

Возможности использования вегетационных индексов для оценки постпирогенной сукцессии растительного покрова

Л. В. Бродт, Н. В. Приходько, А. В. Соромотин

Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Россия

E-mail: l.v.brodt@utmn.ru

Рассматриваются возможности использования нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и индекса горимости NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) для оценки постпирогенной сукцессии растительного покрова в арктической зоне Ямало-Ненецкого автономного округа. Методология исследования включала геоботанические полевые исследования и анализ мультиспектральных спутниковых снимков Landsat-5 TM (*англ.* Thematic Mapper), Landsat-7 ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8 OLI (*англ.* Operational Land Imager), TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor) за период 1990–2023 гг. В результате анализа медиальных значений индекса NDVI на гари и фоне за каждый год нами были выделены три периода в постпирогенной сукцессии растительного покрова: реабилитация (первые 6 лет), прогрессия (6–18 лет) и устойчивое развитие (после 18 лет). В результате полевых исследований было установлено, что в постпирогенный период происходит изменение структуры растительного покрова, что достоверно показывает NDVI. Индекс NBR, в свою очередь, не отражает восстановление растительности, в связи с чем его использование возможно для идентификации границ гарей спустя длительный период после пожара. Методика оценки постпирогенной динамики растительного покрова с использованием спутниковых данных может быть применима для мониторинга арктических экосистем и прогнозирования их восстановления после пожаров, что подтверждено результатами полевых исследований.

Ключевые слова: NDVI, NBR, растительность, Landsat, вегетационные индексы, лесотундра, Западная Сибирь, пожар, сукцессия

Одобрена к печати: 01.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-167-177

Введение

Природные пожары в Арктике оказывают значительное воздействие на состав растительного покрова и состояние многолетнемерзлых пород, а также являются важным экологическим фактором (Gaglioti et al., 2021; Racine et al., 2004), определяющим круговорот питательных веществ (Wookey et al., 2009) и динамику сезонно-талого слоя (Heim et al., 2021; Schur, Jorgenson, 2007). Если пожары в таёжных лесах Евразии — постоянные спутники и причины сукцессий, то в большей части тундры пожары практически отсутствовали со времён раннего голоцена (Higuera et al., 2008).

В настоящее время одним из перспективных методов долговременного мониторинга и оценки постпирогенных изменений растительности представляется использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем с последующим расчётом вегетационных индексов, в том числе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и индекса горимости NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) (Токарева и др., 2021; Якимов и др., 2025; Zhao et al., 2023). В качестве данных ДЗЗ выбирают космоснимки Landsat, NOAA AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer), MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), SPOT (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre) и др. (Шабанов и др., 2018; Forгани et al., 2021; Sizov et al., 2021; Telesca, Lasaponara, 2006).

Объектами ранее проведённых исследований состояния растительного покрова в большинстве случаев выступали лесные и сельскохозяйственные экосистемы (Барталев и др.,

2017; Ершов и др., 2024; Кирсанов, Комаров, 2024; Степанов и др., 2025; Тарасова и др., 2024; Шпанев, Русаков, 2024; Cuevas-González et al., 2009). Было установлено, что вегетационные индексы способны выявить различия в структуре земель (Иванов, Гафуров, 2025), установить зависимость состояния растительности от климатических факторов (Московченко и др., 2020; Шарый, Шарая, 2025), изучить влажность напочвенного растительного покрова тундровой зоны Арктики (Корниенко, Елсаков, 2024). Динамика кустарничково-мохово-лишайникового покрова в результате воздействия пожара в Западной Сибири изучена в единичных работах (Московченко и др., 2020; Heim et al., 2021; Reitze et al., 2025; Sizov et al., 2021). При этом на территории севера Западной Сибири за 60-летний период сгорело 40 % территории (Sizov et al., 2021). Возрастание антропогенного воздействия в результате освоения нефтегазовых месторождений также повышает частоту пожаров в регионе (Московченко, Московченко, 2018; Sizov et al., 2021). Таким образом, изучение закономерностей трансформации растительного покрова в постпирогенный период в условиях криолитозоны Западной Сибири становится актуальным. В связи с чем нами была проведена оценка постпирогенной динамики растительного покрова на территории гари 1990 г., расположенной в лесотундровой зоне Западной Сибири, с использованием данных ДЗЗ.

Цель нашего исследования — проведение оценки применимости вегетационных индексов для анализа изменений растительного покрова в результате пирогенного воздействия в лесотундре Западной Сибири. Для этого мы решали следующие задачи: 1) подбор и предварительная коррекция космоснимков; 2) расчёт вегетационных индексов NDVI и NBR; 3) проведение сравнительной оценки значений вегетационных индексов в течение срока наблюдений; 4) проведение полевых исследований.

Рабочей гипотезой исследования выступает предположение, что вегетационный индекс NDVI может служить индикатором изменения структуры растительного покрова при вторичных сукцессиях после прекращения действия какого-либо деструктивного фактора, в частности ландшафтных пожаров.

Объект и методы исследования

Для оценки постпирогенной сукцессии растительного покрова был подобран типичный участок лиственничных редколесий среди кочковатых кустарничково-лишайниковых тундр площадью более 13,5 га, подвергшийся пожару в июле 1990 г. Выбор данного участка обусловлен транспортной доступностью (находится в 4 км от дороги), длительным периодом восстановления после пожара (более 30 лет), отсутствием явного антропогенного воздействия и наличием полевых исследований, проведённых нами в 2018 и 2022 гг. (рис. 1, см. с. 169).

