



УДК 911.52+574.474(571.54)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.33>

Анализ особенностей 15-летнего периода лесовосстановления на гарях в сосновых лесах Юго-Западного Прибайкалья (пролонгирование синтезированного анализа натурных и дистанционных данных)

Ж. В. Атутова, Е. А. Распутина*

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Представлены итоги многолетних натурных наблюдений за лесовосстановлением на гарях урочища Бадары, ежегодные результаты которых рассматриваются в синтезе с показателями спектрального индекса NBR. Цель исследования заключалась в оценке возможностей применения геоданных для дистанционного выявления гарей и последующего изучения процессов послепожарного лесовосстановления. Основой послужили ранее полученные авторами результаты синтезированного анализа натурных и дистанционных данных, которые были дополнены геоботаническими материалами 2023–2025 гг., а также показателями NBR за аналогичный период. Анализировались данные начиная с 2009 (допожарный год) по 2025 г. В ходе ранее проведенных исследований после возгорания было зафиксировано резкое снижение значений индекса, что свидетельствует об их информативности в оперативном выявлении пострадавших от пожаров территорий. В послепожарный период продолжена выявленная ранее восходящая динамика показателей NBR в каждой сезонной группе, что соотносится с увеличивающимися в процессе лесовосстановления геоботаническими характеристиками. В незатронутых пожарами лесах значения NBR оставались стабильными на протяжении всего периода наблюдений. На гарях вновь отмечена тенденция индекса завышать свои показатели. Финальные данные NBR в периоды середины и окончания вегетации превысили допожарные значения; в начальный период – вплотную к ним приблизились. В то же время натурная ситуация более соответствовала начальному этапу лесовосстановления. Это вновь доказывает, что моноанализ показателей NBR в исследовании послепожарного восстановления не гарантирует получение объективной оценки ландшафтно-экологической ситуации. Подтверждены выводы о целесообразности использования данных NBR пика вегетации для выявления недавно образованных гарей и для оценки начальных этапов процесса демутиации. Дальнейший ход восстановительной динамики рекомендуется анализировать с учетом показателей начала периода вегетации, лишенных «завышающего» влияния живого напочвенного покрова на увеличение показателей индекса.

Ключевые слова: гарь, лесовосстановление, геоботанические наблюдения, мониторинг, дистанционные данные, спектральный индекс NBR.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН (FWEM-2026-0001; FWEM-2026-0004).

Для цитирования: Атутова Ж. В., Распутина Е. А. Анализ особенностей 15-летнего периода лесовосстановления на горячих в основных лесах Юго-Западного Прибайкалья (продолгование синтезированного анализа натурных и дистанционных данных) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 56. С. 33–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.33>

Original article

Analysis of the Features of the 15-Year Reforestation Period on Burnt-out Areas in the Pine Forests of the South-Western Baikal Region (Prolongation of the Synthesized Analysis of Field and Remote Data)

Zh. V. Atutova, E. A. Rasputina*

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The results of long-term field observations of forest restoration burnt-out areas of the Badary urochishche are presented. Annual geobotanical results are considered in synthesis with NBR spectral index indicators. We considered the possibility of using geodata for remote detection of burnt-out areas and subsequent study of post-fire forest reforestation processes. The authors' previously obtained results from a synthesized analysis of in situ observations and remote sensing data served as the basis for this study. These were supplemented by geobotanical data from 2023–2025 and NBR indicators for the same period. This study analyzed data from 2009 (the pre-fire year) to 2025. Previous studies showed a sharp decrease in index values after a wildfire, indicating their informative value in quickly identifying areas affected by wildfires. In the post-fire period, the previously identified upward dynamics of NBR indicators in each seasonal group continued, which correlates with the increasing geobotanical characteristics during the forest restoration process. In forests unaffected by wildfires, NBR values remained stable throughout the observation period. In burnt-out areas, the index again showed a tendency to overestimate its values. Final NBR values for the mid- and late-growing seasons exceeded pre-fire values; in the early growing season, they closely approached them. At the same time, the in-situ situation was more consistent with the initial stage of forest restoration. This proves once again that a single analysis of NBR indicators in post-fire restoration studies does not guarantee an objective assessment of the landscape-ecological situation. Previously obtained conclusions about the feasibility of using peak vegetation NBR data to identify newly formed burnt-out areas and to assess the initial stages of the demutation process were confirmed. It is recommended to analyze the further course of the reforestation dynamics taking into account the indicators of the early growing season, devoid of the “inflating” influence of the living ground cover on the increase in the index indicators.

Keywords: burnt-out area, reforestation, geobotanical observations, monitoring, remote data, NBR spectral index.

For citation: Atutova Zh.V., Rasputina E.A. Analysis of the Features of the 15-Year Reforestation Period on Burnt-out Areas in the Pine Forests of the South-Western Baikal Region (Prolongation of the Synthesized Analysis of Field and Remote Data). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 56, pp. 33–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.33> (in Russian)

Введение

Хвойные леса Евразии отличаются частой повторяемостью пожаров в их пределах, и порой интервал между возгораниями значительно короче времени, необходимого для полного лесовосстановления. Учитывая современные темпы потепления климата, установлено, что периодичность возгораний чаще одного раза в 15 лет способна привести к безвозвратной потере лесов на площади 3 млн км²; в результате к концу столетия риску обезлесения будут подвержены 20 % всех евразийских бореальных лесов [Climate ... , 2022]. На

долю России приходится около 2/3 пространства, занятого мировыми бореальными лесами, большая часть которых находится в Сибири [Analysing ... , 2009], где пожары уже сейчас ежегодно охватывают площади, исчисляющиеся несколькими миллионами гектаров [Трансформация ... , 2017]. В результате значительный процент территорий, ранее занятых лесами, приходится на фитоценозы, находящиеся в той или иной фазе послепожарной сукцессии. Однако наряду с разрушающим воздействием пирогенный фактор способствует улучшению условий для естественного возобновления. Оказывая большое влияние на формирование лесных насаждений, огонь определяет их продуктивность и жизненное состояние [Лесовозобновление ... , 2019]. Поэтому, принимая во внимание как поражающие, так и стимулирующие факторы влияния пожаров, особо актуальным направлением экологических исследований становится изучение постпирогенной динамики фитоценозов с целью сохранения и поддержания в экологическом равновесии средообразующих и средозащитных ландшафтных функций. В этом аспекте наиболее перспективными являются исследования по выявлению гарей и последующему долгосрочному изучению процессов демутиации, что подтверждается результатами ряда мониторинговых наблюдений за особенностями послепожарного лесовосстановления в бореальных лесах России [Лесовозобновление ... , 2019; Ашик, Чубарова, Ярмишко, 2015; Бугаева, Оскорбин, 2008; Малиновских, 2020; Ponomarev, Zabrodin, Ponomareva, 2022].

