

Особенности послепожарной динамики спектральных признаков участков лиственничных древостоев мерзлотной зоны Сибири

Н. Д. Якимов^{1,3}, Е. И. Пономарёв^{2,1,3}, А. Н. Забродин^{1,3}, Т. В. Пономарёва^{2,3}

¹ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mails: nyakimov96@mail.ru, azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

² Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Обсуждаются характерные особенности послепожарной динамики спектральных признаков растительных покровов Сибири, произрастающих в условиях мерзлоты, которая подразделяется на четыре категории по степени сомкнутости. Исследование выполнено на основе анализа данных со спутников Landsat для серии пожаров (2016–2018) в лиственничных насаждениях с привязкой к вариантам мерзлоты. Представлены данные вариативности значений спектральных индексов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и LST (*англ.* Land Surface Temperature) при послепожарных сукцессиях с учётом начального уровня пожарного воздействия по индексу dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio). Наибольший уровень начального воздействия по спектральным признакам зафиксирован на участках в зоне распространения сплошной мерзлоты. Для выборки пожаров классифицировались уровни пожарного воздействия и динамика признаков в течение 5-летнего срока. Послепожарные значения NDVI относительно фона в виде аномалии Δ NDVI достигали в среднем не более ~28 % в условиях сплошной мерзлоты, 57 % — в условиях прерывистой мерзлоты, >69 % — при редкоостровной мерзлоте и ~50 % — на участках островной мерзлоты. Максимальный уровень послепожарных отклонений LST от фоновых значений в виде аномалии Δ LST снижался в ряду «сплошная — прерывистая — островная — редкоостровная мерзлота» от ~85, ~75, 68 до 64 % соответственно. Выявлены характерные сценарии динамики Δ NDVI и Δ LST в течение 5-летнего восстановительного послепожарного периода, различные для условий сплошной мерзлоты и участков в лесорастительных условиях прерывистой и островной мерзлоты. Достоверность аппроксимации в среднем составляла 0,35–0,63 для доверительного уровня 95 %. Зафиксированные в данной работе различия кривых динамики аномалии Δ NDVI и Δ LST согласуются с описанными в литературе характерными особенностями послепожарных сукцессий в лиственничниках с преобладанием лиственницы Гмелина (зона сплошной мерзлоты) и лиственницы сибирской с примесью темнохвойных пород (территории прерывистой мерзлоты).

Ключевые слова: криолитозона, Сибирь, лиственничники, Landsat, dNBR, NDVI, LST

Одобрена к печати: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-106-115

Введение

Для лесов Сибири характерны высокие показатели горимости, что обуславливает ежегодный переход около 1 % лесопокрытой территории в состояние послепожарной восстановительной сукцессии (Барталев, Стыценко, 2021; Ponomarev et al., 2022). Моделирование на основе современных климатических сценариев позволяет прогнозировать увеличение количества, площади, интенсивности пожарных событий в Сибири и, в частности, в криолитозоне (Hayasaka, 2022; Williams et al., 2023). При этом пожары в криолитозоне, с одной стороны, являются неотъемлемой частью процессов формирования и динамики экосистем, а с другой стороны, могут становиться причиной долговременных нарушений и неустойчивости экосистем. В первую очередь после пожаров фиксируется различная степень повреждения древостоев и почвенного покрова (Барталев, Стыценко, 2021; Лупян и др., 2022). Исследования, основанные на материалах спутниковой съёмки с применением спектральных индексов, позволяют получать количественные оценки степени пирогенной нарушен-

ности лесов, успешности восстановительного процесса древостоев и биоразнообразия (Krylov et al., 2014). Так как пожарное воздействие характеризуется изменениями влагосодержания в растениях, для оценки степени воздействия огня эффективно используется индекс NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) и его разность dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio) (Delcourt et al., 2021). Также хорошо известен индекс состояния растительности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), который, однако, имеет низкую эффективность для оценки восстановления древостоев на длительных сроках, особенно в условиях относительно быстрого восстановления состояния (но не запасов) напочвенной фитомассы, мохово-лишайникового покрова и травяно-кустарничкового яруса (Иванова и др., 2018; Ponomarev et al., 2020). Кроме того, послепожарные повреждения растительного покрова следует также рассматривать с точки зрения снижения отражательной способности поверхности (альбедо) и изменения теплоизоляционных свойств подстилки. Так, на послепожарных участках фиксируются долговременные изменения температуры поверхности относительно одинаковых по лесорастительным условиям фоновых участков (Абаимов и др., 1997; Yakimov et al., 2021). Такой дешифровочный признак успешно анализируется с использованием индекса LST (*англ.* Land Surface Temperature).