Согласно физико-географическому районированию Тюменской области участок исследования расположен в лесотундровой широтно-зональной зоне, в Нижнетаёзовской провинции (Физико-географическое..., 1973); согласно геоботаническому районированию — в тундровой зоне, субарктической подзоне, Гыданской провинции (Сочава, 1967, 1979). Территория характеризуется полигональным рельефом террас, плоско и выпукло-бугристыми торфяниками (Королева, 2022; Хомутов и др., 2019). В период с 1990 по 2023 г. среднегодовая температура воздуха составляла $-7,3^{\circ}\text{C}$, средняя температура января равна $-25,4^{\circ}\text{C}$, июля — $14,7^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков в августе достигало 60 мм, в феврале — 23 мм (по данным <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/23256.htm>). Для данной территории типичными являются ерниковые и ивняково-ерниковые с лишайниково-моховым покровом, часто чередующиеся с группами лиственничных редколесий бугорковатые тундры (*Larix sibirica*, *Betula nana*, *Salix sibirica*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, *Empetrum nigrum*, *Cladonia rangiferina*, *Cl. Stellaris*, *Cetraria cucullate*) (Ильина и др., 1985). Ранее было установлено, что величина межпожарного интервала в редкостойных лиственничниках района исследования в среднем составила около 30 лет (Московченко и др., 2020).

В июле 2018 г. были проведены полевые исследования растительного покрова. Для анализа закладывались парные учётные площадки размером 10×10 м вдоль края пожара (одна

часть площадок была расположена в границах гари, другая — за её пределами, на фоновой территории), которые были расположены на расстоянии не менее 300 м друг от друга, чтобы избежать воздействия местных изменений окружающей среды. На каждой площадке мы оценивали общий растительный покров и покров функциональных групп растений (лишайники, мхи, травы, злаки, кустарнички, кустарники). Определение видового состава и описание растительных сообществ проводились согласно общепринятым методикам (Лавренко, Корчагина, 1964).

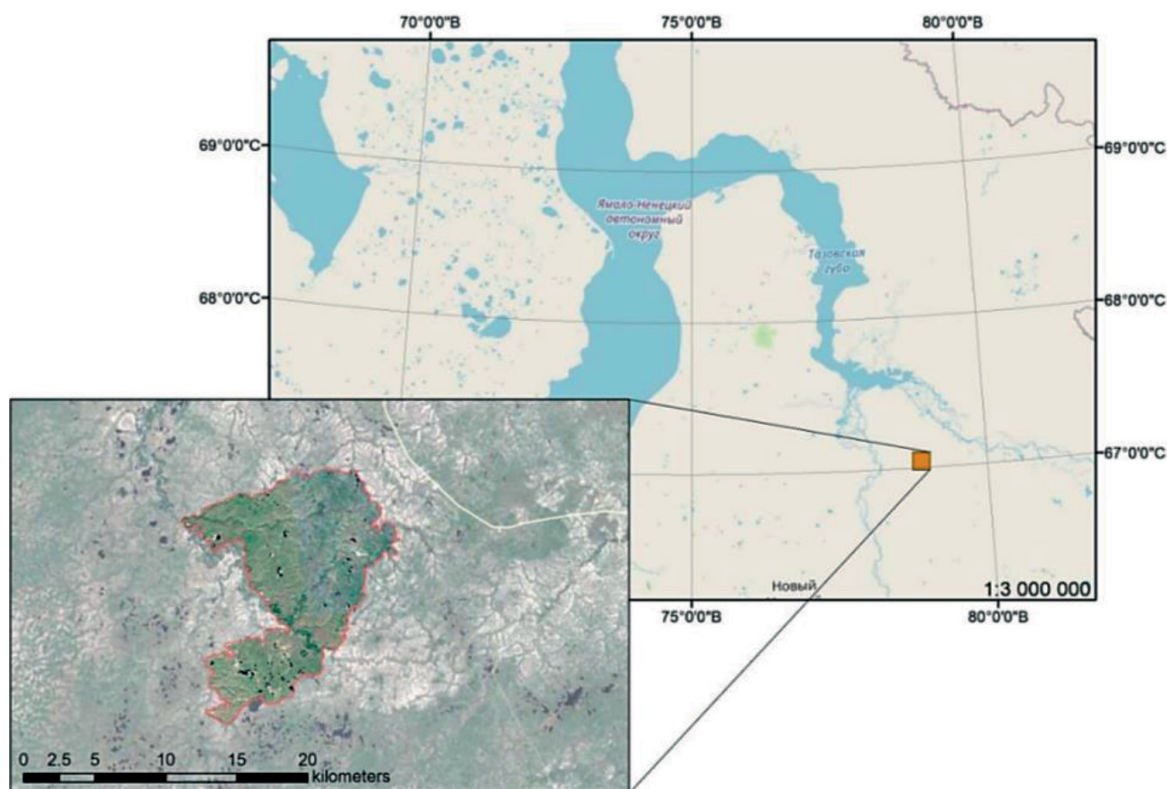


Рис. 1. Карта расположения объекта исследования

Согласно данным Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>) и спутниковым снимкам Landsat с сайта Геологической службы США (англ. United States Geological Survey, <https://earthexplorer.usgs.gov>) пожар произошёл в период с 07.08.1990 по 14.08.1990. Ранее было установлено, что пик вегетации в подзоне типичных тундр приходится на конец июля — начало августа и наблюдается его смещение на начало — середину августа (Иванова, 2019). В ходе работы были подобраны и обработаны в программном обеспечении ArcGIS 25 мультиспектральных снимков Landsat-5 TM (англ. Thematic Mapper), Landsat-7 ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8 OLI (англ. Operational Land Imager), TIRS (англ. Thermal Infrared Sensor) с разрешением 30 м и датами конца июля — начала августа. Подборка данных охватывает период до и после пожара с 1990 по 2023 г. Для подвергшейся пожару и прилегающей фоновой территории по каждому снимку по известным формулам рассчитывались NDVI (Lopez-Garcia, Caselles, 1991; Rouse et al., 1974) и NBR (Key, Benson, 1999), значения которых впоследствии были извлечены в границах каждой учётной площадки.

