1.6.21. Геоэкология

Научная статья

УДК 528.88:630.43

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ПО ОПУБЛИКОВАННЫМ СПУТНИКОВЫМ И ПОЛЕВЫМ ДАННЫМ

Прядилина Александра Владимировна, кандидат географических наук, ведущий инженер, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва, priadilina.aleksandra@mail.ru;

Головань Екатерина Владимировна, кандидат географических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, Санкт-Петербург, perm.iuliia@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается методика геоэкологической диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины по опубликованным спутниковым и полевым данным. Цель работы заключается в разграничении восстановления спектральных характеристик растительности и возобновления структурно-функциональных свойств лесной геосистемы. Методологическую основу составляют сравнительный анализ исследований, использование нормализованного индекса выгорания NBR, разностного показателя dNBR и сведений о состоянии древостоя и почвенного покрова. Предложена типология восстановительных траекторий, учитывающая начальную тяжесть пожара, динамику спектральных характеристик, особенности подроста и повторные нарушения. Для временной диагностики рассматриваются показатели T80 и T90 с правилом подтверждения устойчивого достижения порога в двух последовательных сопоставимых сезонах. Показано, что спектральное приближение поверхности к предпожарному состоянию не является достаточным доказательством восстановления исходного породного состава и структуры леса. Сделан вывод о необходимости согласованного

использования дистанционных и полевых характеристик в системе мониторинга послепожарных изменений.

Ключевые слова: постпирогенное восстановление; сосновые леса; Тункинская котловина; Landsat; индекс NBR; геоэкологическая диагностика.

Original article

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF POST-FIRE PINE FOREST RECOVERY IN THE TUNKA DEPRESSION USING PUBLISHED SATELLITE AND FIELD DATA

Priadilina Aleksandra Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Leading Engineer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, priadilina.aleksandra@mail.ru;

Golovan Ekaterina Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, perm.iuliia@yandex.ru

Abstract. This article examines a methodology for geoecological diagnostics of post-fire restoration of pine forests in the Tunka Basin using published satellite and field data. The objective of the study is to distinguish between the restoration of the spectral characteristics of vegetation and the renewal of the structural and functional properties of the forest geosystem. The methodological basis consists of a comparative analysis of studies, the use of the normalized burn index (NBR), the difference indicator dNBR, and information on the state of the forest stand and soil cover. A typology of restoration trajectories is proposed, taking into account the initial severity of the fire, the dynamics of spectral characteristics, the characteristics of the undergrowth, and repeated disturbances. For temporal diagnostics, the T80 and T90 indicators are considered, with the rule of confirming the stable achievement of the threshold in two consecutive comparable seasons. It is shown that the spectral approximation of the surface to the pre-fire state is not sufficient evidence of the restoration of the original species composition and structure of the forest. A conclusion

is drawn regarding the need for a coordinated use of remote sensing and field characteristics in the system for monitoring post-fire changes.

Keywords: post-fire recovery; pine forests; Tunka Depression; Landsat; normalized burn ratio; geoecological assessment.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Лесной пожар в бореальном ландшафте представляет собой не только событие, при котором повреждается или уничтожается древостой. Его последствия распространяются на систему связей между растительностью, почвой, водно-тепловым режимом и приземным слоем атмосферы. После прохождения огня меняются альбедо поверхности, испарение и прогрев почвы, нарушается подстилка, высвобождаются элементы питания, перестраиваются конкурентные отношения между древесными и травяно-кустарничковыми видами. По этой причине геоэкологическая оценка гари не может ограничиваться ответом на вопрос, появилась ли на ней растительность через несколько лет. Гораздо существеннее установить, в каком направлении изменяется природный комплекс и приближается ли его современное состояние к тому, которое существовало до нарушения.

Актуальность такой постановки усилилась на фоне изменения пожарных режимов в лесах высоких и умеренных широт. Анализ глобальных пиромов показал заметный рост лесных пожарных эмиссий во внетропических районах в XXI в., причем наблюдаемая динамика связана с усилением благоприятных для горения погодных условий на фоне климатических изменений [15]. Для сибирских лесов проблема имеет собственную региональную специфику. По данным Е. Г. Швецова, в 2002–2022 гг. увеличивались как общая площадь пожаров, так и площадь участков, где огонь сопровождался последующей гибелью древостоя. Пожары с гибелью леса отличались статистически более высокой суммарной мощностью теплоизлучения, что подтверждает необходимость учитывать характеристики самого нарушения, а не

рассматривать все гари как исходно одинаковые объекты [5].

Наряду с ростом пирогенной нагрузки меняется и понимание того, что именно следует называть восстановлением. В дистанционном зондировании этот термин продолжительное время нередко связывался с возвратом одного из спектральных индексов к прежнему диапазону. Такая трактовка удобна для картографирования больших и труднодоступных территорий, однако экологический смысл полученного результата остается ограниченным. Как отмечает J. C. White, определение forest recovery должно быть измеримым и соответствовать конкретной исследовательской задаче; одинаковое слово может обозначать восстановление отражательной способности поверхности, сомкнутости древесного яруса, запаса древесины, высоты насаждения либо видового состава [2].

Современные эмпирические работы подтверждают принципиальность этого разграничения. После крупного пожара в сибирских бореальных лесах спектральные характеристики способны возвращаться к предпожарному диапазону быстрее, чем породная структура. S. G. Bao с соавторами установили, что после Black Dragon Megafire спектральное восстановление опережало композиционное, причем доля широколиственных компонентов возрастала быстрее, чем доля хвойных; возвращение спектрального состояния к базовому уровню занимало приблизительно 15–16 лет [4]. Следовательно, пиксель, который по Landsat снова выглядит как покрытый развитой растительностью, необязательно соответствует восстановившемуся хвойному лесу.

Та же методологическая проблема особенно отчетливо прослеживается в Тункинской котловине. Ж. В. Атутова и Е. А. Распутина объединили материалы Landsat 7 за 2009–2022 гг. с полевыми наблюдениями на постоянных площадях, проводившимися в 2014–2022 гг. после пожара 2010 г. в районе Бадары. Для точек наблюдений было получено около пятисот пригодных к анализу безоблачных значений NBR. К 2021 г. спектральный показатель на одном из нарушенных участков приблизился к предпожарным значениям, однако полевые

описания не позволяли говорить о возвращении фитоценоза к близкому к исходному состоянию [1]. Это расхождение имеет не частный, а общеметодический характер: дистанционный сигнал фиксирует свойства поверхности, тогда как лесная геосистема восстанавливается одновременно на нескольких уровнях и с неодинаковой скоростью.