В этой связи самостоятельный интерес представляет изучение послепожарной динамики спектральных признаков растительных покровов в условиях выделяемых вариантов степени сомкнутости мерзлоты, характерных для территории Сибири (Brown et al., 2002): сплошная (*англ.* continuous), прерывистая (*англ.* discontinuous), островная (*англ.* sporadic) и редкоостровная (*англ.* isolated patch) мерзлота. Актуализация таких исследований в криолитозоне Сибири, где труднодоступность обширных территорий затрудняет проведение полевых исследований, имеет особое значение для адаптированного мониторинга и прогнозирования состояния и растительного покрова, и других компонентов экосистем, таких как напочвенный покров и почвы.

В работе рассмотрены следующие аспекты: 1) изменение спектральных признаков послепожарных участков для четырёх вариантов степени сомкнутости мерзлоты на территории Сибири; 2) диапазоны спектральных индексов при различных уровнях начального воздействия пожаров по индексу dNBR; 3) скорость восстановления аномалий индексов Δ NDVI и Δ LST при послепожарной сукцессии в условиях вариантов сомкнутости мерзлотных слоёв.

Район исследований и исходные данные

Работа выполнена для территории средней Сибири (55–70° с.ш., 90–125° в.д.), большая часть которой относится к зоне многолетней мерзлоты с выделением четырёх вариантов степени сомкнутости (Brown et al., 2002). В зоне сплошного распространения мерзлоты мерзлотные слои занимают >90 % площади; в зоне прерывистой мерзлоты доля их распространения составляет от 50 до 90 % площади; островная имеет проявления мерзлоты на менее чем 10 % площади; редкоостровная — территория с изолированными остаточными проявлениями мерзлоты (*рис. 1*, см. с. 108).

Мерзлота и её сезонная вариативность является одним из важнейших факторов, определяющих условия лесопроизрастания. Глубина протаивания деятельного горизонта мерзлотных почв в зависимости от состава подстилающих пород, мощности и состояния напочвенного покрова, влагонасыщенности почвы варьирует от 15–40 см на торфяных отложениях, до 80 см на глинах и может быть существенно больше (до 200 см) только на супесях и песках (Средняя..., 1964). В этих условиях на большей части территории криолитозоны доминируют древостои лиственницы (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*), лиственничные редколесья и мохово-лишайниковый живой напочвенный покров. Степень сомкнутости мерзлотных слоёв и малая мощность сезонно-талого слоя на рассматриваемой территории определяют горизонтальное развитие корневой системы древостоев, высокую корневую конкуренцию и изреженность древесного полога (Абаимов и др., 1997).

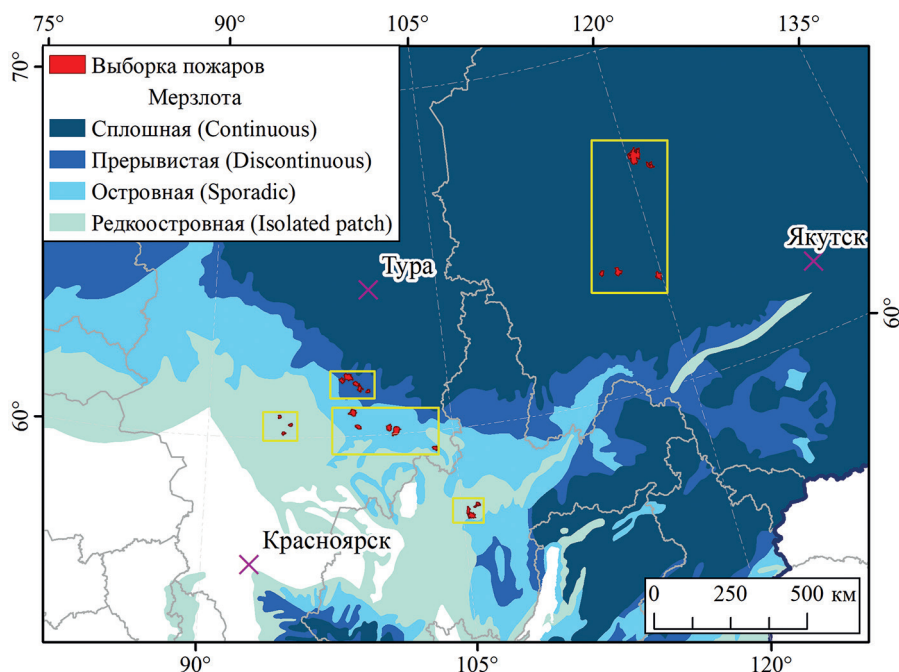


Рис. 1. Категории сомкнутости мерзлоты на территории средней Сибири по материалам открытого каталога NSIDC (англ. National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/data/ggd318>). Прямоугольники — области выборки пожаров, красные полигоны — пожары по данным дистанционного зондирования

Предварительный анализ и пространственная привязка пожаров выполнены на основе базы данных «Пожарное воздействие в криолитозоне Сибири за период 1996–2023 гг.», содержащей сведения о масштабах пожарного воздействия в зоне многолетней мерзлоты Сибири (Пономарёв, Пономарёва, 2024).