Авторами статьи с 2014 г. проводятся мониторинговые натурные наблюдения на тестовых участках гарей урочища Бадары (Юго-Западное Прибайкалье), результаты которых свидетельствуют об успешности восстановления сосновых лесов региона [Атутова, 2022; Atutova, 2023]. Возможность привлечения полученных на данном этапе результатов геоботанического исследования для территорий-аналогов заставила прибегнуть к дополнительным инструментам анализа пирогенной трансформации. Выбор был сделан в пользу использования дистанционных данных, характеризующих запас фитомассы, применение которых при исследовании изменений ландшафтных условий на гарях широко освещено [Пушкин, Сидельник, Ковалевский, 2015; Родионова, Вахнина, Желибо, 2020; Токарева, Алшаиби, Пасько, 2021; Information ... , 2022; Chu, Guo, Takeda, 2016; Monitoring ... , 2019; Long-term ... , 2022]. Предпринятые авторами попытки синтеза полевых материалов и дистанционных данных для последующей возможности моноиспользования последних в дистанционной оценке постпирогенного лесовосстановления показали их недостаточную достоверность [Атутова, 2023]. Тем не менее в ходе проведенного эксперимента был выявлен более чувствительный к пирогенному воздействию нормализованный индекс гарей (NBR), который отличается значительным диапазоном показателей, характеризующих послепожарную нарушенность, а также длительным временным интервалом от момента возгорания до достижения допожарных значений [Швецов, Пономарев, 2020]. Эффективность применения данного индекса в анализе динамики лесовосстановления подтверждена многими исследованиями [Дистанционный ... , 2012; Сидельник, Пушкин, Ковалевский, 2018; Long-term ... , 2022], в том числе на гарях

Сибирского региона [Родионова, Вахнина, Желибо, 2020; Токарева, Алшаиби, Пасько, 2021; Швецов, Пономарев, 2020; Соромотин, Бродт, Приходько, 2022; Рожков, Кондаков, 2017; Якимов, Забродин, Пономарев, 2022]. В данной статье обсуждаются результаты ранее начатых наблюдений за лесовосстановлением на двух ключевых участках гарей урочища Бадары, дополненные геоботаническими материалами 2023–2025 гг. Пятнадцатилетний постпирогенный период рассматривается в аспекте интегрированного использования данных космической съемки и материалов натурного наблюдения. Акцентированное внимание уделено факторам, игнорирование которых повысит риск получения недостоверных результатов оценки дистанционных данных.

Материалы и методы

Территория исследования. Мониторинговые геоботанические наблюдения за послепожарным восстановлением сосновых лесов урочища Бадары (центральная часть Тункинской котловины, Юго-Западное Прибайкалье) (рис. 1) проводятся в пределах двух ключевых участков, находящихся в 440 м друг от друга, но в разной степени трансформированных пожаром 2010 г. Площадка А – гарь сильной степени огневого поражения, с оставшейся на корню некоторой частью древостоя; находится в 70 м от кромки леса. Площадка Б – гарь очень сильной степени огневого поражения (без оставшегося на корню древостоя), находящаяся в 250 м от кромки леса. Основной фронт пожара прошел по территории этого участка, что повлияло на низкие темпы естественного лесовозобновления, для повышения которых сотрудниками национального парка «Тункинский» в мае 2016 г. в пределах площадки была осуществлена посадка семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Для определения направленности процессов лесовосстановления на исследуемых территориях проведено их сравнение с участком, незатронутым возгораниями, – фоновой площадкой, расположенной в восточной оконечности урочища Бадары, в 3,3 км от гари А, от гари Б – в 3,0 км. Растительность представлена средневозрастными сосновыми с единичными экземплярами лиственницы (*Larix sibirica*) и березы (*Betula pendula*) с подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum*) зеленомошно-травяно-кустарничковыми лесами. Это производные леса, восстанавливаемые после прошедших здесь более полувека назад лесных пожаров. В отсутствии в пределах урочища Бадары сохранившихся естественных сосновых лесов данный участок, удаленный от недавно пройденных огневых фронтов, был выбран в качестве репрезентативного.

Натурные данные. Геоботанические наблюдения на площадке А и в пределах фоновой территории начаты в 2014 г., на площадке Б – в 2016 г. после проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению. На пробных площадках размером 20×20 м рассматривались особенности подроста (состав насаждений, обилие, средняя высота). Породный состав фиксировался в виде формулы из 10 единиц. Также анализировалась геоботаническая характеристика кустарничкового яруса и травяно-кустарничкового покрова (состав, обилие, средняя высота и проективное покрытие). Проективное покрытие

определялось визуально с использованием десятикратного шага для травяного яруса, пятикратного – для кустарникового [Atutova, 2023]. В итоге был получен ряд совокупностей зарастания, характеризующий особенности постпирогенного лесовосстановления в определенных ландшафтно-экологических условиях.

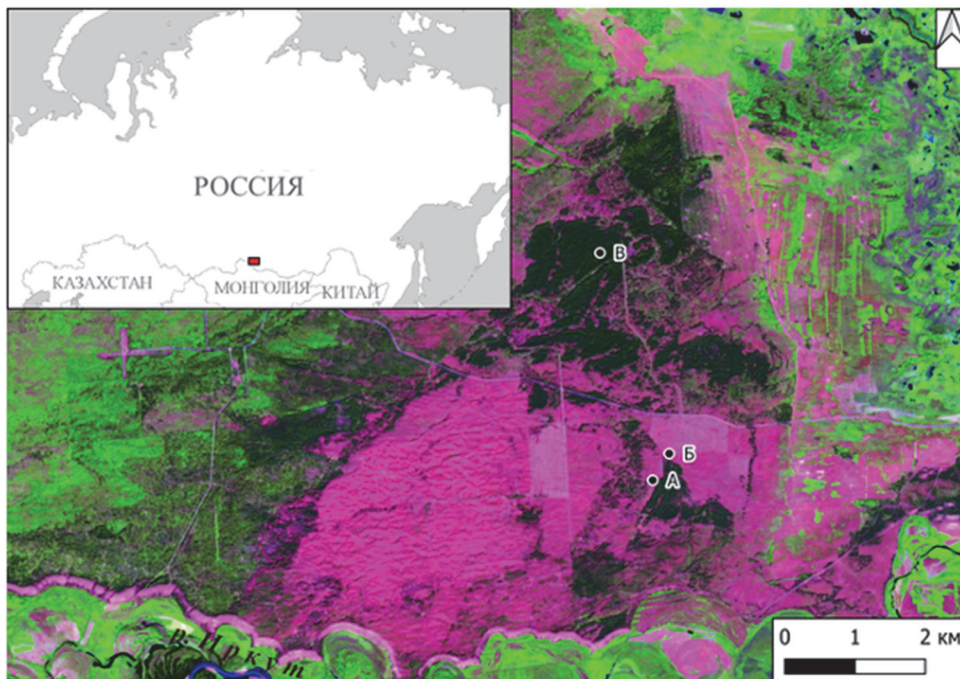


Рис. 1. Территория исследования на карте мелкого масштаба (карта-врезка) и на снимке Landsat 8 (август 2017 г., сочетание каналов 7-5-4). А, Б, В – площадки натурных наблюдений

Сбор и обработка дистанционных материалов. Основным источником дистанционных данных, используемых в работе, послужили космические снимки Landsat 7 и Landsat 8 с разрешением 30 м, которые соответствовали пространственному масштабу и временному диапазону полевых наблюдений. Для выявления гарей и анализа послепожарной динамики был проведен расчет спектрального индекса NBR, который равен отношению разности яркостей в ближнем и среднем инфракрасном каналах (4-й и 7-й каналы снимка Landsat 7; 5-й и 7-й каналы снимков Landsat 8 соответственно) к их сумме [Родионова, Вахнина, Желибо, 2020; Токарева, Алшаиби, Пасько, 2021; Сидельник, Пушкин, Ковалевский, 2018; Long-term ... , 2022; Харитонов, Харитонов, 2021]. Ближний инфракрасный канал характеризует изменения содержания хлорофилла в усыхающей растительности; средний инфракрасный канал определяет содержание влаги [Родионова, Вахнина, Желибо, 2020]. Расчет производился с использованием платформы Google Earth Engine. Для этого

был разработан код на языке JavaScript, содержащий информацию об используемой коллекции данных (USGS Landsat 7 (Landsat 8) Level 2, Collection 2, Tier 1-atmospherically corrected surface reflectance), маске облачности, координате точки исследования, периоде исследования, формуле расчета индекса и позволяющий извлечь все значения индекса NBR для данной точки за исследуемый период. Для расчета применялись яркостные значения пикселей, в которые включают центральные точки участков исследования. Размер пикселя Landsat 7 и Landsat 8 на местности составляет примерно 30×30 м, что соответствует размеру пробных участков – 20×20 м. В результате расчета нормализованного индекса пиксели принимают значения от -1 до 1 . Показатели, близкие к 1 , характеризуют территорию, незатронутую пожарами, близкие к 0 , свидетельствуют о нарушении возгораниями [Дистанционный ... , 2012; Long-term ... , 2022]. Для каждой точки наблюдений было получено около 230 значений NBR за период с 2009 (допожарный показатель) по 2025 г., т. е. около 14 значений в год. Учитывая, что повторяемость съемки спутником Landsat одного и того же участка равна 16 дням (22 снимка в год), примерно 40 % значений были отбракованы ввиду облачности, а также пробелов в данных, появившихся в результате неисправности корректора сканирующих линий спутника Landsat 7.