Выбор Тункинской котловины в качестве регионального полигона определяется не только наличием совмещенных спутниковых и полевых наблюдений. Ландшафтная структура территории формирует выраженную неоднородность пожарной опасности. А. А. Черкашина и А. В. Силаев установили, что наиболее высокой повторяемостью пожаров отличаются боровые сосновые леса, связанные с песчаными массивами центральной части котловины и отдельными южными склонами [3]. Тем самым здесь складывается ситуация, когда постпирогенная сукцессия протекает не после изолированного единичного события, а в ландшафте с сохраняющейся вероятностью нового нарушения.

Повторный огонь меняет саму исследовательскую логику. Если следующий пожар происходит до достижения древостоем зрелого восстановительного состояния, наблюдаемый ряд уже нельзя описывать простой монотонной кривой возвращения к исходному уровню. Формируется последовательность нарушений, между которыми растительность успевает пройти лишь часть сукцессионного пути. Возникает вероятность закрепления менее сомкнутых, травяно-кустарничковых или мелколиственных сообществ, а семенное возобновление исходной хвойной породы становится зависимым от расстояния до сохранившихся участков и пространственной конфигурации гари.

Именно пространственная конфигурация в последние годы рассматривается как один из самостоятельных факторов восстановления. T. Liu с соавторами, анализируя последствия сибирского пожара 2003 г. на уровне отдельных гарей, установили, что к 2023 г. восстановились 72,7 % исследованных пятен, а среднее время восстановления составило 12,2 года. В

крупных и вытянутых гарях процесс занимал больше времени, чем в небольших компактных участках, а внутри одной гари отчетливо проявлялся градиент от кромки к центру [10]. Такой результат хорошо согласуется с экологическим механизмом поступления семян от сохранившегося леса и показывает, почему пиксельный анализ без учета геометрии нарушенного массива способен сглаживать содержательно важные различия.

Еще одна сторона проблемы связана с климатом восстановительного периода. Пожар задает первоначальное повреждение, но дальнейшая судьба леса зависит от водообеспеченности, температурных экстремумов и условий конкретных лет. Глобальное исследование Q. Lv с соавторами показало, что менее трети лесов после крупных пожаров достигали предпожарного уровня по использованным показателям в пределах семи лет; увеличение тяжести пожара сопровождалось удлинением восстановительного периода, особенно в бореальных лесах, а почвенная влага проявила себя как важнейший фактор, способствующий восстановлению [8]. В работе S. Smith-Tripp с соавторами уже на уровне структуры древостоя установлена связь замедленного восстановления хвойных с аномально холодными и сухими летними сезонами после пожара [14].

При этом отдельные функции экосистемы способны возвращаться существенно быстрее древесного яруса. Глобальная оценка постпожарной продуктивности показала, что примерно 87 % нарушенной растительности возвращалось к предпожарному уровню валовой первичной продукции в течение двух лет, хотя вечнозеленые хвойные леса относились к группам с наиболее продолжительным восстановительным временем [16]. Сопоставление этого результата с данными по структуре и породному составу еще раз показывает, что восстановление следует оценивать раздельно по нескольким группам диагностических показателей. Быстрое возвращение продуктивности может обеспечиваться травами, кустарниками или лиственными породами и потому не доказывает восстановления прежнего древостоя.

Таким образом, научная проблема состоит не в недостатке дистанционных

индексов как таковых, а в несоответствии между многокомпонентной природой постпирогенной сукцессии и упрощенной интерпретацией спутникового сигнала. Геоэкологический подход требует рассматривать гарь как пространственно организованный природный комплекс, состояние которого определяется наследием пожара, характеристиками исходного ландшафта, последующей погодой и историей повторных нарушений.

Цель настоящего исследования состоит в разработке и обосновании схемы пространственно-временной диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины, позволяющей разграничить возвращение спектральных характеристик поверхности к исходному уровню и структурное и ценотическое восстановление лесной геосистемы. Объектом исследования выступают пирогенно нарушенные сосновые леса Тункинской котловины, прежде всего район Бадары Тункинского национального парка. Предмет исследования составляют пространственно-временные изменения спектральных, фитоценотических и ландшафтных характеристик после пожара и их пригодность для выделения разных траекторий сукцессии.

Гипотеза заключается в том, что возвращение NBR к предпожарному диапазону является необходимым, но недостаточным условием экологического восстановления леса. При высокой тяжести исходного повреждения, повторных пожарах либо неблагоприятных условиях возобновления спектральные показатели могут заметно улучшаться за счет травяно-кустарничковой и мелколиственной растительности, тогда как структура и породный состав по-прежнему существенно отличаются от фоновых сосновых сообществ. Научная новизна предлагаемого подхода связана с совместной классификацией спектральной динамики и изменений, фиксируемых наземными наблюдениями, а также с трактовкой их расхождения как самостоятельного признака изменившегося направления сукцессии.

Методология исследования. Работа выполнена в формате сравнительно-аналитического исследования, направленного на разработку методической

схемы геоэкологической диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины. Информационной основой выступают опубликованные результаты дистанционных наблюдений Landsat и полевых исследований состояния лесных сообществ. Для характеристики первоначальной тяжести нарушения используется разностный нормализованный индекс выгорания dNBR, а для анализа последующего восстановления — изменение NBR относительно предпожарного состояния. Дополнительно учитываются сведения о видовом составе древостоя, наличии подроста, состоянии почвенного покрова и повторных пожарах.

Нормализованный индекс выгорания рассчитывается по отражению в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2} \quad (1)$$

где NIR — отражение в ближнем инфракрасном диапазоне, $SWIR_2$ — отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Для оценки первоначального изменения применяется разностный показатель:

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

Высокое положительное значение dNBR соответствует более выраженному падению спектрального отклика растительности после прохождения огня. В исследовании Ж. В. Атутовой и Е. А. Распутиной для сосновых лесов Тункинской котловины значения dNBR выше 0,500 характеризовали участки сильного пирогенного преобразования, тогда как интервал приблизительно 0,400–0,500 соответствовал более умеренному повреждению [1].

Важно характеризовать предпожарное состояние с помощью устойчивого исходного уровня. При наличии архива целесообразно формировать ее по нескольким годам, отбирая наблюдения в одинаковой фазе вегетационного сезона. Тогда аномально влажный либо засушливый год не превращается в искусственный эталон. Для пожара 2010 г. региональные материалы позволяют как минимум отделить допожарные наблюдения 2009 г. от последующего ряда и

сопоставить спутниковую динамику с долгосрочной полевой информацией [1]. В более протяженных сериях Landsat многолетняя базовая линия должна рассматриваться как предпочтительный вариант.

Для описания степени спектрального возвращения предлагается относительный показатель:

$$R_{nbr}(t) = \frac{NBR(t) - NBR_{post}}{NBR_{pre} - NBR_{post}} \quad (3)$$

где NBR_{post} фиксирует состояние непосредственно после пожара, NBRpre соответствует предпожарному уровню, а NBR(t) отражает состояние в анализируемом году. Значение, близкое к 1, означает спектральное приближение к исходному уровню. Показатель не используется как самостоятельное доказательство лесовосстановления. Его назначение состоит в том, чтобы сделать временную траекторию сопоставимой между участками, различающимися по исходному NBR.