Результаты и обсуждение

В результате полевых исследований было установлено, что в постпирогенный период происходит изменение структуры растительного покрова. На гари, при общем проективном покрытии живого напочвенного покрова близком к 100 %, растительность представлена в основном

кустарничками и кустарниками. Лишайниковый покров занимал лишь 1 % и находился в угнетённом состоянии. На фоновых площадках общее проективное покрытие живого напочвенного покрова также близко к 100 %. Основную долю составляют лишайники рода *Cladonia* (*Cl. stellaris*, *Cl. rangiferina*), а также кустарники и кустарнички (рис. 2, 3).

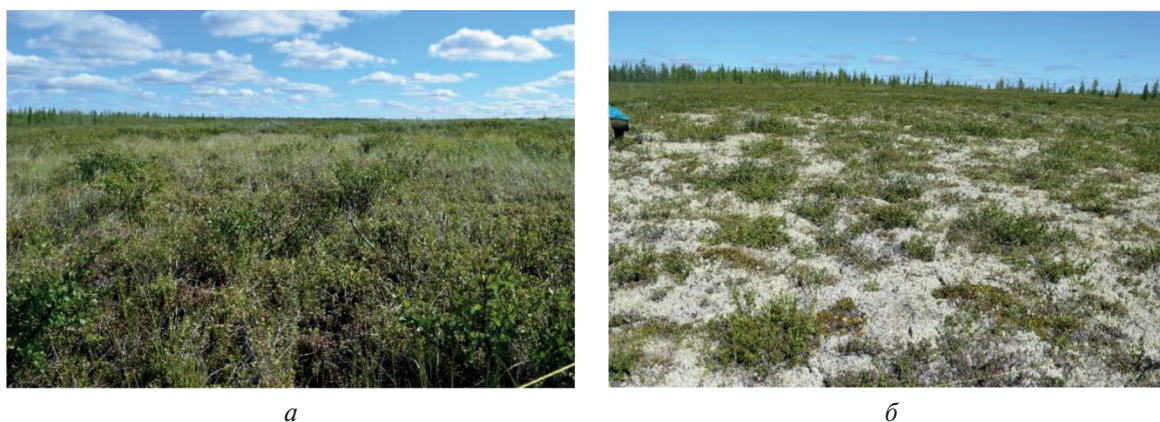


Рис. 2. Пара учётных площадок на территории исследования: а — гарь; б — фон (фото автора)

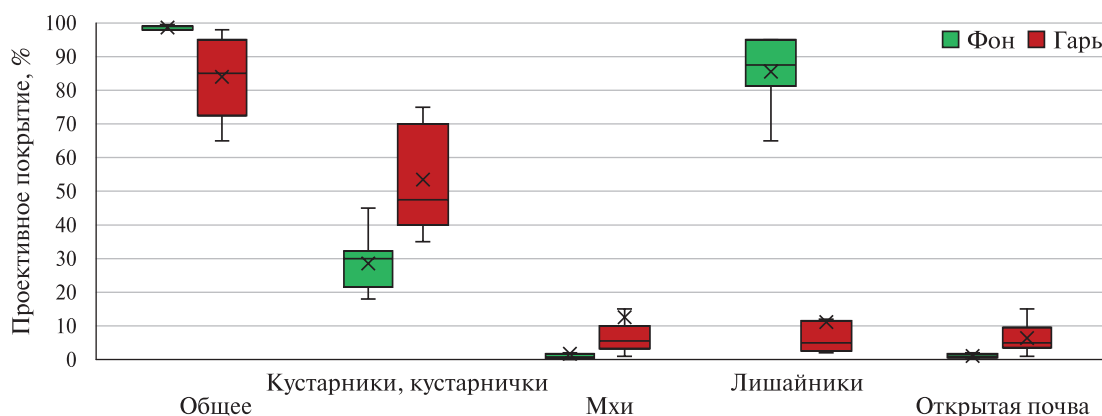


Рис. 3. Распределение ярусов растительности

При соотношении динамики NBR на учётных площадках на гарь и на фоновой территории было выявлено, что значение индекса сразу после пожара снизилось с 0,36 до –0,25. Показатель NBR на гарь восстановился до показателя на несгоревшем участке только через 28 лет после пожара (рис. 4а, см. с. 171).

При анализе динамики вегетационного индекса на учётных площадках на гарь и на фоновой территории было выявлено, что значение NDVI сразу после пожара снизилось с 0,48 до 0,25. Спустя 8 лет после пожара на гарь нормализованный индекс уже превышал показатель фоновых площадок (см. рис. 4б). Это связано с тем, что на оголённых участках поверхности формируются синузии злаков и осок, которые дают прирост уровня индекса NDVI при меньшей биомассе и проективном покрытии за счёт спектральных характеристик вегетационных частей представленного разнотравья.

После 2008 г. такая тенденция сохранилась, в 2023 г. отмечается превышение индекса на гарь (0,67) над фоновым показателем (0,61). Данная динамика связана с развитием и разрастанием кустарникового яруса, так как у кустарников фотосинтетически активной биомассы больше, чем у лишайникового покрова. Пожар усиливает вторжение кустарников двумя механизмами. Во-первых, огонь уничтожает растительность, и таким образом кустарники лучше прорастают и приживаются (Gough, 2006). Во-вторых, огонь способствует возобновлению роста кустарников из частей, уцелевших после пожара (de Groot, Wein, 2004).