Выборка послепожарных участков на территории Сибири для четырёх вариантов степени сомкнутости мерзлотных пород

| Сомкнутость | Количество участков | Преобладающий древостой (количество пожаров) | Годы пожаров | Площадь участков, км ² |
|----------------|---------------------|---|--------------|-----------------------------------|
| Сплошная | 5 | <i>Larix sibirica</i> , <i>Sparse larch</i> (1), <i>Larix sibirica</i> / <i>L. gmelinii</i> (4) | 2018 | 2476 |
| Прерывистая | | <i>Larix sibirica</i> / <i>L. gmelinii</i> (5) | 2016 | 1192 |
| Редкоостровная | | <i>Larix sibirica</i> , <i>Abies sibirica</i> (1), <i>Larix sibirica</i> (1), <i>Abies sibirica</i> (1), <i>Pinus sibirica</i> (2) | 2016–2018 | 1050 |
| Островная | | <i>Larix sibirica</i> (5) | 2016 | 1541 |

В качестве исходных данных для изучения спектральных характеристик нарушенных лесных участков использовали материалы среднего пространственного разрешения Landsat-8, -9 OLI (англ. Operational Land Imager)/TIRS (англ. Thermal Infrared Sensor) (разрешение 30/100 м) за вегетационные периоды 2016–2023 гг. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Отобранная коллекция составила более 100 спутниковых снимков, полученных по данным 4-го, 5-го, 7-го и 10-го спектральных каналов Landsat-8, -9 за 5–8-летний послепожарный период. Рассмотрено 20 послепожарных участков общей площадью 6 тыс. км². Обработанная выборка пожаров (см. рис. 1) преимущественно представлена участками лиственничников с включениями темнохвойных и сосновых насаждений. Соотношение доминирующих древостоев выборки было следующим: 80 % от всей площади участков — лиственничные леса (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*), до 20 % площади участков приходилось на лиственничные ред-

колосья (*Sparse larch*), ель (*Abies sibirica*) и сосну сибирскую (кедр) (*Pinus sibirica*) (таблица). Контроль растительного покрова, в частности преобладающих древесных насаждений, проводился по материалам сервиса «Вега-Pro» (ИКИ РАН, Москва, <http://pro-vega.ru/maps/>) (Лупян и др., 2022).

На территории каждого типа мерзлоты было выбрано по пять послепожарных полигонов за период 2016–2018 гг. Объём выборки анализируемых полигонов лимитировался информативностью данных Landsat-8, -9 OLI/TIRS без привлечения материалов других спутников с целью унификации шкалы спектральных диапазонов.

Методы исследования

Классификация послепожарных участков внутри границ полигонов пожаров по уровню начального воздействия выполнялась с использованием порогового метода по значениям разностного нормализованного индекса гари dNBR, вычисляемого стандартными методами (Cocke et al., 2005). Выделяли четыре класса пожарного воздействия по верифицированным пороговым значениям dNBR: 1-й класс — негоревшие/незначительное повреждение ($dNBR < 0,099$), 2-й класс — низкий уровень пожарного воздействия ($dNBR = 0,1...0,439$), 3-й класс — средний уровень ($dNBR = 0,44...0,659$) и 4-й класс — высокий уровень ($dNBR > 0,66$) (Delcourt et al., 2021).

На следующем этапе были восстановлены ряды значений спектральных индексов NDVI и LST поверхности по более 100 спутниковым снимкам за период 5–8 лет после каждого рассмотренного пожарного события с регулярностью не реже 1 мес в течение вегетационного периода.

Расчёт индекса NDVI выполнялся по стандартной методике (Rouse et al., 1973) с использованием значений спектральной яркости в диапазонах длин волн: $\lambda = 0,63...0,68$ мкм (канал #B4, RED) и $\lambda = 0,85...0,89$ мкм (канал #B5, NIR (англ. near infrared)). Уровень аномальности индекса относительно фона определяли по соотношению:

$$\Delta NDVI = \frac{NDVI_{ц}}{NDVI_{ф}} \times 100\%,$$

где $NDVI_{ф}$ — усреднение попиксельных значений NDVI для фоновой растительности вокруг полигона пожара; $NDVI_{ц}$ — усреднённое значение NDVI для полигона пожара.