Для оценки продолжительности спектрального восстановления предлагается использовать показатели T80 и T90, определяемые как число лет от момента пожара до достижения соответственно 80 и 90 % исходного нормированного спектрального уровня. Чтобы исключить случайную классификацию по единственному благоприятному сезону, устойчивым достижением порога в предлагаемой методике считается выполнение условия не менее чем в двух последовательных сопоставимых вегетационных сезонах. Принципиально учитывать устойчивость достижения порога: его кратковременное достижение в один благоприятный сезон не должно автоматически означать окончание восстановительного периода. При наличии плотного временного ряда достижение критерия следует подтверждать последующими наблюдениями и проверять относительно фонового участка.

Фоновая территория подбирается не только по расстоянию от гари. Она должна относиться к сопоставимому типу местоположения, иметь близкую экспозицию и высотное положение, аналогичные почвенно-литологические свойства и исходный тип древостоя. Такой контроль позволяет частично

исключить межгодовое влияние погоды. Если NBR одновременно снижается как на гари, так и на неповрежденном аналоге, причиной может быть засуха или иной региональный фактор.

Отдельно учитывается фенологический эффект. В Тункинской котловине при переходе от весны к максимуму вегетации травяной покров существенно изменяет спектральный отклик. Опубликованное исследование показало, что для обнаружения свежей гари информативны снимки середины вегетационного периода, тогда как при оценке древесного возобновления весенний dNBR меньше зависит от развитого травостоя [1]. Следовательно, смешение майского снимка одного года с июльским снимком другого года способно породить ложную динамику, сравнимую по величине с собственно восстановительным сигналом.

С учетом этих положений информационная база организуется следующим образом.

Таблица 1 – Система исходных данных для геоэкологической оценки постпирогенных траекторий

Блок данных	Пространственно-временная характеристика	Аналитическая функция	Методическое ограничение
Landsat 7/8/9	30 м; многолетние сезонно согласованные наблюдения	NBR, dNBR, временные траектории, предпожарная линия	облачность, дым, тени, различия сенсоров, смешанный состав пикселя
Sentinel-2	10–20 м; детализирующие наблюдения последних лет	уточнение пространственной неоднородности и границ молодых восстановительных участков	недостаточная продолжительность архива для 20–30-летнего анализа
Полевые постоянные площади	повторные описания одного местоположения	породный состав, сомкнутость, высота и густота подроста, напочвенный покров	ограниченный территориальный охват
dNBR / контур пожара	состояние до и непосредственно после события	первоначальная стратификация гари по тяжести	порог требует локальной калибровки
Ненарушенные референсные участки	тот же ландшафтный тип	контроль погодной и фенологической изменчивости	ошибочный подбор контроля искажает оценку

ЦМР и производные рельефа	высота, уклон, экспозиция, при необходимости TWI	объяснение пространственных различий восстановления	рельеф не заменяет сведения о почвах
Ландшафтные и почвенные материалы	тип геосистемы, субстрат, почва	учет эдафической обусловленности сукцессии	необходима согласованность масштаба
История повторных пожаров	дата, контур, межпожарный интервал	выявление сброса либо изменения траектории	неполнота ранних данных о малых пожарах

Источник: разработано авторами на основе [1–3, 10].

Для основной территории особое значение имеют наземные наблюдения. Полевые площадки позволяют увидеть именно те процессы, которые спутниковый индекс объединяет в единый сигнал. В них фиксируются сохранность и отпад материнского древостоя, появление подроста, соотношение хвойных и лиственных пород, высота молодых деревьев, сомкнутость ярусов и изменение травяно-кустарничкового покрытия. В работах по бореальным лесам сочетание Landsat и наземных либо лидарных структурных данных показывает, что спектральная динамика действительно связана с восстановлением структуры, но связь не является взаимно однозначной [2, 12].

Почвенные свойства рассматриваются как самостоятельный блок, а не выводятся из формы рельефа. Цифровая модель высот дает сведения о перераспределении тепла и влаги по склону, однако гранулометрический состав, мощность органогенного горизонта, водоудерживающая способность и глубина сезонного промерзания из нее непосредственно не следуют. Для Тункинской котловины это особенно важно из-за сочетания песчаных массивов, склоновых комплексов и котловинных поверхностей, по-разному реагирующих на иссушение и огонь [3].

Временной ряд перед анализом должен проходить единообразную фильтрацию. Исключаются облака, облачные тени, снег и изображения, в которых дым перекрывает исследуемую поверхность. Если используются разные поколения Landsat, значения приводятся к сопоставимому уровню отражения и проверяются на наличие систематического сдвига. Данные Sentinel-2 нельзя автоматически считать продолжением ряда Landsat: более высокое

пространственное разрешение полезно для детализации последнего этапа сукцессии, но не заменяет многодесятилетний архив при расчете времени восстановления.

Предлагаемый метод не сводит результат к единому интегральному коэффициенту. Такой коэффициент был бы удобен для ранжирования, но скрывал бы наиболее содержательную ситуацию — расхождение между восстановлением спектрального отклика и состоянием древесного яруса. Вместо этого используются три группы диагностических показателей: спектральные, структурные и ценотические. Отдельно учитываются положение участка в ландшафте и история повторных нарушений.

Схематически возможные варианты представлены на рисунке 1.