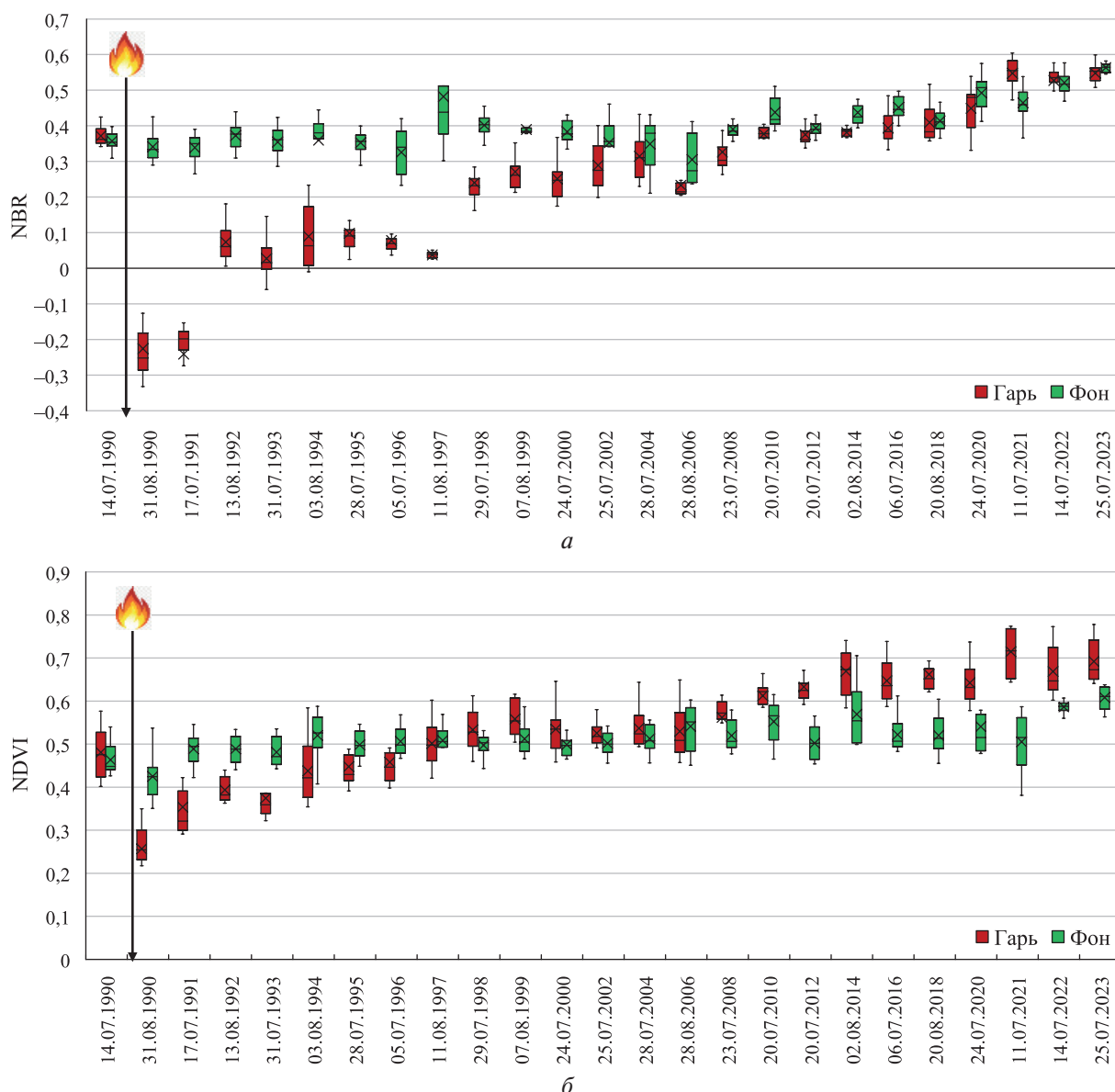


Рис. 4. Вариабельность значений NBR (а) и NDVI (б) за период 1990–2023 гг. (линии внутри прямоугольника отражают медианные значения, крестики — среднее арифметическое по выборке, усы — максимумы и минимумы)

Значительное увеличение NDVI на гари по сравнению с фоном показаны на рис. 5 (см. с. 172). При этом изменение значений NDVI на несгоревшем участке за период наблюдений не превышает одной десятой единицы, что свидетельствует о незначительном колебании индекса в течение всего срока наблюдений.

Кроме того, был проведён анализ *t*-критерия Стьюдента и достоверности различий медиальных значений индекса NDVI на гари и фоне за каждый год, что позволило нам выделить три периода в постпирогенной сукцессии растительного покрова: реабилитация, прогрессия и устойчивое развитие (рис. 6, см. с. 172).

В период реабилитации, который наступает сразу после пожара, отмечается полная или частичная гибель растительного покрова, что проявляется в резком снижении NDVI (с 0,48 до 0,25). Средние медиальные значения NDVI за первые 6 лет после пожара в течение данного периода составляют на гари — 0,38, на фоне — 0,48. Спустя 6 лет наступает период прогрессии, в течение которого различия в основном недостоверны. В этот период средние медиальные значения NDVI равны на гари 0,55, на фоне — 0,52. Но при этом достоверного превышения индекса на гари не наблюдается. По прошествии 18 лет наступает период устойчивого

развития. В этот период значения NDVI на гари значительно и достоверно превышают фоновые. Средние медиальные значения на гари составляют 0,66, а на фоне — 0,54, что связано с массовым разрастанием трав и кустарников на гари.

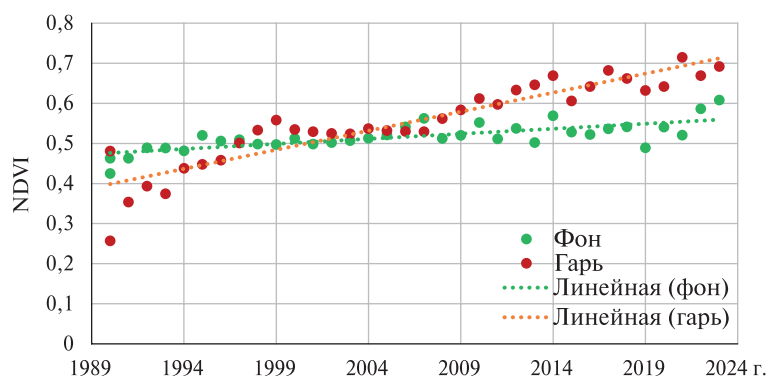


Рис. 5. Динамика значений (линейный тренд) NDVI за период с 1990 по 2023 г.