Учитывая зависимость геоботанических характеристик от сезонов вегетации, для каждого года осуществлялась выборка показателей NBR, полученных в интервале 15.04–15.06; 16.06–15.08 и 16.08–15.10 с 2009 по 2025 г. Также были отобраны значения, соответствующие датам натурных наблюдений на ключевых участках с 2014 по 2025 г. Далее для каждого года (с 2009 по 2025 г.) и для каждого участка определялся средний показатель NBR в каждую фазу вегетации (сумма всех значений множества, деленная на их количество). Для расчета средних показателей NBR за разные периоды вегетации использовалось 2–5 значений. Также для каждого сезона было определено среднее фоновое значение (средний арифметический показатель всех средних значений индекса для фоновой территории за период 2009–2025 гг.) (табл.). Сравнительный анализ показателей NBR на горях с фоновыми значениями индекса позволяет определить степень пирогенной трансформации после возгорания и проанализировать динамику геоданных в процессе лесовосстановления.

Для определения масштабов нанесенного огнем ущерба используется разностный нормализованный индекс гари dNBR, который представляет разницу значений NBR до пожара и после его прохождения [Дистанционный ... , 2012; Long-term ... , 2022]. С его помощью в данном исследовании осуществлялся разновременный геоинформационный анализ особенностей демутиации. Для ранжирования показателей dNBR в зависимости от степени огневого поражения использован метод обобщения натурных данных с учетом классификации гарей Р. В. Чугуновой [1960]: на момент начала исследований натурная ситуация площадки А соответствовала сухостойно-валежным гарям с полностью погибшим древостоем; на площадке Б наблюдалась гарь с уничтоженным древостоем, представленная безлесным открытым пространством с обгоревшими остатками деревьев.

Таблица

Фрагмент набора данных NBR для анализа динамики лесовосстановления на гарях
в сосновых лесах урочища Бадары, Юго-Западное Прибайкалье

Годы	Средний показатель NBR в определенный период вегетации											
	Начало вегетационного периода (15.04–15.06)				Середина вегетационного периода (16.06–15.08)				Окончание вегетационного периода (16.08–15.10)			
	Ключевые участки			Ср. фоновое значение	Ключевые участки			Ср. фоно- вое значе- ние	Ключевые участки			Ср. фоновое значение
	А	Б	Фон		А	Б	Фон		А	Б	Фон	
2009	0,393	0,467	0,530	0,544	0,524	0,571	0,593	0,615	0,510	0,629	0,644	0,646
2010	0,326	0,464	0,508	–	0,103	–0,050	0,574	–	0,05	–0,050	0,731	–
2011	–0,028	–0,182	0,588	–	0,043	0,063	0,550	–	0,03	–0,076	0,483	–
2012	–0,01	–0,043	0,398	–	0,100	–0,040	0,565	–	–0,199	0,024	0,655	–
2013	0,05	–0,196	0,513	–	0,160	–0,028	0,585	–	–0,05	–0,104	0,541	–
2014	–0,02	–0,096	0,55	–	0,143	0,033	0,640	–	–0,09	–0,121	0,635	–
2015	–0,07	–0,082	0,509	–	0,090	–0,012	0,586	–	–0,04	–0,140	0,662	–
2016	–0,075	–0,151	0,475	–	0,191	0,007	0,602	–	–0,01	0,064	0,644	–
2017	–0,082	–0,050	0,593	–	0,118	–0,023	0,595	–	–0,023	–0,108	0,712	–
2018	–0,015	–0,053	0,609	–	0,222	0,066	0,635	–	–0,033	–0,053	0,647	–
2019	0,056	0,074	0,643	–	0,292	0,125	0,670	–	0,179	0,084	0,786	–
2020	0,049	–0,064	0,588	–	0,301	0,192	0,598	–	0,311	0,116	0,564	–
2021	0,113	–0,079	0,600	–	0,454	0,318	0,677	–	0,415	0,142	0,707	–
2022	0,266	0,071	0,632	–	0,405	0,331	0,627	–	0,435	0,184	0,656	–
2023	0,284	0,019	0,414	–	0,503	0,262	0,629	–	0,466	0,213	0,531	–
2024	0,362	0,086	0,588	–	0,546	0,331	0,642	–	0,578	0,324	0,676	–
2025	0,386	0,15	0,613	–	0,588	0,401	0,698	–	0,547	0,307	0,711	–

Изменение степени огневого поражения в процессе зарастания гарей прослеживается с помощью показателей индекса dNBRs, который равен разности значений NBR до пожара и каждого последующего послепожарного года [Assessment ... , 2020]. В ходе ранее проведенных исследований было доказано, что значения dNBRs менее 0,4 свидетельствуют об умеренной степени возгораний; в интервале от 0,4 до 0,5 – об умеренно высокой степени; выше 0,5 – о высокой степени огневого поражения [Atutova, Rasputina, 2025]. При анализе динамики зарастания гарей применяется показатель dNBRr, равный разности значений NBR после пожара и каждого последующего послепожарного года [Assessment ... , 2020]. Анализ особенностей послепожарного лесовосстановления осуществлялся на основе соответствия показателей dNBRr геоботанической специфике каждой из стадий зарастания гарей: черная гарь, травяная стадия, травяно-кустарничковая стадия, хвойные молодняки [Чугунова, 1960]. Положительные значения dNBRs и dNBRr характерны для гарей со слабо-развитым растительным покровом, отрицательные – указывают на увеличение растительности в процессе демутиации.

Применив предлагаемые формулы расчета индексов dNBRs и dNBRr, получена структурированная по сезонам вегетации база показателей NBR, которые легли в основу их синтезированного анализа с натурными данными, полученными в ходе мониторинговых геоботанических исследований на гарях урочища Бадары.

Результаты

В ходе ранее проведенных исследований выявлен приоритет использования дистанционных данных начала вегетационного периода в исследованиях послепожарного лесовосстановления [Atutova, Rasputina, 2025]. Однако дополненная данными 2023–2025 гг. база геоботанических материалов, которые свидетельствовали об интенсивном росте средневысотных показателей восстанавливаемого соснового подроста, что привело к снижению темпов роста проективного покрытия травостоя (главного фактора, завышающего показатели спектральных индексов), дала повод усомниться в ранее выдвинутой гипотезе. В итоге был вновь проведен анализ показателей NBR во все ранее рассмотренные фазы вегетации на двух участках гарей с учетом среднефоновых значений индекса в каждый из вегетационных периодов (рис. 2).

В ходе анализа показателей индекса NBR с 2009 по 2025 г. выявлена временная изменчивость его значений на гарях разной степени огневого поражения. Показатели NBR после пожара 2010 г. резко снизили свои значения на обеих рассматриваемых площадках. При этом отмечается закономерная разница показателей для площадок, в разной степени пострадавших от пожара, которая сохраняется в течение всего рассматриваемого периода (см. табл.) и соотносится с динамикой роста геоботанических параметров (см. рис. 2).