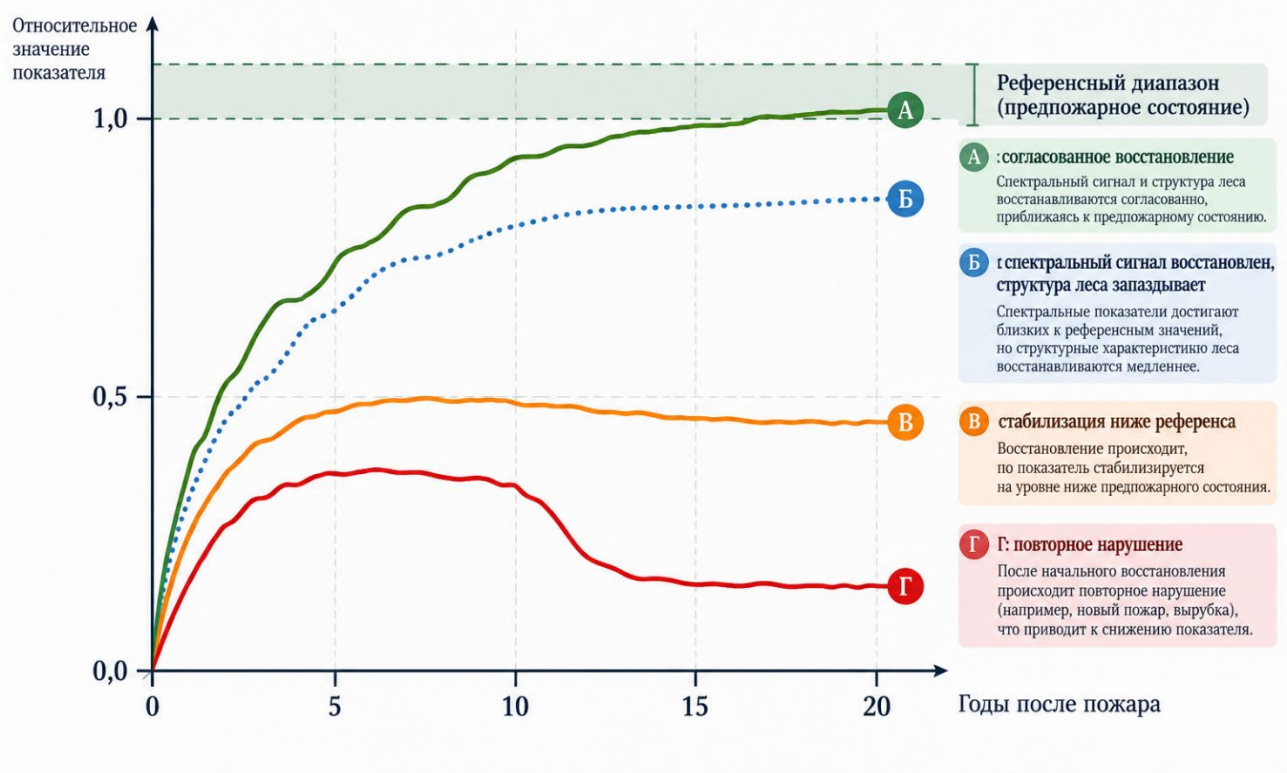


Рисунок 1 – Принципиальные типы временных траекторий после пожара (источник: разработано авторами)

В статистической части для каждой страты тяжести целесообразно определять медианное время достижения заданного спектрального состояния, а не ограничиваться средним значением. Медиана менее чувствительна к участкам, на которых восстановление чрезвычайно затянулось либо новый

пожар прервал временной ряд. Пространственную зависимость времени восстановления следует анализировать в связи с тяжестью повреждения, расстоянием до неповрежденного леса, размером и компактностью гари, экспозицией, увлажнением и типом почвенного субстрата. При наличии достаточного массива данных возможны модели выживания, где «событием» считается достижение установленного критерия восстановления, а не восстановившиеся к концу периода участки рассматриваются как цензурированные наблюдения.

Наконец, дистанционная классификация должна сопровождаться оценкой точности. Для категориальной карты используются независимые контрольные участки и матрица ошибок; для непрерывных показателей оценивается согласование с полевыми характеристиками.

Результаты исследования. Сопоставление материалов по Тункинской котловине с современными исследованиями бореальных лесов позволяет выделить несколько устойчивых закономерностей. Первая из них связана с различием между тяжестью первоначального повреждения и скоростью последующего восстановления. Высокий dNBR характеризует резкое изменение состояния непосредственно после пожара, однако сам по себе не позволяет однозначно определить срок восстановления. Два участка с близким исходным повреждением способны в дальнейшем расходиться вследствие разницы в сохранности материнских деревьев, семенного притока, влажности субстрата и погодных условий нескольких первых лет.

Для района Бадары опубликованные данные хорошо иллюстрируют подобное расхождение. Пожар 2010 г. резко снизил NBR на нарушенных площадках, после чего индекс постепенно увеличивался. К 2021 г. на одном из участков его величина приблизилась к предпожарному диапазону. Если рассматривать только временную линию NBR, такой результат можно было бы истолковать как завершившееся восстановление. Наземные наблюдения дают более осторожную картину: состав и структура растительных сообществ

сохраняли признаки пирогенной трансформации [1].

Причина этого расхождения объясняется физической природой индекса. NBR чувствителен к контрасту между ближним и коротковолновым инфракрасным отражением. Молодая листва, густой травостой и кустарники способны быстро увеличить NIR-сигнал и изменить SWIR-отклик по мере накопления влаги и биомассы. Однако по спутниковому сигналу нельзя определить, формируется ли он кронами молодых сосен, березовым подростом или плотным травяным покровом. Поэтому восстановление индекса — это прежде всего восстановление определенного спектрального свойства поверхности.

Вторая закономерность состоит в том, что расхождение спектральной и ценотической траекторий не является особенностью одного локального полигона. На сибирском материале S. G. Bao с соавторами получили более быстрое возвращение спектральных характеристик по сравнению с породным составом, причем широколиственные компоненты восстанавливались быстрее хвойных [4]. В сухих суббореальных лесах Канады связь между Landsat-траекториями и наземной структурой также оказалась неоднородной: одинаково выраженное спектральное «позеленение» соответствовало разным комбинациям древесного запаса и восстановления структуры [12].

Следовательно, геоэкологическая интерпретация должна отделять по меньшей мере пять вариантов развития нарушенного участка.

Таблица 2 – Типология постпирогенных траекторий лесной геосистемы

Тип траектории	Дистанционный признак	Полевое состояние	Геоэкологическая интерпретация
I. Быстрое согласованное восстановление	NBR устойчиво приближается к референсному диапазону	возрастает сомкнутость древесного яруса, формируется подрост исходной породы	устойчивое движение к состоянию, близкому к допожарному
II. Спектральное восстановление при структурном запаздывании	NBR достиг предпожарного диапазона	древесный ярус разрежен; высокий вклад трав, кустарников либо лиственных пород	ложноположительное «восстановление» при оценке только по индексу
III. Медленное восстановление	плавный положительный	древесное возобновление	сохранение исходного направления сукцессии

	тренд; значения T_{80}/T_{90} велики	присутствует, но темпы его развития невысоки	при длительном восстановительном периоде
IV. Стабилизация на пониженном уровне	после первоначального роста индекс выходит на плато ниже контроля	недостаточное возобновление исходного древостоя	вероятный переход к устойчиво измененному состоянию
V. Повторное нарушение	восстановительная кривая вновь резко падает	новый пожар или иное сильное нарушение	прерывание текущей сукцессии и начало нового восстановительного цикла; межпожарный интервал становится ключевым фактором

Источник: разработано авторами по результатам обобщения [1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14].

Для Тункинской котловины особого внимания требуют траектории II, IV и V. Региональная ландшафтная оценка показывает повышенную повторяемость пожаров именно в сосновых сообществах песчаных массивов [3]. На таких территориях быстрое развитие напочвенной растительности способно маскировать медленное древесное возобновление, а очередной пожар прерывает процесс до того, как лес достигнет структуры, обеспечивающей прежние средообразующие функции.