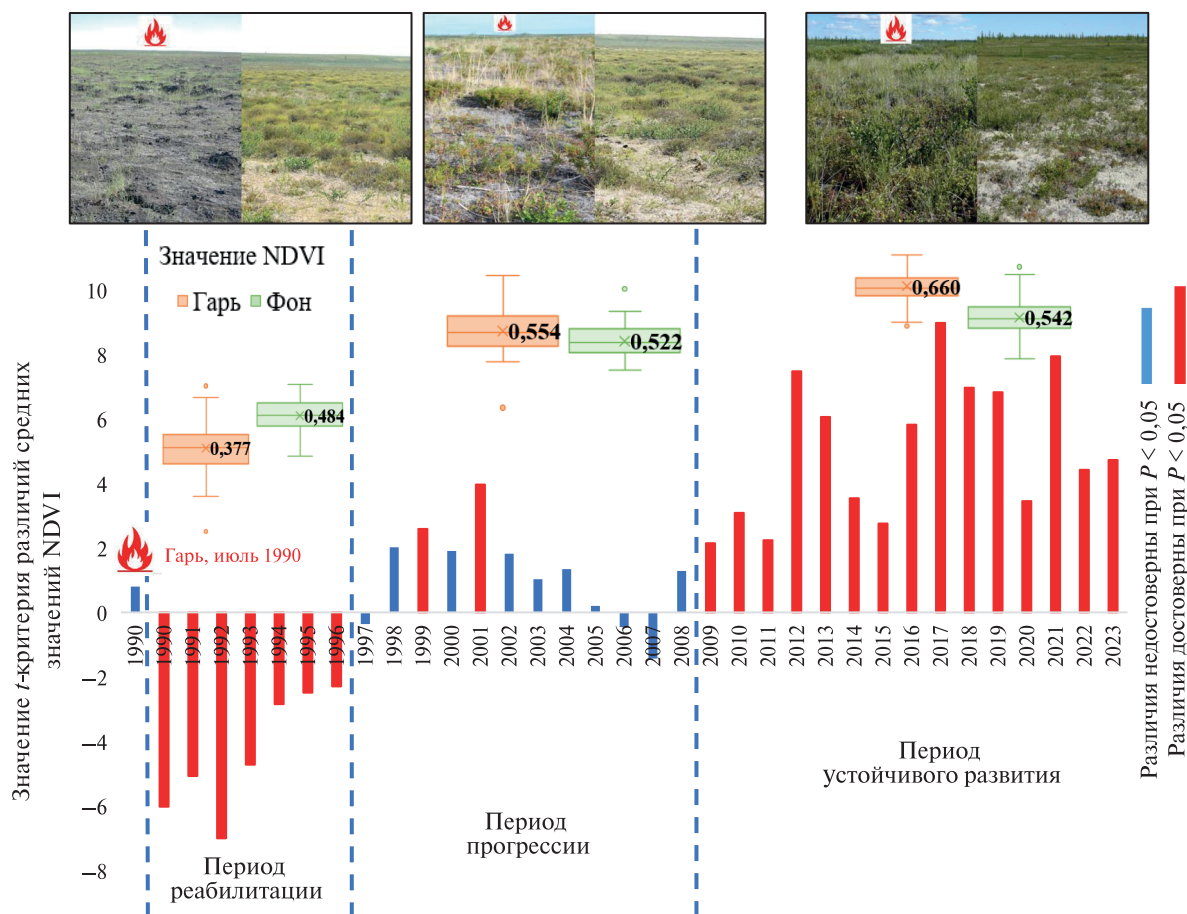


Рис. 6. Значения t -критерия Стьюдента при сравнении различий средних значений NDVI на гари и фоне (красным цветом обозначены достоверные различия средних значений индекса при $P < 0,05$). Диаграмма размаха показывает медиальные значения NDVI для выделенных периодов

Заключение

В результате исследования установлено, что оценка состояния подстиляющей поверхности в постпирогенный период при применении NDVI и NBR различна, что обусловлено особенностями спектральных диапазонов каналов, используемых при расчёте индексов. Индекс

NDVI учитывает поглощение солнечной радиации хлорофиллом в красной области спектра (0,636–0,673 мкм) и отражение клеточных структур листа в ближней инфракрасной (0,851–0,879 мкм). Для расчёта NBR используется ближний инфракрасный (0,851–0,879 мкм) и коротковолновый инфракрасный (2,107–2,294 мкм) диапазон спектра.

В результате анализа выявлено, что динамика NDVI более достоверна, по сравнению с динамикой NBR, для мониторинга растительного покрова, что в дальнейшем позволяет оценить изменения в структуре растительности в части преобладания доли зелёных высших растений по сравнению с лишайниками, чем подтверждается наша гипотеза. Анализ *t*-критерия Стьюдента при сравнении различий средних значений NDVI на гари и фоне позволяет выделить временные рамки трёх периодов восстановления растительного покрова. Индекс NBR, в свою очередь, не показал нам восстановления растительности на гари даже через более 30 лет. В связи с чем индекс NBR возможно использовать для идентификации границ гарей спустя длительный период после пожара.

Полученные результаты доказывают эффективность применения мультиспектральных спутниковых снимков в сочетании с полевыми исследованиями для мониторинга постпирогенной динамики растительного покрова в тундровой зоне. Комбинированный подход к исследованиям особенно важен для мониторинга труднодоступных территорий, где полевые работы не всегда возможны.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-16-00163 «Лишайниковый покров тундры: факторы формирования и технологии восстановления при перевыпасе домашних северных оленей», <https://rscf.ru/project/24-16-00163/> (в части обработки материалов ДЗЗ и написания статьи).