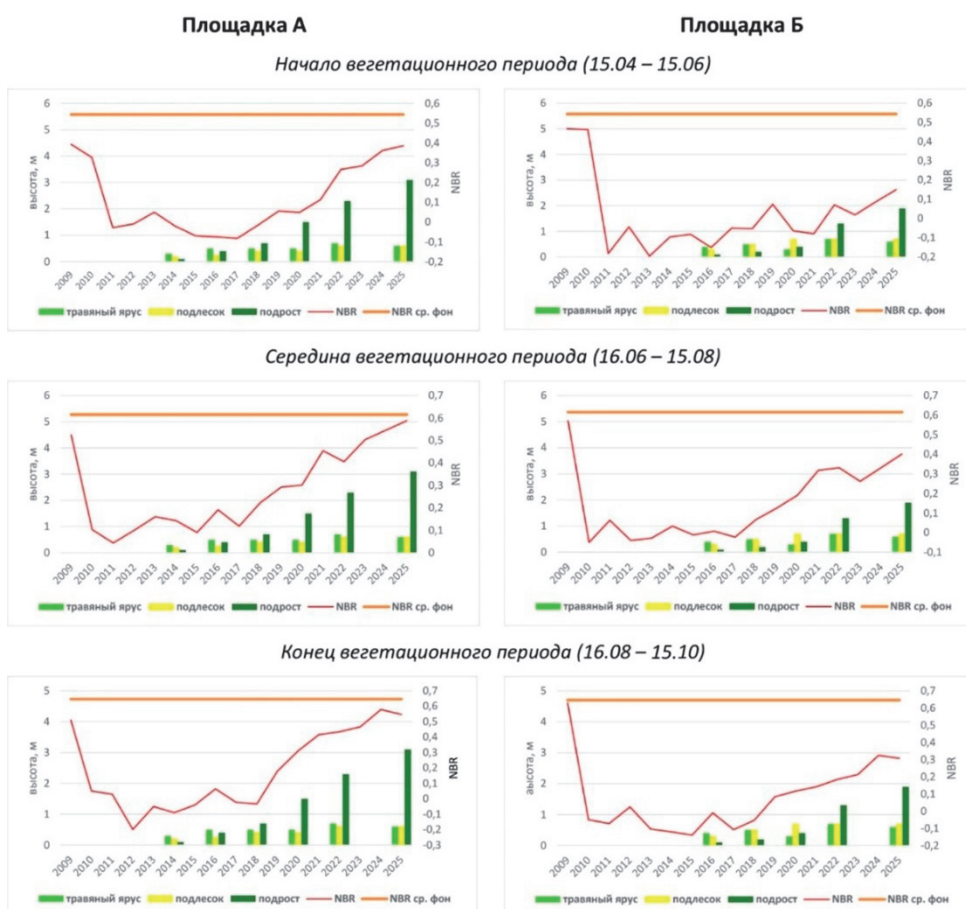


Рис. 2. Динамика показателей NBR в процессе лесовосстановления на ключевых площадках гарей урочища Бадары в 2009–2025 гг. в зависимости от фаз вегетации

Как и в ходе ранее проведенных наблюдений [Atutova, Rasputina, 2025], показатели индекса начала вегетационного периода в лучшей степени соотносились с натурными данными, в то время как значения NBR окончания и особенно середины периодов вегетации на этапе анализа показателей 2023–2025 гг. в наибольшей степени приблизились к среднефоновым отметкам индекса (см. рис. 2). Однако природная ситуация свидетельствовала о продолжающемся начальном этапе лесовосстановления. Средневысотные показатели восстанавливаемых сосновых всходов спустя 15-летний послепожарный период составили 3,1 м на менее пострадавшей от огня площадке А, на сильно пострадавшей площадке Б – 1,5 м. Проективное покрытие подроста отмечено на уровне 80 и 60 % соответственно. Этим подтверждено наше предположение, что на завышение показателей спектральных индексов оказывает влияние травяной покров, проективное покрытие которого достигает максимальных значений в июле – августе, и подчеркивает зависимость показателей индекса NBR от фотосинтетической активности растительного покрова.

На фоновом участке в период 2009–2025 гг. наблюдался плавный, без резких колебаний, ход значений NBR (см. табл.). Особенно это заметно в пик вегетации, что соотносится с натурными данными, указывающими на стабильность ландшафтных условий в отсутствие возгораний. В ходе натурных наблюдений отмечена высокая сомкнутость крон древостоя, по причине чего в подлеске отсутствует светолюбивый сосновый подрост. Живой напочвенный покров скуден из-за сдерживающего влияния хвойного опада. Проективное покрытие травяного покрова составляет 30 % в начале вегетационного периода (рис. 3, *а*) и 70 % – в середине (см. рис. 3, *б–д*). В целом среднефоновое значение NBR в начале вегетации составило 0,544, в середине – 0,615, в конце – 0,646 (см. табл.). Это вновь свидетельствует, что многолетнюю стабильность высоких фоновых значений NBR середины периода вегетации можно считать маркером выявления ненарушенных пожарами территорий, находящихся в устойчивом ландшафтном состоянии [Atutova, Rasputina, 2025].

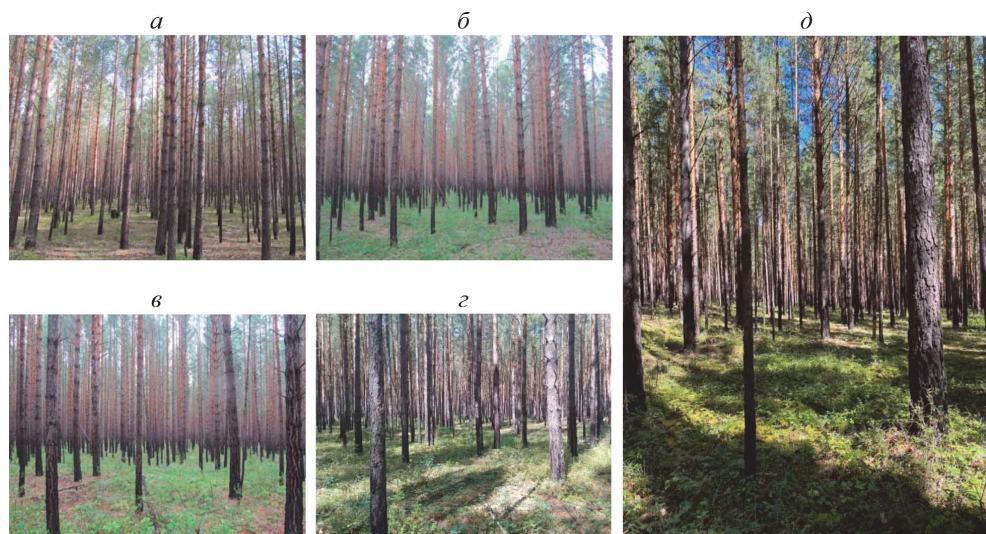


Рис. 3. Влияние проективного покрытия живого напочвенного покрова на показатели NBR фоновом участке в зависимости от фаз вегетации: *а* – начало вегетационного периода, проективное покрытие травяного покрова не превышает 30 % (05.06.2014, NBR = 0,550); середина вегетационного периода, проективное покрытие травостоя оценивается на уровне 70–80 %: *б* (25.07.2016, NBR = 0,650), *в* (08.08.2020, NBR = 0,638), *г* (03.08.2022, NBR = 0,685), *д* (12.08.2025, NBR = 0,713)

Дальнейшее рассмотрение динамики показателей индексов проведено с привлечением дистанционных данных начала вегетационного периода, в ходе анализа которых отмечена более выраженная дифференциация показателей NBR на горях, в разной степени трансформированных пожаром 2010 г. (рис. 4).