Третья выявленная закономерность относится к пространственной неоднородности одной и той же гари. Восстановительный период нельзя считать атрибутом пожара в целом. Исследование пожара 2003 г. в Сибири показало устойчивый градиент от периферии нарушенного массива к его внутренней части. Малые и более компактные гари восстанавливались быстрее, тогда как большие и вытянутые — медленнее; для всех проанализированных пятен средний срок составил 12,2 года [10]. Для интерпретации Тункинской котловины это означает, что наряду с dNBR следует измерять площадь пятна, его компактность и расстояние пикселя или полевой площадки до сохранившегося леса.

Четвертая закономерность касается устойчивой роли тяжести пожара. На межрегиональном массиве бореальных и умеренных лесов K. Li с соавторами

установили более медленное спектральное восстановление бореальных территорий; восстановление ускорялось при большей доле широколиственных пород и меньшей тяжести огня, тогда как климатические условия существенно изменяли региональную скорость процесса [6]. В глобальном исследовании крупных пожаров тяжесть нарушения оказалась фактором, сильнее удлинявшим восстановительный период, чем последующие климатические различия, хотя почвенная влага заметно способствовала регенерации [8].

Российские полевые материалы дополняют дистанционную картину. В Амурской области Н. А. Тимченко с соавторами показали, что естественное постпирогенное возобновление лиственницы Гмелина определяется конкретными условиями, формирующимися после огня в мерзлотных ландшафтах [9]. Многолетние исследования гарей Западного Забайкалья также фиксируют различную направленность формирования вторичных лесов в зависимости от территориальной и топологической приуроченности [7]. Эти результаты показывают, что даже в пределах восточносибирского сектора нельзя ожидать одной универсальной функции «время после пожара — степень восстановления».

Пятая закономерность проявляется через роль первых послепожарных лет. Именно в этот период отдельные жизненные формы получают начальное преимущество. Сохранившийся подрост, наличие семенных деревьев и быстрое заселение открытого субстрата задают дальнейшую траекторию на годы вперед. Если хвойное возобновление остается редким, а лиственные породы и травяной покров быстро занимают освободившееся пространство, спектральный индекс может быстро расти, хотя структура сообщества при этом всё больше отличается от исходной.

С этим связан и фенологический эффект, обнаруженный на основном полигоне. В ненарушенном сосняке Тункинской котловины сезонное развитие травяного яруса само по себе существенно увеличивало NBR [1]. Значит, годовой тренд, сформированный из снимков разных месяцев, способен частично

отражать календарное смещение даты съемки. В методическом отношении это один из наиболее опасных источников ложного ускорения восстановления, поскольку он внешне выглядит как естественный плавный рост индекса.

Проверка выводов на иных типах геосистем показывает, что проблема не ограничена лесом. На Большом Васюганском болоте А. А. Синюткина и Л. П. Гашкова обнаружили различную информативность NBR и NDWI: первый показатель лучше отражал выраженность пирогенного воздействия, второй — последующую динамику болотной растительности; наиболее быстрый рост индексов наблюдался в первые 2–4 года после пожара, а прогнозируемый возврат индексов к прежнему уровню занимал 12–14 лет [11]. Хотя болотная система отличается от соснового леса, методический вывод совпадает: показатель, удобный для диагностики повреждения, необязательно является лучшим индикатором всех компонентов восстановления.

Современные международные данные позволяют еще отчетливее увидеть различия между функциями и структурой. Если глобальная продуктивность во многих экосистемах восстанавливается сравнительно быстро [16], то после крупных пожаров менее трети лесов достигают предпожарного состояния по комплексу характеристик в семилетний срок [8]. Такое различие нельзя считать противоречием. Оно показывает, что продуктивность, плотность растительности, вертикальная структура и породный состав имеют собственные временные масштабы.

Сводные результаты, наиболее значимые для методики исследования Тункинской котловины, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Современные эмпирические результаты 2024–2026 гг. и их значение для диагностики постпирогенного восстановления

Исследование	Территория и данные	Основной результат	Следствие для геоэкологической оценки
Атутова, Распутина, 2025 [1]	Тункинская котловина; Landsat 7, полевые наблюдения	возврат NBR не гарантирует возвращения близкого к исходному растительного сообщества	NBR обязательно сопоставляется с полевыми характеристиками
Bao et al., 2024 [4]	сибирский бореальный лес; Landsat	спектральное восстановление быстрее композиционного; широколиственные компоненты восстанавливаются быстрее хвойных	необходимо отдельно контролировать породный состав
Швецов, 2024 [5]	Сибирь, 2002–2022; MODIS, Landsat	пожары с гибелью древостоя имеют более высокие энергетические характеристики	характеристики самого пожара входят в объясняющую модель
Li et al., 2025 [6]	бореальные и умеренные леса	бореальное восстановление медленнее; важны тяжесть пожара, климат и доля лиственных пород	единого регионально независимого срока восстановления нет
Lv et al., 2025 [8]	3281 крупный пожар в мире	менее трети лесов восстановились за 7 лет; тяжесть пожара удлиняет срок	восстановление нужно оценивать на длительном временном интервале
Liu et al., 2026 [10]	сибирский пожар 2003 г.	72,7 % пятен восстановились к 2023 г.; среднее время — 12,2 года; выражен градиент край–центр	в модель вводятся размер, форма гари и расстояние до кромки
Smith-Tripp et al., 2026 [14]	сухие суббореальные леса	структурное восстановление связано с климатическими экстремумами и предпожарной структурой	климат после пожара анализируется наряду с dNBR

Источник: составлено авторами по [1, 4–6, 8, 10, 14].

Полученные сопоставления позволяют уточнить само понятие геоэкологического восстановления. Для пирогенно нарушенного соснового

ландшафта его целесообразно понимать не как возврат одного показателя, а как приближение нескольких взаимосвязанных характеристик к значениям, типичным для референсного состояния, при отсутствии устойчивого перехода к альтернативному состоянию. В этом определении принципиальны и множественность показателей, и временная устойчивость.

На этой основе для Тункинской котловины предлагается трехуровневая диагностическая модель. Первый уровень фиксирует, насколько поверхность спектрально приблизилась к ненарушенному аналогу. Второй показывает, восстановлена ли структура древесного яруса: сформировался ли достаточно представительный подрост, увеличиваются ли его высота и сомкнутость, сохраняются ли деревья исходной генерации. Третий отвечает на вопрос о направлении сукцессии: остается ли сосна ведущей породой либо наблюдается устойчивое перераспределение в пользу мелколиственных видов.

Ландшафтный контекст следует учитывать как отдельный компонент такой оценки. Один и тот же результат полевых описаний имеет разное прогностическое значение на влажном участке с невысокой повторяемостью пожаров и на сухом песчаном массиве, где новый огонь статистически более вероятен. Поэтому карта восстановления должна отражать текущий тип траектории и факторы, способные ее изменить.