Литература

1. Барталев С. А., Стыцено Ф. В., Хвостиков С. А., Лупян Е. А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
2. Ершов Д. В., Соколова Е. Н., Королева Н. В., Щепаченко Д. Г. Совершенствование метода картографирования органического углерода в лесной подстилке на примере лесов Центрального федерального округа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 212–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-212-222.
3. Иванова К. В. Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности типичных тундр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 194–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
4. Иванов М. А., Гафуров А. М. Анализ изменений землепользования в Среднем Поволжье по данным Landsat для оценки потенциала возврата заброшенных пахотных земель в сельскохозяйственный оборот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 186–201. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201.
5. Ильина И. С., Лапина Е. И., Лавренко Н. Н. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
6. Кирсанов А. Д., Комаров А. А. Использование индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155.
7. Корниенко С. Г., Елсаков В. В. Оценка информативности температурно-вегетационного индекса как индикатора влажности почвенного растительного покрова тундровой зоны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 155–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170.
8. Королева Е. С. Развитие многолетнемерзлых полигональных торфяников под воздействием изменений природных условий Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири: дис. ... канд. геолого-минерал. наук. Тюмень, 2022. 136 с.
9. Лавренко Е. М., Корчагина А. А. Полевая геоботаника. Т. 3. М.; Л.: Наука, 1964. 530 с.

10. *Московченко Д. В., Московченко М. Д.* Оценка современной динамики ландшафтов Заполярного месторождения с использованием спутниковых данных // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 2. С. 6–16.
11. *Московченко Д. В., Арефьев С. П., Московченко М. Д., Юртаев А. А.* Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири // Сибирский эколог. журн. 2020. № 2. С. 243–255. DOI: 10.15372/SEJ20200210.
12. *Сочава В. Б.* Успехи тематического картографирования и карты растительности // Геоботаническое картографирование. 1967. С. 3–9.
13. *Сочава В. Б.* Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1979. 190 с.
14. *Степанов А. С., Фомина Е. А., Верхотуров А. Л., Илларионова Л. В.* Мониторинг посевов сельскохозяйственных культур южной части Дальнего Востока в 2021–2023 гг. по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 120–133. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-120-133.
15. *Тарасова Л. В., Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. и др.* Мониторинг лесного покрова водоохранных зон рек Марий Эл по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 177–195. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
16. *Токарева О. С., Алишаби А. Д. А., Пасько О. А.* Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 191–199. DOI: 10.18799/24131830/2021/07/3283.
17. *Физико-географическое районирование Тюменской области* / под ред. проф. Гвоздецкого Н. А. М.: Изд-во Московского ун-та, 1973. 246 с.
18. *Хомутов А. В., Бабкин Е. М., Тихонравова Я. В. и др.* Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Науч. вестн. Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. Т. 1. № 102. С. 53–64. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008.
19. *Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е.* Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
20. *Шарый П. А., Шарая Л. С.* Закономерные изменения вегетационного индекса лиственных лесов в пространстве в Волжском бассейне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 134–144. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-134-144.
21. *Шпанев А. М., Русаков Д. В.* Применение спектральных индексов для оценки влияния засоренности посева и азотного питания на деятельность фотосинтетического аппарата растений и урожайность озимой тритикале // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 235–247. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-235-247.
22. *Якимов Н. Д., Пономарёв Н. Д., Забродин А. Н., Пономарева Т. В.* Особенности послепожарной динамики спектральных признаков участков лиственных древостоев мерзлотной зоны Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 106–115. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-106-115.
23. *Cuevas-González M., Gerand F., Balzler H., Riaño D.* Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. V. 15. No. 3. P. 561–577. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x.
24. *de Groot W. J., Wein R. W.* Effects of fire severity and season of burn on *Betula glandulosa* growth dynamics // Intern. J. Wildland Fire. 2004. V. 13. No. 3. P. 287–295. DOI: 10.1071/WF03048.
25. *Forgani A., Reddy S., Thankappan M., Cechet B.* Validation of MODIS and AVHRR fire detections in Australia // Intern. J. Geoinformatics. 2021. V. 17. No. 3. P. 117–131. DOI: 10.52939/ijg.v17i3.1907.
26. *Gaglioti B. V., Berner L. T., Jones B. M. et al.* Tussocks enduring or shrubs greening: Alternate responses to changing fire regimes in the Noatak River valley, Alaska // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. V. 126. No. 4. Article e2020JG006009. DOI: 10.1029/2020JG006009.
27. *Gough L.* Neighbor effects on germination, survival, and growth in two arctic tundra plant communities // Ecography. 2006. V. 29. No. 1. P. 44–56. DOI: 10.1111/j.2005.0906-7590.04096.x.
28. *Heim R. J., Bucharova A., Brodt L. et al.* Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years // Science of the Total Environment. 2021. V. 760. Article 143425. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
29. *Higuera P. E., Brubaker L. B., Anderson P. M. et al.* Frequent fires in ancient shrub tundra: Implications of paleorecords for Arctic environmental change // PLoS ONE. 2008. V. 3. No. 3. Article e0001744. 7 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0001744.
30. *Key C. H., Benson N. C.* Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. Poster abstract // Proc. Joint Fire Science Conf. and Workshop / eds. L. F. Neuenschwander, K. C. Ryan. V. II. Boise, ID: University of Idaho and Intern. Association of Wildland Fire, 1999. P. 284.