Вычисление индекса LST выполняли по данным теплового канала: $\lambda = 10,30...11,30$ мкм (канал #B10, TIR (англ. thermal infrared)) (Jiménez-Muñoz, Sobrino, 2003). После чего оценивался контроль уровня аномалии (ΔLST):

$$\Delta LST = \frac{LST_{ц} - LST_{ф}}{LST_{ф}} \times 100\%,$$

где $LST_{ф}$ — усреднение попиксельных значений LST для фонового состояния растительности вокруг полигона пожара; $LST_{ц}$ — усреднённое значение LST для полигона пожара с учётом принадлежности к классу dNBR.

Таким образом, аномалии теплового поля на нарушенных участках рассматривались как превышение температуры поверхности на послепожарных участках с разной степенью начального воздействия по сравнению с характерными фоновыми значениями индекса $LST_{ф}$ отдельно для каждого варианта распространения мерзлоты. Усреднение ΔLST для каждого класса dNBR выполнялось по 1–5 послепожарным участкам за 5–8-летний период. Усреднение значений $\Delta NDVI$ осуществлялось для пожара в каждом из характерных вариантов сомкнутости мерзлоты.

Полученные наборы данных были использованы для построения кривых, аппроксимирующих динамику снижения уровня аномальности рассматриваемых признаков. Достоверность аппроксимации контролировали на основе показателя R^2 для уровня значимости $\alpha = 0,05$ (доверительный уровень 95 %) стандартными процедурами продукта MS Excel.

Результаты и обсуждение

На послепожарных участках в различных условиях произрастания, определяемых степенью сомкнутости мерзлоты, зафиксированы значимые отличия 5-летней динамики индекса dNBR, что характеризует процесс восстановления напочвенного покрова и, косвенно, состояние древостоя. Так, в зоне сплошной мерзлоты, при начальном преобладании классов среднего и высокого пожарного воздействия (28 и 26 % соответственно), после пяти лет до 98 % полигона пожара было отнесено к классу незначительной нарушенности в терминах dNBR. В зоне прерывистого распространения мерзлоты в 5-летний срок к условно восстановившейся территории было отнесено до 52 % послепожарного участка при преобладании на начальной фазе классов низкого (51 %) и среднего (28 %) уровня пожарного воздействия. В условиях редкоостровной мерзлоты по индексу dNBR фиксировалось восстановление на площади около 39 %. В лесорастительных условиях островной мерзлоты — на 69 % постпожарной территории. Для выборки пожаров двух последних категорий был преимущественно характерен низкий/средний начальный уровень пожарного воздействия (76 % площади участков соответственно).

Абсолютные значения NDVI на территории после пожаров варьировали в диапазоне: 0,30 — в условиях сплошной мерзлоты; 0,50 — в древостоях прерывистой мерзлоты; 0,48–0,53 — в лесорастительных условиях редкоостровной и островной мерзлоты при средних значениях фонового уровня $NDVI_{\phi} = 0,51...0,61$. Таким образом, послепожарные аномальные значения $\Delta NDVI$ достигали не более ~28 % от фонового уровня в условиях сплошной мерзлоты, 57 % — для прерывистой, >69 % — при редкоостровной и ~50 % — на участках островной.

Временная динамика выравнивания аномалий $\Delta NDVI$ при разном уровне начальной нарушенности по dNBR также различается для лесорастительных условий выделяемых вариантов сомкнутости мерзлотных пород (рис. 2). Аппроксимация выполнена семейством логарифмических функций. Достоверность выбранной функции составила не ниже $R^2 = 0,63$ при значимости $\alpha = 0,05$.