Обсуждение результатов исследования. Предложенный подход меняет привычную последовательность интерпретации спутниковых наблюдений. В традиционной схеме сначала рассчитывается индекс, затем по его увеличению делается вывод о восстановлении растительности. Геоэкологический анализ требует дополнительного вопроса: какая именно растительность сформировала этот сигнал и вернулись ли функции, которые обеспечивал допожарный лес?

Такое уточнение особенно существенно для светлохвойных лесов. Сосновый древостой создает особый режим освещения и подстилки, влияет на запас горючих материалов, пространственное распределение влаги и условия для нижних ярусов. Если после пожара участок быстро покрывается травами и

березовым подростом, суммарная фотосинтетически активная биомасса может увеличиваться, но структура природного комплекса уже становится иной. Значит, дистанционное «озеленение» не следует автоматически называть восстановлением соснового леса.

Результаты Bao et al. непосредственно подтверждают этот вывод на материале сибирского бореального сектора: спектральное восстановление после мегапожара происходило быстрее восстановления породного состава, а широколиственные лесные типы демонстрировали более высокие темпы восстановления, чем хвойные [4]. Это обстоятельство объясняет, почему высокое значение NBR в поздней фазе сукцессии без классификации породного состава остается неоднозначным.

Не менее важно различать «медленное восстановление» и «изменение траектории». В первом случае сосна продолжает возобновляться, но ее развитие ограничено суровыми условиями, дефицитом влаги или высокой тяжестью первоначального пожара. Во втором случае доминирующая роль переходит к другому сообществу и разрыв с референсным сосняком со временем не сокращается. Одинаковое низкое значение NBR через пять лет после пожара может характеризовать оба варианта, хотя их экологический прогноз различен.

Полевые наблюдения необходимы именно для такого различения. Полевые наблюдения не должны сводиться к формальной проверке класса «лес/не лес». Наибольшую информацию дают повторные измерения состояния подроста и изменения его породного состава. Если NBR стабильно растет, но число и высота молодых сосен почти не меняются, а проективное покрытие трав и лиственных пород увеличивается, исследователь получает доказательство расхождения двух восстановительных траекторий.

Вместе с тем и наземное обследование имеет пространственные ограничения. Несколько пробных площадей не отражают неоднородность многокилометровой гари. Поэтому дистанционные и полевые методы дополняют друг друга. Landsat обеспечивает пространственно-временной охват

наблюдений, а наземные данные позволяют интерпретировать экологический смысл спектральной динамики. Их объединение составляет ядро методики.

Протяженный архив Landsat остается здесь особенно ценным. Обзор J. C. White указывает на более чем сорокалетнюю последовательность наблюдений с пространственным разрешением 30 м как на один из основных ресурсов исследования восстановления бореальных лесов [2]. Sentinel-2 повышает детализацию современной стадии, однако не дает сопоставимой ретроспективной глубины. Поэтому совмещение двух систем оправдано лишь при четком разделении их функций.

Еще одно следствие относится к оценке времени. Отсчет «прошло десять лет после пожара» почти ничего не сообщает о стадии сукцессии без данных о тяжести и ландшафтном положении. Результаты Liu et al. показывают, что даже в пределах одного крупного пожара время восстановления закономерно меняется от края к центру гари и зависит от ее размеров [10]. Следовательно, возраст нарушения — необходимая, но недостаточная переменная.

Для Тункинской котловины пространственная конфигурация приобретает дополнительное значение из-за особенностей сосновых боров. Песчаные массивы обладают ограниченной влагоудерживающей способностью, а открытые после огня поверхности быстрее прогреваются и иссушаются. Если в центре крупной гари отсутствуют семенные деревья, расстояние до источника семян усиливает действие эдафического дефицита. Два фактора работают совместно, и их действие нельзя корректно приписать только рельефу или только тяжести пожара.

Аналогично следует трактовать влияние экспозиции. Южный склон получает больше солнечной радиации и при прочих равных условиях может быстрее терять влагу. Но сама экспозиция не «задерживает лесовосстановление» автоматически. Ее эффект реализуется через локальный водно-тепловой режим и зависит от субстрата, почв и погодных условий конкретного периода. Такое причинное разграничение важно для геоэкологического моделирования,

поскольку не позволяет подменять объяснение механизма простой констатацией статистической связи.

Климатические экстремумы первых лет после пожара способны изменить траекторию даже при одинаковой начальной тяжести. Исследование структурного восстановления в суббореальных лесах связывает медленное формирование хвойного древостоя с аномально холодными и сухими летними сезонами, тогда как предпожарная структура также сохраняет заметное влияние на последующее состояние [14]. Это дает основание включать в мониторинг не только многолетние климатические нормы, но и последовательность конкретных послепожарных сезонов.

Роль повторного пожара принципиально иная. Он частично разрушает сформировавшуюся древесную структуру и задает новую исходную точку сукцессии. При коротком межпожарном интервале молодые сосны не успевают достичь репродуктивной зрелости, а запас семян и число сохранившихся источников возобновления уменьшаются. В ландшафтах с высокой повторяемостью огня это создает предпосылки для выхода системы из исторически привычного диапазона состояний.

Именно поэтому выявленная Черкашиной и Силаевым высокая пожарная подверженность сосновых боров Тункинской котловины важна не только для противопожарного планирования [3]. Она должна учитываться и при интерпретации карт восстановления. Участок с медленным возобновлением в зоне редких пожаров сохраняет временной ресурс для продолжения сукцессии. Аналогичный участок в зоне высокой повторяемости может не получить такого временного окна.

Полученные положения имеют прикладное значение для организации геоэкологического мониторинга. Территории, на которых спектральный индекс приблизился к референсному уровню и одновременно подтверждено восстановление соснового подроста, могут переводиться в режим менее интенсивного обследования. Там, где спектральные и полевые признаки

расходятся, мониторинг должен сохраняться. Еще большего внимания требуют площади с устойчивым плато ниже референсного состояния и участки, где новый пожар нарушил незавершенную сукцессию.

В этой связи карта восстановительных траекторий информативнее обычной карты давности пожаров. На ней один цветовой класс должен объединять территории по типу процесса. Пятнадцатилетняя гарь с развитым сосновым подростом и пятнадцатилетняя гарь, занятая преимущественно лиственной порослью, нуждаются в разных геоэкологических оценках, хотя дата нарушения совпадает.

Предлагаемая схема также позволяет осторожнее пользоваться термином «устойчивость». Быстрый возврат индекса после пожара свидетельствует о быстром восстановлении биомассы растительного покрова, фиксируемом по спектральным характеристикам. Устойчивость исходного соснового леса требует большего: возврата древесной структуры, возобновления ведущей породы и сохранения способности комплекса продолжать развитие без перехода к альтернативному типу сообщества.