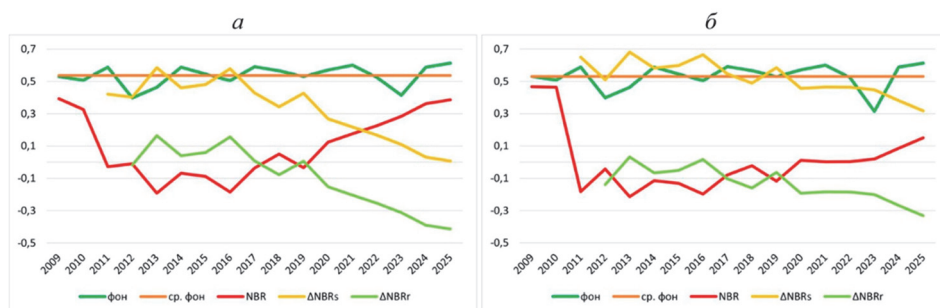


Рис. 4. Динамика показателей NBR и dNBR начала вегетационного периода в 2009–2025 гг. на ключевых участках урочища Бадары: *а* – гарь сильной степени огневого поражения (площадка А), *б* – гарь очень сильной степени огневого поражения (площадка Б)

До пожара, в 2009 г., средние значения NBR на площадках А и Б были высокими – 0,393 и 0,467 соответственно; после возгорания показатели снизились до –0,028 и –0,182, отличаясь закономерной разницей для площадок, в разной степени пострадавших от пожара. Данную ситуацию подтверждает расчет индекса dNBRs, отражающего степень пирогенной трансформации. На площадке А он составил 0,421, на площадке Б – 0,649, что в обоих случаях свидетельствует о сильной степени огневого поражения. Дифференциация показателей NBR продолжает прослеживаться в первые послепожарные годы. В 2016 г. на площадке Б живой напочвенный покров был трансформирован тяжелой техникой для нарезки лесопосадочных борозд (рис. 5). Показатели NBR здесь были ниже значений площадки А, на которой на корню осталась часть древесных и травный покров имел лучшие условия развития.

В первый послепожарный год и до 2018 г. включительно на площадке А значения NBR начала вегетационного периода были в диапазоне от –0,082 до 0,05, площадке Б – от –0,196 до –0,043 (см. табл.). Несмотря на увеличение показателей NBR в ходе возобновления, натурная обстановка на обеих площадках свидетельствовала о сильной пирогенной трансформации (см. рис. 5), что подтверждается весенними показателями dNBRs, которые на площадке А за период 2010–2018 гг. были в пределах 0,475–0,343, на площадке Б – 0,663–0,510. Быстрые темпы возобновления растительности на площадке А отразились на показателях dNBRr, характеризующих степень зарастания гари в процессе лесовосстановления. В период 2012–2018 гг. данные dNBRr снизились от 0,054 до –0,008; на площадке Б – от 0,014 до –0,139 (см. рис. 4), что соответствует ландшафтно-экологической ситуации того периода (см. рис. 5). По мере увеличения метрических параметров возобновляемых видов растительного покрова замечен рост показателей NBR, которые на площадке А с 2019 г. приобрели устойчивые положительные значения, увеличившиеся к 2025 г. до 0,386 (см. рис. 4, *а*). В ходе натурных наблюдений здесь отмечен интенсивный прирост по высоте соснового подроста (40–50 см в год), средние высоты которого увеличились от 0,1 м в 2014 г. до 3,1 м в 2025 г.; проективное покрытие подроста достигло 90 % (см. рис. 5); проективное покрытие и высота травостоя возросли до 80 % и 70 см соответственно.



Рис. 5. Разновременная специфика лесовосстановления на гарях сильной (площадка А) и очень сильной (площадка Б) степени пирогенной трансформации

Постпирогенная обстановка на площадке А (по классификации Чугуновой [1960]) свидетельствовала о начальном этапе стадии зарастания гарей молодняками с хорошо развитым травяным покровом. Успешность лесовосстановления подтверждается снижением в этот период показателей $dNBR_r$, отражающих темпы зарастания, от $-0,077$ до $-0,414$. Значения $dNBR_s$, характеризующие степень пирогенной трансформации, за 2019–2025 гг. снизились от $0,337$ до $0,007$ (см. рис. 4, а). Однако, учитывая натурную характеристику завершающего этапа наблюдений (см. рис. 5), показатели индекса NBR , увеличившиеся в этот период до допожарных значений, нельзя интерпретировать как достижение фоновых геоботанических параметров.

На сильно трансформированной пожаром площадке Б значения NBR до 2021 г. включительно оставались отрицательными, лишь с 2022 г. приобретая устойчивые положительные показатели, повысившиеся в 2025 г. до $0,150$ (см. рис. 4, б). В ходе натурных наблюдений здесь отмечено увеличение высоты естественных сосновых всходов от $0,3$ м в 2016 г. до $2,4$ м в 2025 г., проективного покрытия подроста – от 15 до 50 % соответственно (см. рис. 5). Темпы роста искусственно посаженных сосновых саженцев до 2020 г. оставались низкими; их средневысотные показатели составили $0,5$ м, проективное покрытие оставалось на стабильно низком уровне 5 %. Начиная с 2022 г. средневысотные показатели сеянцев увеличились от $0,8$ до $1,5$ м в 2025 г.; проективное покрытие достигло 30 %. Как и на площадке А, проективное покрытие травостоя к концу наблюдений составило 80 %, его высота – 70 см. Геоботаническими наблюдениями определена травяно-кустарниковая стадия зарастания гарей с успешно восстанавливаемым древесным подростом [Чугунова, 1960]. В этот период более чем в три раза произошло снижение показателей $dNBR_r$, определяющих темпы лесовосстановления: от $-0,103$ до $-0,332$ соответственно. Значения $dNBR_s$, указывающие на степень пирогенной трансформации, снизились почти вдвое – с $0,546$ в 2021 г. до $0,317$ – в 2025 г., преодолев критический рубеж значения $dNBR$, равного $0,400$, что свидетельствует об умеренной ее степени [Atutova, Rasputina, 2025].

Обсуждение

Пролонгирование мониторинговых наблюдений за послепожарным лесовосстановлением с привлечением натурных и геоинформационных данных доказали ранее обозначенные выводы [Atutova, Rasputina, 2025]. Результаты исследования, представленные в данной работе, подтверждают эффективность применения индексов NBR и $dNBR$ в выявлении гарей и в определении степени пирогенной трансформации. В ходе расчета индекса отмечено резкое снижение значений NBR после возгораний; наблюдается дифференциация показателей NBR и $dNBR$ для участков с различной степенью огневого поражения, которая доказывается результатами натурных наблюдений. Это указывает на возможность применения индексов для установления (ранжирования) наиболее и менее пострадавших от возгорания территорий. В отсутствии данных полевых наблюдений использование NBR наилучшим способом применимо для немедленного определения пострадавших от пожара территорий.

Сравнивая дистанционные данные с результатами геоботанических наблюдений, подтверждено, что индексы NBR и dNBR достаточно точны в выявлении особенностей динамики послепожарного лесовосстановления [Родионова, Вахнина, Желибо, 2020; Avestisyan, Velizarova, Filchev, 2022]. При расчете NBR учитывается снижение после пожаров спектральной яркости пикселей в ближней инфракрасной области спектра [Токарева, Алшаиби, Пасько, 2021], с которой связана высокая фотосинтетическая активность, характерная для густой растительности, что позволяет предположить, что наиболее точной информацией об экологическом состоянии гарей будут свидетельствовать данные середины вегетационного периода. Это подтверждается наименьшей разницей между максимальным и минимальным показателями NBR фоновой территории в пик вегетации в 2009–2025 гг., что указывает на стабильность экологических условий в этот период года. Результаты наших исследований, нацеленные на анализ послепожарного восстановления сосновых лесов, позволяют рекомендовать использовать данные NBR и dNBR середины периода вегетации для выявления территорий, затронутых недавно пройденными пожарами и находящихся на стадии черной гари. Дальнейший ход динамики лесовосстановления целесообразно проводить с использованием показателей начала периода вегетации, лишенных «завышающего» влияния восстанавливающегося травяного покрова.