31. *Lopez-Garcia M., Caselles V.* Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data // *Geocarto Intern.* 1991. V. 6. No. 1. P. 31–37.
32. *Racine C., Jandt R., Meyers C., Dennis J.* Tundra fire and vegetation change along a hillslope on the Seward Peninsula, Alaska, U.S.A. // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research.* 2004. V. 36. P. 1–10. DOI: 10.1657/1523-0430(2004)036[0001:TFAVCA]2.0.CO;2.
33. *Rietze N., Heim R.J., Troeva E. et al.* Pre-fire vegetation conditions and topography shape burn mosaics of Siberian tundra fire scars // *J. Geophysical Research: Biogeosciences.* 2025. V. 130. No. 3. Article e2024JG008608. DOI: 10.1029/2024JG008608.
34. *Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp.* V. 1. Washington, DC, 1974. P. 309–317.
35. *Shur Y. L., Jorgenson M. T.* Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2007. V. 18. P. 7–19. DOI: 10.1002/ppp.582.
36. *Sizov O., Ezhova E., Tsybarovich P. et al.* Fire and vegetation dynamics in northwest Siberia during the last 60 years based on high-resolution remote sensing // *Biogeosciences.* 2021. V. 18. No. 1. P. 207–228. DOI: 10.5194/bg-18-207-2021.
37. *Telesca L., Lasaponara R.* Fire-induced variability in satellite SPOT-VGT NDVI vegetational data // *Intern. J. Remote Sensing.* 2006. V. 27. No. 14. P. 3087–3095. DOI: 10.1080/01431160600564644.
38. *Wookey P. A., Aerts R., Bargett R. D. et al.* Ecosystem feedbacks and cascade processes: Understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change // *Global Change Biology.* 2009. V. 15. P. 1153–1172. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01801.x.
39. *Zhao G., Xu E., Yi X. et al.* Comparison of forest restorations with different burning severities using various restoration methods at Tuqiang forestry bureau of greater Hinggan mountains // *Remote Sensing.* 2023. V. 15. No. 10. Article 2683. DOI: 10.3390/rs15102683.

The potential of using vegetation indices to assess post-pyrogenic succession of vegetation cover

L. V. Brodt, N. V. Prikhod'ko, A. V. Soromotin

*Tyumen State University, Tyumen 625003, Russia
E-mail: l.v.brodt@utmn.ru*

The article discusses the possibilities of using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Burn Ratio (NBR) to assess post-pyrogenic succession of vegetation cover in the Arctic zone of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. The research methodology included geobotanical field studies and analysis of multispectral satellite images of Landsat-5 Thematic Mapper (TM), Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Landsat-8 Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS) for the period 1990–2023. As the result of analysis of NDVI medial values of burnt areas and background for each year, we identified three periods in the post-pyrogenic succession of vegetation cover: rehabilitation (the first 6 years), progression (6–18 years) and sustainable development (after 18 years). As a result of field studies, it was found that in the post-pyrogenic period, the structure of the vegetation cover changes, which reliably shown by the NDVI. The NBR, in turn, does not reflect the restoration of vegetation, and therefore, it can be used to identify burn boundaries long after the fire. The methodology for assessing post-pyrogenic dynamics of vegetation cover using satellite data can be used to monitor Arctic ecosystems and predict their recovery after fires, which is confirmed by the results of field research.

Keywords: NDVI, NBR, vegetation, Landsat, vegetation indices, forest-tundra, Western Siberia, fire, succession

Accepted: 01.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-167-177

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
2. Ershov D. V., Sochilova E. N., Koroleva N. V., Shchepaschenko D. G., Improving the method of mapping organic carbon in the forest litter in Central Federal District, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 212–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-212-222.
3. Ivanova K. V., Dynamics of NDVI for different classes of territorial units of typical tundra vegetation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 194–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
4. Ivanov M. A., Gafurov A. M., Analysis of land use changes in the Middle Volga Region based on Landsat data to assess the potential of returning abandoned cropland into use, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 186–201 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201.
5. Il'ina I. S., Lapshina E. I., Lavrenko N. N., *Rastitel'nost' Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Vegetation cover of the West Siberian plain), Novosibirsk: Nauka, 1985, 251 p. (in Russian).
6. Kirsanov A. D., Komarov A. A., Using the NDVI index to assess the development of perennial grasses under conditions of spatial and temporal heterogeneity, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 143–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155.
7. Kornienko S. G., Elsakov V. V., Assessment of informativeness of temperature-vegetation index as an indicator of moisture content of tundra ground vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 155–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170.
8. Koroleva E. S., *Razvitie mnogoletnemrzhlykh poligonal'nykh torfyanikov pod vozdeistviem izmenenii prirodnikh uslovii Pur-Tazovskogo mezhdurech'ya Zapadnoi Sibiri: dis. ... kand. geologo-mineral. nauk* (Development of permafrost polygonal peatlands under the influence of changes in the natural conditions of the Pur-Taz interfluvium of Western Siberia: Cand. geol. mineralog. sci.), Tyumen, 2022, 136 p. (in Russian).
9. Lavrenko E. M., Korchagina A. A., *Polevaya geobotanika* (Field geobotany), V. 3, Moscow, Leningrad, 1964, 530 p. (in Russian).
10. Moskovchenko D. V., Moskovchenko M. D., Assessment of modern landscape dynamics of the Zapolyarnoe gas field using satellite data, *Tyumen state university herald. Natural resource use and ecology*, 2018, V. 4, No. 2, pp. 6–16 (in Russian).
11. Moskovchenko D. V., Aref'ev S. P., Moskovchenko M. D., Yurtaev A. A., Spatiotemporal analysis of wildfires in the forest tundra of Western Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, V. 13, No. 2, pp. 193–203, DOI: 10.1134/S1995425520020092.
12. Sochava V. B., The success of thematic mapping and vegetation maps, *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 1967, pp. 3–9 (in Russian).
13. Sochava V. B., *Rastitel'nyi pokrov na tematicheskikh kartakh* (Vegetation cover on thematic maps), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdeleniye, 1979, 190 p. (in Russian).
14. Stepanov A. S., Fomina E. A., Verkhoturov A. L., Illarionova L. V., Crops monitoring in the south of the Far East in 2021–2023 using Sentinel-2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 120–133 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-120-133.
15. Tarasova L. V., Kurbanov E. A., Vorobiev O. N. et al., Monitoring forest cover in riparian zones along the rivers of Mari El Republic using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 177–195 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
16. Tokareva O. S., Alshaibi A. D. A., Pas'ko O. A., Assessment of restoration dynamics of burnt forest area vegetation using Landsat satellite data, *Bull. Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2021, V. 332, No. 7, pp. 191–199 (in Russian), DOI: 10.18799/24131830/2021/07/3283.
17. *Fiziko-geograficheskoe raionirovaniye Tyumenskoi oblasti* (Physical and geographical zoning of the Tyumen region), Gvozdet'skii N. A. (ed.), Moscow: Izd. Moskovskogo universiteta, 1973, 246 p. (in Russian).
18. Khomutov A. V., Babkin E. M., Tikhonravova Ya. V. et al., Complex studies of the cryolithozone of the northeastern part of the Pur-Taz Interfluvium, *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*, 2019, V. 1, No. 102, pp. 53–64 (in Russian), DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008.
19. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy dis-*

- tantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
20. Shary P. A., Sharaya L. S., Regular spatial changes in the vegetation index of deciduous forests in the Volga basin, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 134–144 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-134-144.
 21. Shpanev A. M., Rusakov D. V., Application of spectral indices to assess the influence of crop weeds and nitrogen nutrition on the activity of the photosynthetic apparatus of plants and the yield of winter triticale, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 235–247 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-235-247.
 22. Yakimov N. D., Ponomarev N. D., Zabrodin A. N., Ponomareva T. V., The features of post-fire dynamics of spectral characteristics of larch stands in the permafrost zone of Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 106–115 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-106-115.
 23. Cuevas-González M., Gerand F., Balzler H., Riaño D., Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices, *Global Change Biology*, 2009, V. 15, No. 3, pp. 561–577, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x.
 24. de Groot W. J., Wein R. W., Effects of fire severity and season of burn on *Betula glandulosa* growth dynamics, *Intern. J. Wildland Fire*, 2004, V. 13, No. 3, pp. 287–295, DOI: 10.1071/WF03048.
 25. Forгани A., Reddy S., Thankappan M., Cechet B., Validation of MODIS and AVHRR fire detections in Australia, *Intern. J. Geoinformatics*, 2021, V. 17, No. 3, pp. 117–131, DOI: 10.52939/ijg.v17i3.1907.
 26. Gaglioti B. V., Berner L. T., Jones B. M. et al., Tussocks enduring or shrubs greening: Alternate responses to changing fire regimes in the Noatak River valley, Alaska, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, V. 126, No. 4, Article e2020JG006009, DOI: 10.1029/2020JG006009.
 27. Gough L., Neighbor effects on germination, survival, and growth in two arctic tundra plant communities, *Ecography*, 2006, V. 29, No. 1, pp. 44–56, DOI: 10.1111/j.2005.0906-7590.04096.x.
 28. Heim R. J., Bucharova A., Brodt L. et al., Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years, *Science of the Total Environment*, 2021, V. 760, Article 143425, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
 29. Higuera P. E., Brubaker L. B., Anderson P. M. et al., Frequent fires in ancient shrub tundra: Implications of paleorecords for Arctic environmental change, *PLoS ONE*, 2008, V. 3, No. 3, Article e0001744, 7 p., DOI: 10.1371/journal.pone.0001744.
 30. Key C. H., Benson N. C., Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. Poster abstract, In: *Proc. Joint Fire Science Conf. and Workshop*, L. F. Neuenschwander, K. C. Ryan (eds.), V. II, Boise, ID: University of Idaho and Intern. Association of Wildland Fire, 1999, p. 284.
 31. Lopez-Garcia M., Caselles V., Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data, *Geocarto Intern.*, 1991, V. 6, No. 1, pp. 31–37.
 32. Racine C., Jandt R., Meyers C., Dennis J., Tundra fire and vegetation change along a hillslope on the Seward Peninsula, Alaska, U.S.A., *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, V. 36, pp. 1–10, DOI: 10.1657/1523-0430(2004)036[0001:TFAVCA]2.0.CO;2.
 33. Rietze N., Heim R. J., Troeva E. et al., Pre-fire vegetation conditions and topography shape burn mosaics of Siberian tundra fire scars, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2025, V. 130, No. 3, Article e2024JG008608, DOI: 10.1029/2024JG008608.
 34. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: *Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp.*, V. 1, Washington, DC, 1974, pp. 309–317.
 35. Shur Y. L., Jorgenson M. T., Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, V. 18, pp. 7–19, DOI: 10.1002/ppp.582.
 36. Sizov O., Ezhova E., Tsymbarovich P. et al., Fire and vegetation dynamics in northwest Siberia during the last 60 years based on high-resolution remote sensing, *Biogeosciences*, 2021, V. 18, pp. 207–228, DOI: 10.5194/bg-18-207-2021.
 37. Telesca L., Lasaponara R., Fire-induced variability in satellite SPOT-VGT NDVI vegetational data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, V. 27, No. 14, pp. 3087–3095, DOI: 10.1080/01431160600564644.
 38. Wookey P. A., Aerts R., Bargett R. D. et al., Ecosystem feedbacks and cascade processes: Understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change, *Global Change Biology*, 2009, V. 15, pp. 1153–1172, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01801.x.
 39. Zhao G., Xu E., Yi X. et al., Comparison of forest restorations with different burning severities using various restoration methods at Tuqiang forestry bureau of greater Hinggan mountains, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 10, Article 2683, DOI: 10.3390/rs15102683.