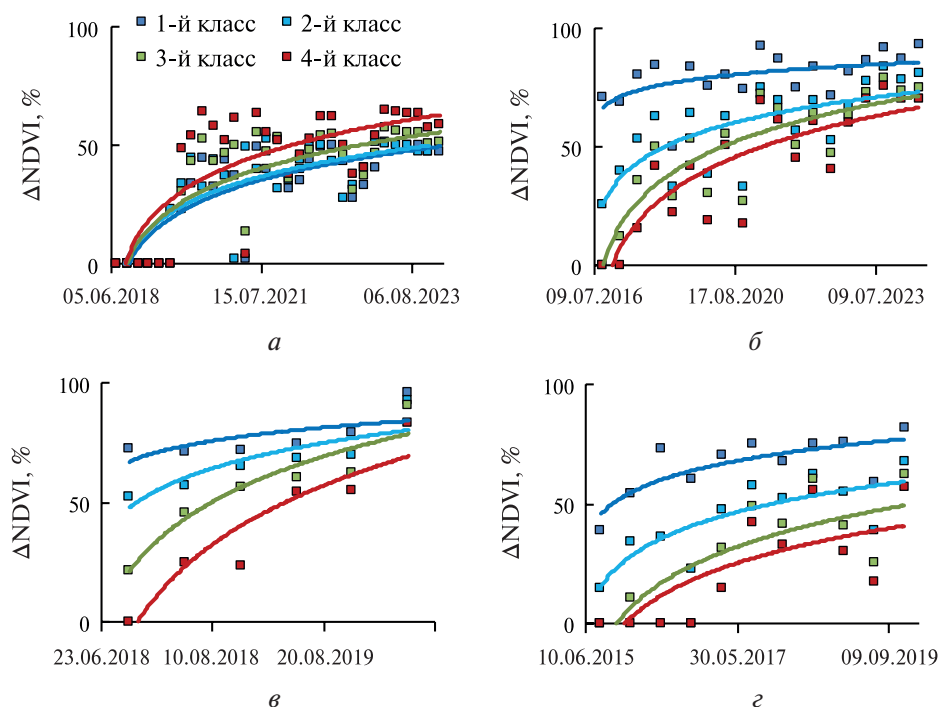


Рис. 2. Аппроксимация многолетней динамики $\Delta NDVI$ с привязкой к классам пожарного воздействия (по dNBR) на послепожарных участках в условиях четырёх категорий мерзлоты: а — сплошная; б — прерывистая; в — редкоостровная; г — островная

Можно выделить три характерных сценария динамики ΔNDVI . Во-первых, для условий сплошной мерзлоты при высокой степени зашумлённости данных показательным является превышение скорости восстановления аномалии при наибольшем уровне начального воздействия (см. *рис. 2а*, кривая для 4-го класса). В вариантах лесорастительных условий прерывистой и редкоостровной мерзлоты семейства графиков имеют подобный вид, скорость восстановления ΔNDVI зависит от уровня начального пожарного воздействия, а в насыщении за 5-летний срок диапазон значений ΔNDVI сужается до ~60–70 % от фоновых. В третьем варианте, характерном для территории с островной мерзлотой, значительная разница ΔNDVI сохранялась в течение всего рассмотренного периода послепожарной сукцессии (см. *рис. 2г*), а уровень аномальных значений остаётся не выше 50 % от фона для слабого, среднего и сильного начального пожарного воздействия.

Максимальный уровень аномалии ΔLST непосредственно после пожарного воздействия зафиксирован для сплошной мерзлоты — ~85 %, для остальных зон значения снижались: в условиях прерывистой (~75 %), островной (68 %) и редкоостровной (64 %). При этом в условиях распространения сплошной мерзлоты скорость уменьшения аномалии ΔLST была минимальна, а зафиксированные уровни начальной аномалии сохранялись на протяжении 5-летнего срока наблюдений (*рис. 3а*). Наиболее эффективно процесс снижения аномалии ΔLST протекает в условиях редкоостровной мерзлоты (см. *рис. 3в*).