В ходе синтезированного анализа дистанционных данных и материалов мониторингового геоботанического наблюдения на гарях урочища Бадары выявлены природные факторы, определяющие особенности лесовосстановления и отражающиеся на значениях спектрального индекса NBR. В первую очередь отмечено, что на изменение показателей индекса оказывают влияние происходящие на гарях деградационные процессы. Гибель и последующий вывал деревьев, наблюдавшийся в первые послепожарные годы, сказался на колебании значений NBR, которые закономерно повысились после завершения этого процесса. Рост геоботанических параметров древесного подроста является основным фактором восходящей динамики показателей NBR и нисходящей dNBR. Однако в ходе наблюдений выявлено, что основным фактором изменения значений индексов на начальных стадиях демутации является увеличение проективного покрытия травяного яруса. Это подтвердилось значениями индекса NBR середины вегетационного периода (см. рис. 2), которые на 11-й год после возгорания приблизились к допожарным уровням, а в 2024–2025 гг. превысили их, что не соответствовало реальной природной обстановке (см. рис. 5). Таким образом, результаты продолженных исследований подтверждают, что долговременный, с минимальной амплитудой ряд высоких значений NBR середины вегетационного периода является маркером нахождения территорий, ландшафтное состояние которых близко к естественному. Обнаружение гарей и оценку процесса лесовосстановления в первые послепожарные годы целесообразно проводить также на основе индексов, рассчитанных для середины периода вегетации. По мере зарастания гарей в ходе лесовосстановления анализ демутации уместно осуществлять с учетом данных NBR начала сезона вегетации, когда влияние живого напочвенного покрова

на показатели спектральных индексов не столь велико, как в ее пик. В нашем случае этот период наступил на восьмой послепожарный год, когда увеличившиеся обилие и проективное покрытие травостоя существенно повлияли на их завышение значений.

В ходе проведенного исследования отмечено, что комбинация индексов NBR и dNBR способствует получению более обширной информации, поскольку первый из них дает общие представления о послепожарной ситуации, а второй, учитывающий фотосинтетическую активность до пожара, характеризует степень пирогенной трансформации и определяет особенности возобновления растительного покрова. Тем не менее применение индексов NBR и dNBR в качестве основного инструмента исследования процессов демутиации не гарантирует объективной оценки особенностей и перспектив послепожарного восстановления [Соромотин, Бродт, Приходько, 2022; Atutova, Rasputina, 2025; Avestisyan, Velizarova, Filchev, 2022]. После возгорания показатели NBR демонстрируют прогрессирующий рост своих значений, которые с 13-го послепожарного года достигли, а затем превысили показатели допожарного 2009 г., что с учетом натурных наблюдений не является свидетельством восстановления фитоценоза до естественного состояния, а определяет общие тенденции динамики процесса демутиации. Это подтверждает тезис о том, что эффективность использования NBR снижается в процессе восстановления растительности [Дистанционный ... , 2012]. Поэтому моноиспользование индекса NBR поставит под сомнение надежность результатов оценки перспектив лесовозобновления. Геоинформационные материалы являются вспомогательными (подтверждающими) факторами направленности развития ландшафтообразующих процессов.

Заключение

Данное исследование является продолжением ранее начатых наблюдений за послепожарным лесовосстановлением на гарях урочища Бадары. Нами проведен анализ лесовосстановительной динамики на двух ключевых участках гарей с использованием спектрального индекса NBR и рассчитанного на его основе индекса dNBR. В ходе анализа геоботанической характеристики растительного покрова на участках различной степени пирогенной трансформации выявлена схожесть восстановительных сукцессий как естественных всходов, так и искусственно посаженных сосновых саженцев на площадке, более пострадавшей от огня. Естественное лесовозобновление проходит со значительным доминированием в подросте сосны обыкновенной, чаще всего характеризующейся высокими показателями прироста по высоте и удовлетворительной степенью проективного покрытия. Искусственно возобновляемый сосновый подрост, несмотря на сдерживающие факторы развития, в целом также характеризуется перспективностью успешного восстановления. Выявленная тенденция подтверждена динамикой показателей индексов. Значения NBR указывают на общие тенденции процесса лесовосстановления; индекс dNBR более точно характеризует степень огневого поражения, а также позволяет судить об особенностях динамики зарастания гарей в ходе демутиации.

Нами отмечена достаточная достоверность спектральных индексов NBR и dNBR в отображении внутритерриториальной неоднородности постпирогенных сукцессий, особенно на начальных этапах восстановления. По мере увеличения геоботанических параметров возобновляемого растительного покрова, особенно травяной растительности, оказывающей значительное влияние на завышение показателей спектральных индексов, отмечается снижение дифференциации геоданных середины и окончания периода вегетации для участков разной степени пирогенной трансформации. Поэтому вывод о приоритете использования показателей спектральных индексов начала вегетационного периода в рассмотрении восстановительных сукцессий, полученный по результатам ранее проведенных исследований, становится еще более актуальным в условиях значительного роста средневисотных значений восстанавливаемой растительности, что отражается на завышении показателей NBR. Это является основной причиной риска получения недостоверных данных при дистанционной оценке послепожарного лесовосстановления. Очевидно, что продолжение натурных наблюдений будет способствовать выявлению большего числа критериев, повышающих информативность геоданных в оценке восстановления растительного покрова на пирогенно трансформированных территориях.

Список литературы

- Атутова Ж. В. Анализ послепожарной восстановительной динамики сосновых лесов урочища Бадары (Республика Бурятия) // География и природные ресурсы. 2023. Т. 44, № 5. С. 71–77. <https://dx.doi.org/10.15372/GIPR20230508>
- Атутова Ж. В. Постпирогенное восстановление подтаежных светлехвойных геосистем Тункинской котловины, Юго-Западное Прибайкалье (на примере сосновых лесов урочища Бадары) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 4 (63). С. 6–18. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-4-6-18>
- Ашик Е. В., Чубарова Ю. М., Ярмишко В. Т. Послепожарная динамика древостоев и подроста *Pinus silvestris* (PINACEAE) в условиях Ладожских шхер // Растительные ресурсы. 2015. Вып. 3. С. 384–396.
- Бугаева К. С., Оскорбин П. А. Послепожарная динамика лесных насаждений в Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2008. № 4. С. 28–33.
- Дистанционный мониторинг гарей в Марийском Заволжье / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, А. В. Губаев [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2012. № 1. С. 12–22.
- Трансформация напочвенного покрова при низовых пожарах и оценка пирогенной эмиссии углерода в темнохвойных лесах Средней Сибири / Е. А. Кукавская, Л. В. Буряк, О. П. Каленская, Д. С. Зарубин // Сибирский экологический журнал. 2017. № 1. С. 72–82. <https://doi.org/10.15372/SEJ20170108>
- Лесовозобновление после пожаров разной интенсивности в сосняках Средней Сибири / С. В. Жила, Г. А. Иванова, В. А. Иванов, П. А. Цветков // Сибирский лесной журнал. 2019. № 6. С. 53–62. <https://doi.org/10.15372/SJFS20190606>
- Малиновских А. А. Степень развития растительного покрова в разных типах лесорастительных условий на гарях в ленточных борах Алтайского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24. № 4. С. 43–51. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-43-51>
- Пушкин А. А., Сидельник Н. Я., Ковалевский С. В. Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах // Труды БГТУ. 2015. № 1 (174) : Лесное хозяйство. С. 36–40.
- Родионова Н. В., Вахнина И. Л., Желибо Т. В. Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский

край) по радарным и оптическим данным спутников Sentinel ½ // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 14–25. <https://doi.org/10.31857/S0205961420030045>

Рожков Ю. Ф., Кондаков М. Ю. Оценка процесса восстановления лесов после пожара с использованием кластерного анализа при дешифрировании космических снимков // Вестник Северо-Восточного Федерального университета. 2017. № 2. С. 38–48.