В этом отношении особенно показательна разница между глобальными оценками продуктивности и исследованиями структуры леса. Быстрое восстановление GPP, выявленное для значительной части пожаров [16], не опровергает многолетние сроки структурного восстановления, обнаруженные в бореальных лесах [8, 10, 14]. Напротив, сопоставление этих результатов дает более полную картину: биогеохимическая функция может частично восстановиться раньше, чем прежняя пространственная организация древостоя.

Научно-практический результат работы поэтому заключается не в выборе «лучшего» дистанционного индекса. NBR и dNBR сохраняют высокую ценность для диагностики пирогенного воздействия. Ограничение возникает тогда, когда измеряемому ими спектральному свойству приписывается более широкий экологический смысл, чем позволяет физическая природа наблюдения.

Для сосновых лесов Тункинской котловины оптимальной является

иерархическая схема мониторинга. На первом уровне многолетний Landsat-ряд выявляет участки с различной формой траектории. На втором Sentinel-2 уточняет современную пространственную структуру неоднородных зон. На третьем полевые обследования концентрируются в местах, где дистанционные показатели указывают на замедление, плато либо подозрительно быстрое спектральное восстановление. Такой порядок сокращает объем наземных работ без отказа от их экологической содержательности.

Перспективным развитием методики станет подключение высотной информации. Воздушное или космическое лазерное сканирование позволяет оценивать вертикальную структуру, которую оптический индекс отображает лишь косвенно. Современный обзор бореального восстановления специально выделяет сочетание оптических временных рядов и лазерных данных как направление, способное сблизить дистанционную оценку с лесной структурой [2]. Для Тункинской котловины такой подход помог бы отделить высокий спектральный отклик низкорослого покрова от формирования полноценного древесного яруса.

Однако даже при появлении более совершенных сенсоров полевые наблюдения сохраняют свое значение. Видовой состав, жизненное состояние подроста и локальные следы повторного нарушения нельзя во всех случаях надежно вывести из спектральных данных.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что оценивать постпирогенное состояние сосновых лесов по факту возвращения одного спутникового индекса к исходному диапазону методологически недостаточно. Спектральная нормализация поверхности, восстановление вертикальной структуры древостоя и возвращение предпожарного породного состава принадлежат к разным сторонам сукцессионного процесса и способны существенно расходиться во времени. Для геоэкологической диагностики важно не устранять это расхождение усреднением, а использовать его как показатель изменившегося хода восстановления.

Материалы по Тункинской котловине дают особенно наглядный пример. После пожара 2010 г. NBR на части исследованных территорий приблизился к допожарным значениям, однако многолетние геоботанические наблюдения не подтвердили эквивалентного возвращения сообщества к состоянию ненарушенного соснового леса. Тем самым региональные данные согласуются с результатами современных исследований других бореальных территорий, где спектральное восстановление систематически опережает композиционное и структурное.

Сравнительный анализ опубликованных спутниковых и полевых исследований показывает необходимость многокомпонентной оценки постпирогенного восстановления сосновых лесов. Возвращение спектральных характеристик растительности к предпожарному диапазону может происходить быстрее восстановления породного состава и структуры древостоя. Для разграничения восстановительных траекторий предложено учитывать первоначальную тяжесть пожара, динамику NBR, состояние подроста, особенности почвенного покрова и повторные нарушения. В качестве методических временных характеристик определены показатели T_{80} и T_{90} с правилом подтверждения достижения порога в последовательных сопоставимых сезонах. Предложенная схема предназначена для применения к пространственно согласованным спутниковым и полевым данным.

Начальная тяжесть пожара и последующая восстановительная траектория должны анализироваться раздельно. dNBR рационально применять для стратификации территории непосредственно после нарушения, тогда как многолетний NBR позволяет прослеживать дальнейшее изменение поверхности. Надежность временного ряда повышается при наличии многолетней предпожарной линии, сопоставимых ненарушенных участков и единого фенологического окна. Без выполнения этих условий сезонное развитие растительности и межгодовая погода могут быть ошибочно истолкованы как ускорение либо замедление сукцессии.

В пространственном отношении гарь неоднородна. На время восстановления воздействуют не только интенсивность повреждения и число прошедших лет, но и площадь пирогенного пятна, его форма, удаленность от сохранившегося леса, водно-тепловой режим, почвенный субстрат и климат первых послепожарных сезонов. Поэтому средний срок для всего контура пожара обладает ограниченной диагностической ценностью. Более содержательно выделять локальные траектории и сопоставлять их с конкретными ландшафтными условиями.

Предложенная классификация из пяти траекторий позволяет отделить быстрое согласованное восстановление от случаев, когда высокий спутниковый сигнал маскирует недостаточное восстановление древесного яруса, а также выявить медленную сукцессию, стабилизацию на пониженном уровне и повторное нарушение. Такая типология удобна для тематического картографирования, поскольку переводит разрозненные временные значения индексов в экологически интерпретируемые классы состояния.

Практическая организация мониторинга должна строиться на сочетании масштабов. Landsat обеспечивает историческую глубину и сопоставимость многолетнего ряда; Sentinel-2 повышает детализацию современных границ; полевые площадки раскрывают состав и структуру растительного сообщества. Цифровая модель рельефа дополняется реальными почвенными и ландшафтными материалами, поскольку высота и экспозиция не могут служить заменой эдафической информации.

Геоэкологическая ценность разработанного подхода состоит в переходе от картографирования факта пожара к пространственной диагностике его долговременных последствий. Конечным объектом мониторинга становится не индекс и не отдельный древостой, а изменяющаяся лесная геосистема. Такой ракурс позволяет выделить территории, где естественная сукцессия сохраняет направление к исходному состоянию, отличить их от площадей с устойчиво измененной траекторией и обосновать дифференцированную частоту

наблюдений и природоохранных мероприятий.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно связывать с объединением длинных оптических рядов, данных о вертикальной структуре растительности и повторных полевых обследований. На этой основе возможно построение вероятностных карт времени восстановления, в которых учитываются как незавершенные к моменту наблюдения траектории, так и риск повторного пожара. Для территорий Южной Сибири с контрастными формами рельефа и растущей пирогенной нагрузкой подобные модели способны стать содержательной частью системы регионального геоэкологического мониторинга.

Список литературы

1. 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. 18. No. 4. P. 36–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3963.

2. White J. C. Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: contributions of optical time series and airborne laser scanning data // Silva Fennica. 2024. Vol. 58. No. 2. Article 23076. DOI: 10.14214/sf.23076.

3. Черкашина А. А., Силаев А. В. Комплексная оценка подверженности пожарам ландшафтов Тункинской котловины // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46. № 4. С. 45–58. DOI: 10.15372/GIPR20250405.

4. Bao S. G., Wang W. J., Liu Z., Zhang H. K., Wang L., Ma J., Sun H., Ba S., Wang Y., He H. S. Revealing post-megafire spectral and compositional recovery in the Siberian boreal forest using Landsat time series and regression-based unmixing approach // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 311. Article 114307. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114307.

