



УДК 551.312.2 (571.16)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>

Использование вегетационных и водных индексов для оценки состояния постпирогенных верховых болот Западной Сибири

А. А. Синюткина*

*Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал
Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, г. Томск, Россия*

Аннотация. Анализируются возможности применения вегетационных и водных индексов для оценки пирогенной нагрузки и постпирогенного восстановления растительности на верховых болотах. Анализ проведен на основе материалов полевых геоботанических исследований, выполненных в 2023 г. на постпирогенном участке Большого Васюганского болота, выгоревшем в 2016 г., и спутниковых данных Landsat 8. В рамках исследования рассчитаны вегетационные (NDVI, VARI, NBR) и водные (NDWI WRI) индексы для точек полевых исследований, выполнен статистический анализ их взаимосвязей со степенью пирогенной нагрузки и характеристиками растительного покрова с использованием метода главных компонент. Отмечено, что влияние пожара проявилось в частичном или полном выгорании поверхности, деревьев, кустарничков и мхов. Через семь лет после пожара произошло практически полное восстановление кустарничков, появление подроста сосны и березы, интенсивное зарастание выгоревших поверхностей *Polytrichum strictum*, на отдельных точках началось восстановление сфагновых мхов. Исследование показало, что значения всех рассмотренных индексов, за исключением NDVI, ниже на постпирогенных точках в сравнении с невыгоревшими. Из всех рассмотренных индексов, NDWI показал максимальную зависимость от доли выгорания поверхности и проективного покрытия сфагновыми мхами. Водные индексы оказались более пригодными в сравнении с вегетационными для оценки пирогенной нагрузки и тенденций постпирогенного восстановления в условиях верховых болот. Полученные результаты будут использованы для создания обучающих выборок при дешифрировании спутниковых данных и проведения пространственно-временной оценки восстановления постпирогенных участков в пределах верховых болот Западной Сибири.

Ключевые слова: Landsat, Томская область, Большое Васюганское болото, природный пожар, болотная растительность.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

Для цитирования: Синюткина А. А. Использование вегетационных и водных индексов для оценки состояния постпирогенных верховых болот Западной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 48. С. 90–109. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>

The Application of Vegetation and Water Indices to Assess the State of Post-pyrogenic Raised Bogs in Western Siberia

A. A. Sinyutkina

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – branch of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies RAS, Tomsk, Russian Federation

Abstract. The article presents an analysis of the using vegetation and water indices possibilities to assess the pyrogenic load and post-pyrogenic vegetation restoration in raised bogs. The object of the study is burned out in 2016 site within the drained part of the Great Vasyugan mire. The research based on the vegetation field description data carried out in 2023 and Landsat 8 satellite data. Vegetation (NDVI, VARI, NBR) and water (NDWI WRI) indices for field research plots were calculated, and a statistical analysis of their interrelationships with the degree of pyrogenic load and characteristics of vegetation cover was performed using the principal component method. The effect of the wildfire was manifested in the partial or complete burning of the surface, trees, dwarf shrubs and mosses. Seven years after the fire, there was an almost complete restoration of dwarf shrubs, the appearance of pine and birch undergrowth, intensive overgrowth of burnt surfaces by *Polytrichum strictum*, and the restoration of sphagnum mosses began. The study showed that the values of all the considered indices, with the exception of NDVI, are lower at post-pyrogenic points compared to unburned ones. Of all the indices considered, NDWI showed the maximum dependence on the proportion of surface burnout and projective coating with sphagnum mosses. Water indices turned out to be more suitable in comparison with vegetation indices for assessing pyrogenic load and trends of post-pyrogenic restoration in conditions of raised bog. The results obtained will be used to create training inputs for decoding satellite data and to conduct a spatial and temporal assessment of the restoration of post-pyrogenic sites.

Keywords: Landsat, Tomsk Region, Great Vasyugan Mire, wildfire, bog vegetation

For citation: Sinyutkina A.A. The Application of Vegetation and Water Indices to Assess the State of Post-pyrogenic Raised Bogs in Western Siberia. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 48, pp. 90-109. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90> (in Russian)

Введение

Болота в Западной Сибири являются важным средообразующим фактором, определяющим биоразнообразие, гидрологические условия, баланс парниковых газов региона. На протяжении голоцена естественный баланс первичного производства и распада был смещен в сторону накопления частично разложившегося органического вещества в виде торфа благодаря высокому уровню болотных вод и плохой аэрации [Minkkinen, Laine, 1998; Questioning ten ... , 2017; Impacts of drainage ... , 2019]. Одним из наиболее значимых факторов потерь углерода на болотах являются пожары [Глухова, Сирин, 2018; Оценка постпирогенной динамики ... , 2020]. Потери углерода происходят не только во время непосредственного горения органического вещества, но и за счет изменения структуры фитоценозов, выраженного главным образом в замещении основных торфообразователей верховых болот – сфагновых мхов на зеленые мхи, подверженные быстрому разложению, что существенно снижает темпы накопления углерода на постпирогенных участках [Gunnarsson, 2005; Benscoter, Vitt, 2008; Plant litter decomposition ... , 2009; Копотева, Купцова, 2016; Малащук, Филиппов, 2021]. Поэтому понимание процессов, связанных с последствиями пожаров на болотах и

скоростью восстановления болотной растительности, является крайне важным при определении эмиссии углерода и влияния болот на глобальный цикл углерода [Peatland-fire interactions ... , 2021].