Сидельник Н. Я., Пушкин А. А., Ковалевский С. В. Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС-технологий // Труды БГТУ. 2018. Серия 1. № 1. С. 5–12.

Соромотин А. В., Бродт Л. В., Приходько Н. В. Трансформация индексов NDVI и NBR на постпирогенных территориях в зоне лесотундр ЯНАО // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. XVII Всерос. науч.-практ. конф. Пенза : Наука и Просвещение, 2022. С. 262–265.

Токарева О. С., Алишаби А. Д. А., Пасько О. А. Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 7. С. 191–199. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7>

Харитонова А. О., Харитонова Т. И. Влияние ландшафтной структуры Мордовского заповедника (Россия) на распространение пожара 2010 года // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6, № 2. С. 29–41. <https://doi.org/10.24189/ncr.2021.022>

Чугунова Р. В. К вопросу о классификации гарей // Научные сообщения. Вып. 3. Якутск : Якут. кн. изд-во, 1960. С. 67–70.

Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на многоспектральных спутниковых данных // Сибирский экологический журнал. 2020. № 1. С. 129–140. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200110>

Якимов Н. Д., Забродин А. Н., Пономарев Е. И. Связь степени пожарного воздействия с восстановительной динамикой растительности по данным мониторинга спектральных индексов // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск : Изд-во Сиб. пожар. спасат. акад. ГПС МЧС России, 2022. С. 55–60.

Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices / M. Cuevas-González, F. Gerard, H. Balzter, D. Riaño // Global Change Biology. 2009. Vol. 15, Is. 3. P. 561–577. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x>

Assessment of burned forest area severity and postfire regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) using dNBR and RdNBR spectral indices / S.M.B.d. Santos, A. Bento-Gonçalves, W. Franca-Rocha, G. Baptista // Geosciences. 2020. Vol. 10, N 3. P. 106. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030106>

Autova Zh. V. Post-fire restoration of pine forest in the Badary area, Tunkinskiy National Park, Russia // Nature Conservation Research. 2023. Vol. 8, N 2. P. 22–32. <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.010>

Autova Z. V., Rasputina E.A. Applicability of NBR and dNBR indices in assessment of pyrogenic transformation and post-fire forest regeneration: case study of southeastern Siberia coniferous forests // Geography, Environment, Sustainability. 2025. Vol. 4, N 18. P. 36–47. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3963>

Avetisyan D., Velizarova E., Filchev L. Post-fire forest vegetation state monitoring through Satellite Remote Sensing and In Situ Data // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. P. 6266. <https://doi.org/10.3390/rs14246266>

Climate change, fire return intervals and the growing risk of permanent forest loss in boreal Eurasia / A. L. Burrell, Q. Sun, R. Baxter [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 831. P. 154885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154885>

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest // Ecological Indicators. 2016. Vol. 62. P. 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026>

Informational analysis of MODIS NDVI and EVI time series of sites affected and unaffected by wildfires / R. Ba, W. Song, M. Lovallo, H. Zhang, L. Telesca // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2022. Vol. 604. P. 127911. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127911>

Long-term effects of fire severity and climatic factors on post-forest-fire vegetation recovery / B. Hao, X. Xu, F. Wu, L. Tan // *Forests*. 2022. Vol. 13. P. 883. <https://doi.org/10.3390/f13060883>

Long-term monitoring of vegetation dynamics in the Rhodopi Mountain Range National Park-Greece / P. Xofis, J. A. Spiliotis, S. Chatzigiovanakis, A. S. Chrysomalidou // *Forests*. 2022. Vol. 13. P. 377. <https://doi.org/10.3390/f13030377>

Monitoring post-fire recovery of chaparral and conifer species using field Surveys and Landsat time series / C. L. Kibler, A.-M. L. Parkinson, S. H. Peterson [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(24). P. 2963. <https://doi.org/10.3390/rs11242963>

Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T. Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index // *Fire*. 2022. Vol. 5, N 1. P. 19. <https://doi.org/10.3390/fire5010019>

References

Atutova Zh.V. Analiz poslepozharnoj vosstanovitelnoj dinamiki sosnovykh lesov urochishcha Badary (Respublika Buryatiya) [Analysis of the post-fire restoration dynamics in pine forests of the Badary tract (Republic of Buryatia)]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2023, no 5, vol. 44, pp. 71-77. <https://dx.doi.org/10.15372/GIPR20230508>

Atutova Zh.V. Post-fire restoration of pine forest in the Badary area, Tunkinskiy National Park, Russia. *Nature Conservation Research*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 22-32. <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.010>

Atutova Zh.V. Postpirogennoe vosstanovlenie podtaezhnykh svetlohojnykh geo-sistem Tunkinskoj kotloviny, Yugo-Zapadnoe Pribajkal'e (na primere sosnovykh lesov urochishcha Badary) [Post-pyrogenic reforestation of subtaiga light coniferous geosystems of the Tunkinskaya depression, South-Western Cisbaikalia (the study of pine forests of the Badary urochishche)]. *Geograficheskij vestnik* [Geographical bulletin], 2022, no. 4(63), pp. 6-18. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-4-6-18> (in Russian)

Atutova Z.V., Rasputina E.A. Applicability of NBR and dNBR indices in assessment of pyrogenic transformation and post-fire forest regeneration: case study of southeastern Siberia coniferous forests. *Geography, Environment, Sustainability*, 2025, vol. 4 (18), pp. 36-47. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3963>

Ashik E.V., Chubarova YU.M., Yarmishko V.T. Poslepozharnaya dinamika drevostoev i podrosta Pinus silvestris (PINACEAE) v usloviyakh Ladozhskikh shkher [Post-fire dynamics of stands and undergrowth of Pinus silvestris (PINACEAE) in the Ladoga skerries]. *Rastitelnye resursy* [Plant resources], 2015, vol. 3, pp. 384-396. (in Russian)

Avetisyan D., Velizarova E., Filchev L. Post-fire forest vegetation state monitoring through Satellite Remote Sensing and In Situ Data. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, pp. 6266. <https://doi.org/10.3390/rs14246266>

Ba R., Song W., Lovallo M., Zhang H., Telesca L. Informational analysis of MODIS NDVI and EVI time series of sites affected and unaffected by wildfires. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, vol. 604, pp. 127911. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127911>

Bugaeva K.S., Oskorbin P.A. Poslepozharnaya dinamika lesnykh nasazhdenij v Krasnoyarskoj lesostepi [Post-fire dynamics of forest plantations in the Krasnoyarsk forest-steppe]. *Lesovedenie* [Forestry], 2008, no. 4, pp. 28-33. (in Russian)

Burrell A.L., Sun Q., Baxter R., Kukavskaya E.A., Zhila S., Shestakova T., Rogers B. M., Kaduk J., Barrett K. Climate change, fire return intervals and the growing risk of permanent forest loss in boreal Eurasia. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 831, pp. 154885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154885>

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest. *Ecological Indicators*. 2016. vol. 62, pp. 32-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026>

Chugunova R.V. K voprosu o klassifikacii garej [On the classification of burnt areas]. *Nauchnye soobshcheniya. Vypusk 3* [Scientific communications. Is. 3]. Yakutsk, Yakut book publ., 1960, pp. 67-70. (in Russian)