5. Швецов Е. Г. Оценка послепожарной гибели лесов в Сибири по спутниковым данным и ее связь с характеристиками пожаров // Сибирский экологический журнал. 2024. Т. 31. № 4. С. 550–560. DOI: 10.15372/SEJ20240403.

6. Li K., Liu Z., Xu W. et al. Post-fire spectral recovery and driving factors across the boreal and temperate forests // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2025. Vol. 380. No. 1924. Article 20230453. DOI: 10.1098/rstb.2023.0453.

7. Воронин В. И., Гриценюк А. П., Сизых А. П., Осколков В. А. Современные тенденции восстановления лесов на гарях Западного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46. № 2. С. 115–123. DOI: 10.15372/GIPR20250211.

8. Lv Q., Chen Z., Wu C., Peñuelas J. et al. Increasing severity of large-scale fires prolongs recovery time of forests globally since 2001 // Nature Ecology & Evolution. 2025. Vol. 9. P. 980–992. DOI: 10.1038/s41559-025-02683-x.

9. Тимченко Н. А., Ткаченко К. Г., Юст Н. А., Щербакова О. Н. Постпирогенное восстановление лиственницы Гмелина в Амурской области // Сибирский лесной журнал. 2024. № 6. С. 68–77. DOI: 10.15372/SJFS20240609.

10. Liu T., Chen F., Yu B., Wang L., Gao M. Patch-based assessment of post-fire recovery after the 2003 Siberian wildfire // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 146. Article 105167. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105167.

11. Синюткина А. А., Гашкова Л. П. Оценка постпирогенной динамики растительности верхового болота (Западная Сибирь) на основе спутниковых данных Landsat // Региональные геосистемы. 2025. Т. 49. № 1. С. 112–127. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-112-127.

12. Smith-Tripp S. M., Coops N. C., Mulverhill C., White J. C., Axelson J. Landsat assessment of variable spectral recovery linked to post-fire forest structure in dry sub-boreal forests // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 208. P. 121–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.01.008.

13. Синюткина А. А., Гашкова Л. П., Харанжевская Ю. А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. Т. 79. № 1. С. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.

14. Smith-Tripp S., Coops N., Mulverhill C., White J., Gergel S. Post-fire structural forest recovery associated with climate extremes in dry sub-boreal forests // Landscape Ecology. 2026. Vol. 41. Article 14. DOI: 10.1007/s10980-025-02266-y.

15. Jones M. W., Veraverbeke S., Andela N., Doerr S. H., Kolden C. et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics // Science. 2024. Vol. 386. No. 6719. Article eadl5889. DOI: 10.1126/science.adl5889.

16. Xu H., Chen H. W., Chen D., Wang Y., Yue X. et al. Global patterns and drivers of post-fire vegetation productivity recovery // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 874–881. DOI: 10.1038/s41561-024-01520-3.

References

1. 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. 18. No. 4. P. 36–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3963.

2. White J. C. Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: contributions of optical time series and airborne laser scanning data // Silva Fennica. 2024. Vol. 58. No. 2. Article 23076. DOI: 10.14214/sf.23076.

3. Cherkashina A. A., Silaev A. V. Kompleksnaya ocenka podverzhennosti pozharam landshaftov Tunkinskoj kotloviny` // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2025. T. 46. № 4. S. 45–58. DOI: 10.15372/GIPR20250405.

4. Bao S. G., Wang W. J., Liu Z., Zhang H. K., Wang L., Ma J., Sun H., Ba S., Wang Y., He H. S. Revealing post-megafire spectral and compositional recovery in the Siberian boreal forest using Landsat time series and regression-based unmixing approach // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 311. Article 114307. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114307.

5. Shveczov E. G. Ocenka poslepozharnoj gibeli lesov v Sibiri po sputnikovy`m danny`m i ee svyaz` s xarakteristikami pozharov // Sibirskij e`kologicheskij zhurnal. 2024. T. 31. № 4. S. 550–560. DOI: 10.15372/SEJ20240403.

6. Li K., Liu Z., Xu W. et al. Post-fire spectral recovery and driving factors across the

boreal and temperate forests // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2025. Vol. 380. No. 1924. Article 20230453. DOI: 10.1098/rstb.2023.0453.

7. Voronin V. I., Gricenyuk A. P., Sizy`x A. P., Oskolkov V. A. Sovremenny`e tendencii vosstanovleniya lesov na garyax Zapadnogo Zabajkal`ya // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2025. T. 46. № 2. S. 115–123. DOI: 10.15372/GIPR20250211.

8. Lv Q., Chen Z., Wu C., Peñuelas J. et al. Increasing severity of large-scale fires prolongs recovery time of forests globally since 2001 // Nature Ecology & Evolution. 2025. Vol. 9. P. 980–992. DOI: 10.1038/s41559-025-02683-x.

9. Timchenko N. A., Tkachenko K. G., Yust N. A., Shherbakova O. N. Postpirogennoe vosstanovlenie listvennicy Gmelina v Amurskoj oblasti // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2024. № 6. S. 68–77. DOI: 10.15372/SJFS20240609.

10. Liu T., Chen F., Yu B., Wang L., Gao M. Patch-based assessment of post-fire recovery after the 2003 Siberian wildfire // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 146. Article 105167. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105167.

11. Sinyutkina A. A., Gashkova L. P. Ocenka postpirogennoj dinamiki rastitel`nosti verxovogo bolota (Zapadnaya Sibir`) na osnove sputnikovy`x danny`x Landsat // Regional`ny`e geosistemy`. 2025. T. 49. № 1. S. 112–127. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-112-127.

12. Smith-Tripp S. M., Coops N. C., Mulverhill C., White J. C., Axelson J. Landsat assessment of variable spectral recovery linked to post-fire forest structure in dry sub-boreal forests // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 208. P. 121–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.01.008.

13. Sinyutkina A. A., Gashkova L. P., Xaranzhevskaya Yu. A. Pirogennoe izmenenie bolotnoj rastitel`nosti i torfa v Zapadnoj Sibiri // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2024. T. 79. № 1. S. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.

14. Smith-Tripp S., Coops N., Mulverhill C., White J., Gergel S. Post-fire structural

forest recovery associated with climate extremes in dry sub-boreal forests // Landscape Ecology. 2026. Vol. 41. Article 14. DOI: 10.1007/s10980-025-02266-y.

15. Jones M. W., Veraverbeke S., Andela N., Doerr S. H., Kolden C. et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics // Science. 2024. Vol. 386. No. 6719. Article eadl5889. DOI: 10.1126/science.adl5889.

16. Xu H., Chen H. W., Chen D., Wang Y., Yue X. et al. Global patterns and drivers of post-fire vegetation productivity recovery // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 874–881. DOI: 10.1038/s41561-024-01520-3.

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 08.07.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 27.05.2026; approved after peer review 08.07.2026; accepted for publication 12.10.2026.