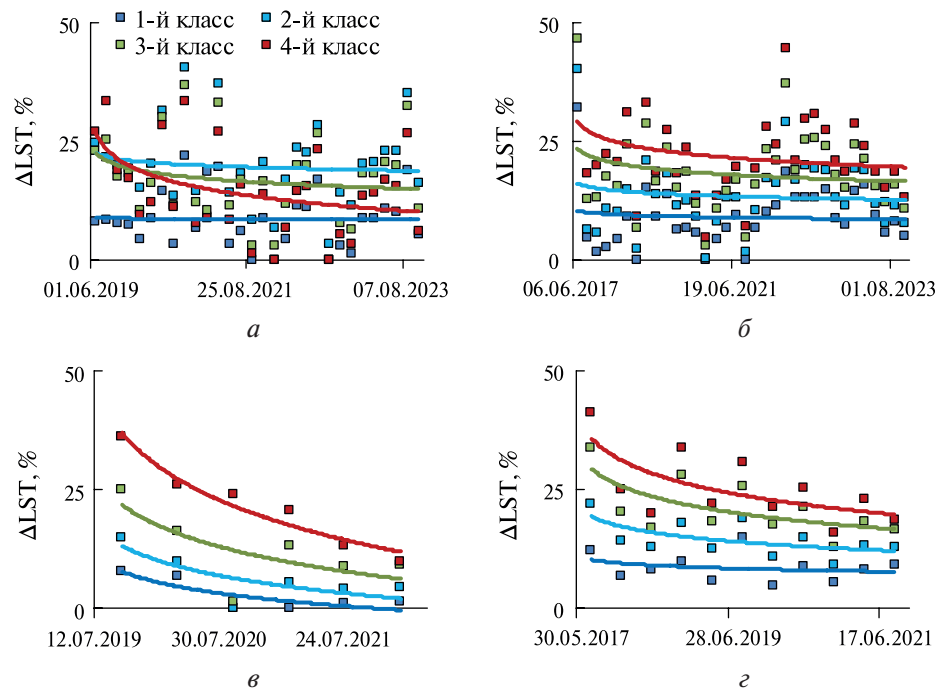


Рис. 3. Динамика изменения уровня аномалии ΔLST на послепожарных участках с учётом классов $d\text{NBR}$ в условиях четырёх вариантов распространения мерзлоты: *а* — сплошная; *б* — прерывистая; *в* — редкоостровная; *г* — островная

При низком начальном пожарном воздействии остаточный уровень ΔLST к пятому году сукцессии не превышает естественную флуктуацию фоновых значений более чем на 5–8 % (см. *рис. 3*), в то время как участки, испытавшие наиболее значительный пожарный эффект, сохраняют существенный ($9,2 \pm 1,9$ % для низкого уровня воздействия огня и $19,5 \pm 6,1$ % для высокого — с максимумами, достигающими 35 %) уровень аномалии ΔLST .

На трендах ΔLST (с достоверностью $R^2 = 0,35$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$) для пост-пожарных участков прерывистой, редкоостровной и островной мерзлоты наблюдается чёткая дифференциация кривых в течение 5-летнего срока, соответствующих уровню начального пожарного воздействия. В то же время на участках в условиях сплошной мерзлоты похожая

динамика характерна только для класса наибольшего пожарного воздействия (см. рис. 3а, красная кривая), а для остальных — низкая скорость выравнивания и сохранение высокого уровня аномалии ΔLST .

В рассмотренных условиях доминируют древостой лиственницы (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) и лиственничные редколесья с присутствием мохово-лишайникового живого напочвенного покрова. Ранее отмечено, что в насаждениях лиственницы сибирской, а также в смешанных древостоях с примесью темнохвойных и берёзы послепожарное возобновление, как правило, сопровождается сменой коренных сообществ на березняки (Абаимов и др., 1997). При этом для участков с доминированием лиственницы Гмелина (в условиях сплошной мерзлоты) послепожарная смена породы не характерна вследствие особенностей плодоношения и отсутствия конкурентов (Средняя..., 1964). Относительно успешное послепожарное восстановление лиственничников (*L. gmelinii*) в этих условиях определяет и, как правило, высокая степень сохранности коренного древостоя — от 20 до 80 % деревьев допожарной генерации (Абаимов и др., 1997). При этом формирование допожарных условий, в том числе восстановление мохово-лишайникового покрова, подъём горизонта многолетней мерзлоты и мощности сезонно-талого слоя, замещение пирогенных березняков коренными лиственничными (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) насаждениями, требует не менее 50–60 лет (Абаимов, Sofronov, 1996). Регистрируемые в натуральных условиях (Прокушкин и др., 2011; Kirdeyanov et al., 2020), косвенно, эти сценарии подтверждаются данными долговременного анализа послепожарных участков на материалах спутникового мониторинга с привлечением спектральных индексов (Ponomarev et al., 2020). В частности, зафиксированные в данной работе различия кривых динамики аномалии $\Delta NDVI$ (см. рис. 2) и ΔLST (см. рис. 3), по нашему мнению, согласуются с описанными в литературе характерными особенностями послепожарных сукцессий в лиственничниках с преобладанием лиственницы Гмелина (зона сплошной мерзлоты) и лиственницы сибирской с примесью темнохвойных пород (территории прерывистой мерзлоты).

Заключение

Послепожарная динамика рассмотренных спектральных индексов может быть аппроксимирована семейством логарифмических функций, которые отражают как начальные условия (уровень пожарного воздействия), так и внешние — различия лесорастительных условий для вариантов распространения мерзлоты. Достоверность выбранных наборов функции в нашем случае составляла не ниже $R^2 = 0,63$ для признака $\Delta NDVI$ и не меньше $R^2 = 0,35$ для тепловой аномалии по ΔLST при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Показательно, что сценарии динамики аномалии $\Delta NDVI$ и ΔLST значительно меняются при переходе от условий распространения сплошной мерзлоты к территории прерывистой и островной. Можно предполагать, что в этом проявляются особенности послепожарных сукцессий в лиственничных редколесьях севера с преобладанием лиственницы Гмелина и в зоне доминирования лиственницы сибирской с примесью темнохвойных пород, что может быть обозначено дополнительным признаком при решении с использованием спутниковой съёмки данного класса задач.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007/>, Красноярского краевого фонда науки. Спутниковые данные обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН в рамках государственного задания № FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН) и FWES-2024-0027 (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Литература