Cuevas-González M., Gerard F., Balzter H., Riaño D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices. *Global Change Biology*, 2009, vol. 15, issue 3, pp. 561–577. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x>

Hao B., Xu X., Wu F., Tan L. Long-term effects of fire severity and climatic factors on post-forest-fire vegetation recovery. *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 883. <https://doi.org/10.3390/f13060883>

Haritonova A.O., Haritonova T.I. Vliyanie landshaftnoj struktury Mordovskogo zapovednika (Rossiya) na rasprostranenie pozhara 2010 goda [The effect of landscape pattern on the 2010 wildfire spread in the Mordovia state nature reserve, Russia]. *Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research], 2021, vol. 6, no. 2, pp. 29–41. <https://doi.org/10.24189/ncr.2021.022> (in Russian)

Kibler C.L., Parkinson A.-M.L., Peterson S.H., Roberts D.A., D'Antonio C.M., Meerdink S.K., Sweeney S.H. Monitoring post-fire recovery of chaparral and conifer species using field Surveys and Landsat time series. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (24), p. 2963. <https://doi.org/10.3390/rs11242963>

Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Kalenskaya O.P., Zarubin D.S. Transformaciya napoch-ven-nogo pokrova pri nizovyh pozharah i ocenka pirogennoj emissii ugleroda v tem-nohvojnyh lesah Sred-nej Sibiri [Transformation of ground cover during ground fires and assessment of pyrogenic carbon emissions in dark coniferous forests of Central Siberia]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2017, no. 1, pp. 72–82. <https://doi.org/10.15372/SEJ20170108> (in Russian)

Malinovskih A.A. Stepen razvitiya rastitelnogo pokrova v raznyh tipah lesorastitel'nyh uslovij na garyah v lentochnyh borah Altajskogo kraja [Plant cover development degree under different types of forest growth conditions on burnt areas in the belt pine forests of the Altai region]. *Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin], 2020, vol. 24, no. 4, pp. C. 43–51. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-43-51> (in Russian)

Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T. Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index. *Fire*, 2022, vol. 5, no. 1, p. 19. <https://doi.org/10.3390/fire5010019>

Pushkin A.A., Sidelnik N.YA., Kovalevskij S.V. Ispolzovanie materialov kos-micheskoy s"emki dlya ocenki pozharnoj opasnosti v lesah [Using space imagery to assess forest fire risk]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1 (174): Lesnoe hozjajstvo [Forestry], pp. 36–40. (in Russian)

Rodionova N.V., Vahnina I.L., ZHelibo T.V. Ocenka dinamiki poslepozhar'nogo sostoyaniya rastitel'nosti na territorii Ivano-Arahlejskogo prirodnogo parka (Zabajkalskij kraj) po radarnym i opticheskim dannym sputnikov Sentinel ½ [Assessment of the dynamics of postfire state of vegetation in territory Ivan-Arakhley Natural Park (Zabaikalsky Krai) using radar and optical Sentinel 1/2 Data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Exploration of Earth from space], 2020, no. 3, pp. 14–25. <https://doi.org/10.31857/S0205961420030045> (in Russian)

Rozhkov Yu.F., Kondakov M.Yu. Ocenka processa vosstanovleniya lesov posle pozhara s ispolzovaniem klaster'nogo analiza pri deshifirovanii kosmicheskikh snimkov [Assessing the forest restoration process after a fire using cluster analysis in satellite imagery interpretation]. *Vestnik Severo-Vostochnogo Federal'nogo universiteta* [Vestnik of North-Eastern Federal University], 2017, no. 2, pp. 38–48. (in Russian)

Santos S.M.B.d., Bento-Gonçalves A., Franca-Rocha W., Baptista G. Assessment of burned forest area severity and postfire regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) using dNBR and RdNBR spectral indices. *Geosciences*, 2020, vol. 10(3), pp. 106. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030106>

Shvecov E.G., Ponomarev E.I. Poslepozhar'nye efekty v listvennichnikah Sibiri na mnogospектральных спутниковых данных [Post-fire effects in Siberian larch forests using multispectral satellite data]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2020, no. 1, pp. 129–140. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200110>. (in Russian)

Sidelnik N.Ya., Pushkin A.A., Kovalevskij S.V. Kartirovanie povrezhdennyh lesnyh nasa-zhdenij i ob"ektov lesohozjajstvennyh meropriyatij s ispolzovaniem materialov kosmicheskoy s"emki i GIS-tehnologij [Mapping damaged forest stands and forest management facilities using satellite imagery and GIS technologies]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2018, vol. 1, no.1, pp. 5–12. (in Russian)

Soromotin A.V., Brodt L.V., Prihodko N.V. Transformaciya indeksov NDVI i NBR na postpi-rogen'nyh territoriyah v zone lesotundr YANAO [Transformation of NDVI and NBR indices in post-pyrogenic areas in the forest-tundra zone of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]. *Vysokie*

tehnologii, nauka i obrazovanie: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovacii [High technologies, science and education: current issues, achievements and innovations]. Proc. of the 17th All-Russian sci. and pract. conf.]. Penza, Nauka and Prosveshchenie Publ., 2022, pp. 262-265. (in Russian)

Tokareva O.S., Alshaibi A.D.A., Pasko O.A. Ocenka vosstanovitelnoj dinamiki rastitelnogo pokrova lesnyh garej s ispolzovaniem dannyh so sputnikov Landsat [Assessing the restoration dynamics of vegetation cover in forest burnt areas using data from Landsat satellites]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2021, vol. 332, no. 7, pp. 191-199. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7> (in Russian)

Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Distancionnyj monitoring garej v Marijskom Zavolzh'e [Remote monitoring of burnt areas in the Mari Trans-Volga region]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series Forest. Ecology. Nature Management], 2012, no. 1, pp. 12-22. (in Russian)

Xofis P., Spiliotis J.A., Chatzigiovanakis S., Chrysomalidou A.S. Long-term monitoring of vegetation dynamics in the Rhodopi Mountain Range National Park-Greece. *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 377. <https://doi.org/10.3390/f13030377>

Yakimov N.D., Zabrodin A.N., Ponomarev E.I. Svyaz stepeni pozhnarnogo vozdejstviya s vosstanovitelnoj dinamikoj rastitelnosti po dannym monitoringa spektralnyh indeksov [The relationship between the degree of fire impact and vegetation recovery dynamics based on spectral index monitoring data]. *Aktualnye problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti i zashchity ot chrezvychajnyh situacij* [Current issues in fire safety and emergency protection]. Collection of materials from the All-Russian scientific and practical conference]. Zheleznogorsk, Siberian fire and rescue Academy of the State fire service of the Ministry of emergencies situations of Russia Publ., 2022, pp. 55-60. (in Russian)

Zhila S.V., Ivanova G.A., Ivanov V.A., Cvetkov P.A. Lesovozobnovlenie posle pozharov raznoj intensivnosti v sosnyakah Srednej Sibiri [Reforestation after fires of different intensity in pine forests of Central Siberia]. *Sibirskij lesnoj zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2019, no 6, pp. 53-62. <https://doi.org/10.15372/SJFS20190606> (in Russian)

Сведения об авторах

Атутова Жанна Владимировна

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геоморфологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: atutova@mail.ru

Распутина Елена Александровна

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория теоретической географии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: elenaistoma@gmail.com

Information about the authors

Atutova Zhanna Vladimirovna

Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist,
Laboratory of Geomorphology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: atutova@mail.ru

Rasputina Elena Aleksandrovna

Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist,
Laboratory of Theoretical Geography
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: elenaistoma@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.12

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 06.06.2026; принята к публикации 08.06.2026
The article was submitted March, 06, 2026; approved after reviewing June, 06, 2026; accepted for publication June, 08, 2026