, pp. 33–45 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45.

9. *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: Main report*, Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T. Yu., Silvius M., Stringer L. (eds.), Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Intern., 2008, 179 p.
10. Blain D., Row C., Alm J., Byrne K., Parish F., Duchemin É., Huttunen J. T., Tremblay A., Delmas R., Silveira Menezes C. F., Delmas R., Minayeva T., Pinguelli Rosa L. P., Sirin A., Chapter 7. Wetlands, In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, V. 4: Agriculture, forestry and other land use, IPCC, 2006. 24 p.
11. Chuvieco E., Martín 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, pp. 5103–5110, DOI: 10.1080/01431160210153129.
12. Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G. R. et al., Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, *Remote Sensing of Environment*, 2019, No. 225, pp. 45–64, DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
13. De Luca G., Silva J. M. N., Modica G., A workflow based on Sentinel-1 SAR data and open-source algorithms for unsupervised burned area detection in Mediterranean ecosystems, *GIScience and Remote Sensing*, 2021, V. 58, No. 4, pp. 516–541, DOI: 10.1080/15481603.2021.1907896.
14. French N. H. F., Kasischke E. S., Hall R. J. et al., Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results, *Intern. J. Wildland Fire*, 2008, V. 17, pp. 443–462, DOI: 10.1071/WF08007.
15. Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G., Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes, *Intern. J. Wildland Fire*, 2018, V. 27, No. 5, pp. 293–312, DOI: 10.1071/WF17084.
16. *IPCC, 2014: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC Methodology Report*, Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T. G. (eds.), IPCC, Switzerland, 2014, 354 p.
17. *IPCC, 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (eds.), IPCC, Switzerland, 2019, 1249 p.
18. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al., The role of peatlands in climate regulation, In: *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Ecological Reviews*, Cambridge: Cambridge University Press, 2016, pp. 63–76, DOI: 10.1017/CBO9781139177788.005.
19. Key C. H., Benson N. C., *The normalized burn ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity*, Bozeman, MT, USA: Northern Rocky Mountain Science Center, United States Geological Survey, 1999.
20. Marlier M. E., Liu T., Yu K. et al., Fires, smoke exposure, and public health: An integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration, *GeoHealth*, 2019, V. 3, Iss. 7, pp. 178–189, DOI: 10.1029/2019GH000191.
21. Moreira de Araújo F., Ferreira L. G., Satellite-based automated burned area detection: a performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna. *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, V. 36, pp. 94–102, DOI: 10.1016/J.JAG.2014.10.009.
22. Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S., Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100, *Nature Climate Change*, 2019, V. 9, Iss. 12, pp. 945–947, DOI: 10.1038/s41558-019-0615-5.
23. Loisel J., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J. et al., Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink, *Nature climate change*, 2021, V. 11, Iss. 1, pp. 70–77, DOI: 10.1038/s41558-020-00944-0.
24. Rein G., Huang X., Smouldering wildfires in peatlands, forests and the Arctic: Challenges and perspectives, *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2021, V. 24, Article 100296, DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100296.
25. Sirin A., Medvedeva M., Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: Identification among other wildfires, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Article 194, DOI: 10.3390/rs14010194.
26. Stroppiana D., Azar R., Calò F. et al., Integration of optical and SAR data for burned area mapping in Mediterranean regions, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, pp. 1320–1345, DOI: 10.3390/rs70201320.
27. Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al., The peatland map of Europe, *Mires Peat*, 2017, V. 19, Article 22, DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.264.
28. Veraverbeke S., Verstraeten W. W., Lhermitte S., Goossens R., Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, V. 12, pp. 60–70, DOI: 10.1016/J.JAG.2009.10.004.