1. *Абаимов А. П., Бондарев А. И., Зырянова О. А. и др.* Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск: Наука, 1997. 208 с.
2. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // *Лесоведение*. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/80024114821020029.
3. *Иванова Г. А., Жила С. В., Иванов В. А. и др.* Постпирогенная трансформация основных компонентов сосняков средней Сибири // *Сибирский лесной журн.* 2018. Т. 5. № 3. С. 30–41. DOI: 10.15372/SJFS20180304.
4. *Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
5. *Пономарёв Е. И., Пономарёва Т. В.* Пожарное воздействие в криолитозоне Сибири за период 1996–2023 гг. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2024623184. Рег. 18.07.2024. Бюл. № 7.
6. *Прокушкин С. Г., Богданов В. В., Прокушкин А. С. и др.* Послепожарное восстановление органического вещества в напочвенном покрове лиственничников криолитозоны центральной Эвенкии // *Изв. РАН. Сер. биол.* 2011. № 2. С. 227–234.
7. *Средняя Сибирь* / отв. ред. Л. Г. Каманин, Б. Н. Лиханов. М.: Наука, 1964. 480 с.
8. *Abaimov A. P., Sofronov M. A.* The main trends of post-fire succession in near-tundra forests of central Siberia // *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 372–386.
9. *Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E.* Circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions, version 2. Boulder, CO, USA: National Snow and Ice Data Center. Digital Media, 2002. DOI: 10.7265/skbg-kf16.
10. *Cocke A. E., Fule P. Z., Crouse J. E.* Comparison of burn severity assessment using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data // *Intern. J. Wildland Fire*. 2005. V. 14. P. 189–198. DOI: 14.10.1071/WF04010.
11. *Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B. et al.* Evaluating the differenced Normalized Burn Ratio for assessing fire severity using Sentinel-2 imagery in Northeast Siberian larch forests // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Iss. 12. Article 2311. DOI: 10.3390/rs13122311.
12. *Hayasaka H.* Fire weather conditions in boreal and polar regions in 2002–2021 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. Iss. 7. Article 1117. DOI: 10.3390/atmos13071117.
13. *Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A.* A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. Iss. D22. Article D08112. DOI: 10.1029/2003JD003480.
14. *Kirdyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R. et al.* Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15. No. 3. Article 034061. 11 p. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
15. *Krylov A., McCarty J. L., Potapov P. et al.* Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. No. 10. Article 105007. 8 p. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
16. *Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y. et al.* The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // *Forests*. 2020. V. 11. Iss. 8. Article 790. DOI: 10.3390/f11080790.
17. *Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T.* Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index // *Fire*. 2022. V. 5. Iss. 1. Article 19. DOI: 10.3390/fire5010019.
18. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite) // *Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite Symp.* 1973. V. SP-351. P. 309–317.
19. *Williams N. G., Lucash M. S., Ouellette M. R. et al.* Simulating dynamic fire regime and vegetation change in a warming Siberia // *Fire Ecology*. 2023. V. 19. Article 33. DOI: 10.1186/s42408-023-00188-1.
20. *Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V.* Satellite monitoring of the state and dynamics of disturbed natural and technogenic landscapes in Siberia // *CEUR Workshop Proc.* 2021. V. 3006. P. 585–593. DOI: 10.25743/SDM.2021.16.35.070.

The features of post-fire dynamics of spectral characteristics of larch stands in the permafrost zone of Siberia

N. D. Yakimov^{1,3}, E. I. Ponomarev^{2,1,3}, A. N. Zabrodin^{1,3}, T. V. Ponomareva^{2,3}

¹ Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mails: nyakimov96@mail.ru, azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

² Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

The paper discusses the post-fire dynamics of spectral characteristics of Siberian vegetation growing in permafrost conditions which are divided into four variants according to the degree of closure. The study was conducted based on the analysis of data obtained from Landsat satellites for a series of fires (2016–2018) in an area dominated by larch stands, with reference to permafrost variants. The work presents data on the variability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values and Land Surface Temperature (LST) spectral indices in post-fire successions, taking into account the initial level of fire exposure according to the Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) index. Based on spectral characteristics, the highest level of initial fire exposure was observed in territories situated within the continuous permafrost zone. For a sample of fires, levels of fire exposure and the dynamics of spectral features were classified over a 5-year period. Post-fire abnormal values of Δ NDVI were no higher than ~28 % of the background level in conditions of continuous permafrost, 57 % in discontinuous permafrost, >69 % in sporadic permafrost, and ~50 % in areas with isolated patches of permafrost. The maximum level of thermal anomalies according to Δ LST recorded right after fire exposure decreased across the continuous–discontinuous–sporadic–isolated patches permafrost variants ~85 to ~75, 68, and 64 %, respectively. Characteristic scenarios of the Δ NDVI and Δ LST dynamics during the 5-year post-fire recovery were identified, which were different for the zone of continuous permafrost and forest-growing areas in conditions of discontinuous and sporadic permafrost. The average accuracy of the approximation ranged from 0.35 to 0.63, with a significance level of 95 %. The differences in the dynamic curves of the Δ NDVI and Δ LST anomalies recorded in this study are consistent with the characteristic features of post-fire successions described in the literature for larch forests with a predominance of Gmelin larch (continuous permafrost zone) and Siberian larch mixed with dark coniferous species (territories of discontinuous permafrost).

Keywords: cryolithozone, Siberia, larch forests, NDVI, LST, dNBR

Accepted: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-106-115

References

1. Abaimov A. P., Bondarev A. I., Zyryanova O. A., *Lesa Krasnoyarskogo Zapolyar'ya* (Polar forests of Krasnoyarsk region), Novosibirsk: Science, 1997, 208 p. (in Russian).
2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., An assessment of the forest stands destruction by fires based on the remote sensing data on a seasonal distribution of burnt areas, *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, V. 14, No. 7, pp. 711–716, DOI: 10.1134/S1995425521070027.
3. Ivanova G. A., Zhila S. V., Ivanov V. A. et al., Post-fire transformation of basic components of pine forests in central Siberia, *Siberian J. Forest Science*, 2018, V. 5, No. 3, pp. 30–41 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20180304.
4. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
5. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., *Pozharnoe vozdeistvie v kriolitozone Sibiri za period 1996–2023 gg.* (Fire impact in the cryolithozone of Siberia for the period 1996–2023), Certificate of state registration of database No. 2024623184 (RU), Reg. 18.07.2024, Bull. 7 (in Russian).
6. Prokushkin S. G., Bogdanov V. V., Prokushkin A. S. et al., Post-fire restoration of organic substance in the ground cover of the larch forests in permafrost zone of Central Evenkia, *Proc. Russian Academy of Sciences. Series Biological*, 2011, No. 2, pp. 227–234 (in Russian).

7. *Srednyaya Sibir'* (Central Siberia), L. G. Kamanin, B. N. Likhanov (eds.), Moscow: Science, 1964, 480 p. (in Russian).
8. Abaimov A. P., Sofronov M. A., The main trends of post-fire succession in near-tundra forests of central Siberia, In: *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*, Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 372–386.
9. Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E., *Circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions, version 2*, Boulder, CO, USA: National Snow and Ice Data Center, Digital Media, 2002, DOI: 10.7265/skbg-kf16.
10. Cocke A. E., Fule P. Z., Crouse J. E., Comparison of burn severity assessment using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data, *Intern. J. Wildland Fire*, 2005, V. 14, pp. 189–198, DOI: 14.10.1071/WF04010.
11. Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B. et al., Evaluating the differenced Normalized Burn Ratio for assessing fire severity using Sentinel-2 imagery in Northeast Siberian larch forests, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 12, Article 2311, DOI: 10.3390/rs13122311.
12. Hayasaka H., Fire weather conditions in boreal and polar regions in 2002–2021, *Atmosphere*, 2022, V. 13, Iss. 7, Article 1117, DOI: 10.3390/atmos13071117.
13. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *J. Geophysical Research*, 2003, V. 108, Iss. D22, Article D08112, DOI: 10.1029/2003JD003480.
14. Kirilyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R. et al., Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2020, V. 15, No. 3, Article 034061, 11 p., DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
15. Krylov A., McCarty J. L., Potapov P. et al., Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011, *Environmental Research Letters*, 2014, V. 9, No. 10, Article 105007, 8 p., DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
16. Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y. et al., The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia, *Forests*, 2020, V. 11, Iss. 8, Article 790, DOI: 10.3390/f11080790.
17. Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T., Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index, *Fire*, 2022, V. 5, Iss. 1, Article 19, DOI: 10.3390/fire5010019.
18. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite), *Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite Symp.*, 1973, V. SP-351, pp. 309–317.
19. Williams N. G., Lucash M. S., Ouellette M. R. et al., Simulating dynamic fire regime and vegetation change in a warming Siberia, *Fire Ecology*, 2023, V. 19, Article 33, DOI: 10.1186/s42408-023-00188-1.
20. Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Satellite monitoring of the state and dynamics of disturbed natural and technogenic landscapes in Siberia, *CEUR Workshop Proc.*, 2021, V. 3006, pp. 585–593, DOI: 10.25743/SDM.2021.16.35.070.