Вегетационные и водные индексы, рассчитанные на основе данных дистанционного зондирования Земли, широко применяются для оценки состояния, природной и антропогенной динамики болотных экосистем [Крутских, Миронов, Рязанцев, 2018; Курбатова, Верещака, Иванова, 2021]. В том числе, анализ спутниковых данных является наиболее часто используемым подходом для определения последствий пожара и оценки общей площади выгорания [Rein, Huang, 2021]. При этом авторами подчеркивается немногочисленность комплексных исследований по анализу спектральных характеристик водно-болотных угодий и сложность картографирования болот в сравнении с лесами благодаря их высокой пространственной гетерогенности и временной динамики, высокой влажности поверхности, что требует разработки особых подходов к геоинформационному моделированию болот с использованием спутниковых данных [Spectral analysis ... , 2018; A highly automated algorithm ... , 2019]. Вегетационные индексы в большинстве случаев отражают общий пророст биомассы, наибольший вклад дают листовенные растения, зеленые мхи – виды не типичные для верховых болот. Поэтому высокие значения индексов, сопоставимые с фоновыми значениями, не всегда отражают действительное восстановление болотной растительности. Необходим выбор индексов, в наибольшей степени отражающих восстановление болотной растительности и водных свойств поверхности болота, связанных с присутствием покрова из сфагновых мхов.

Целью исследования является анализ возможностей применения вегетационных и водных индексов для оценки пирогенной нагрузки и постпирогенного восстановления растительности на верховых болотах. В рамках исследования поставлены следующие вопросы: 1) как происходит восстановление болотной растительности через семь лет после крупного пожара; 2) какой из индексов в лучшей степени отражает интенсивность выгорания верхового болота; 3) какой из индексов в лучшей степени отражает восстановление видов, характерных для верховых болот?

Состояние проблемы

Современные возможности средств дистанционного зондирования Земли позволяют сформировать систему долговременного пожарного мониторинга и оценки постпирогенных изменений растительности в целях предотвращения негативных экологических процессов. Ряд работ коллектива Института космических исследований РАН посвящен глобальным оценкам последствий пожаров на территории Российской Федерации с применением спутниковых данных MODIS. С использованием вегетационных индексов проведен анализ площади ежегодной гибели лесов от пожаров [Спутниковая оценка ... , 2015]. Разработана методика актуализации данных о площадях необлесенных гарей с разными скоростями зарастания, основанная на сравнении спектральных характеристик классов растительного покрова [Стыценко, Сайгин, Барталев, 2021]. Представлены исследования постпирогенной ди-

намики лесной растительности с использованием спутниковых данных в красном канале [Исследование постпожарной динамики ... , 2020]. Разработаны методики и выполнены оценки пирогенной нагрузки главным образом для лесных экосистем, в то время как заболоченные территории с этой точки зрения остаются менее исследованными.

Спутниковые данные широко применяются для оценки состояния и долгосрочного мониторинга естественных и антропогенно нарушенных водно-болотных угодий по всему миру [Rebelo, Finlayson, Nagabhatla, 2009; Davranche, Lefebvre, Poulin, 2010; Petus, Lewis, White, 2013; Ghosh, Mishra, Gitelson, 2016; Using digital camera ... , 2017; Di Vittorio, Georgakakos, 2018; A highly automated ... , 2019]. Во многих исследованиях оценка динамики болот проводится с использованием показателей космической съемки Landsat (табл. 1), что связано с наличием многолетнего ряда данных (начиная с 1970-х гг.), анализ которых в некоторых случаях дает возможность оценить состояние болота даже до антропогенной нагрузки, проследить реакцию болот на разные антропогенные факторы – осушение, добычу торфа, пожары и др. и выявить тенденции их восстановления после прекращения антропогенной нагрузки и/или рекультивации. Распространенным методом для моделирования фотосинтеза, оценки продуктивности болотной растительности, ее сезонной и многолетней динамики является расчет вегетационных индексов, наиболее популярным из которых является NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) (табл. 1).

Таблица 1

Опыт использования спутниковых данных для изучения состояния и динамики болот

Источник	Территория	Антропогенная нагрузка/пожар	Спутник	Каналы	Индексы
[Spectral detection ... , 2014]	США	Нет	Landsat, MODIS, Worldview 2	NIR, SWIR1	SRWI, SIWSI, OLI5/OLI4
[Дюкарев, Алексеева, Головацкая, 2017]	Большое Васюганское болото	Осушение, естественные болота	Landsat, MODIS	BLUE, GREEN, RED, NIR, SWIR1, SWIR2	NDVI
[Корниенко, 2017]	Тазовский п-ов	Пожар	Landsat	RED, NIR, SWIR, TIR1	NDVI, NBR, NDWI
[Using digital camera ... , 2017]	США	Осушение, восстановление	Landsat	BLUE, GREEN, RED, NIR	NDVI, EVI, SAVI, LSW, GCCI
[Spectral analysis ... , 2018]	Канада	Нет	RapidEye, Sentinel 2A, ASTER Landsat	BLUE, GREEN, RED, NIR, SWIR1, SWIR2, TIR	NDVI, NDWI, SAVI, NDSI
[Крутских, Миронов, Рязанцев, 2018]	Бассейн Онежского озера	Нет	Landsat	RED, NIR, SWIR, TIR1	NDVI, NDMI
[Зраенко, 2019]		Нет	Landsat	BLUE, GREEN, RED, SWIR2	

Окончание табл. 1

Источник	Территория	Антропогенная нагрузка/пожар	Спутник	Каналы	Индексы
[Муравьева, 2019; 2020; 2023]	Тверская область	Осушение, добыча торфа, пожар	Landsat	RED, NIR, SWIR, TIR1	NDVI, SWVI
[Multispectral satellite ... , 2020]	Московская область	Осушение, восстановление, пожары	MODIS, SPOT, Landsat, Sentinel	RED, NIR, SWIR1, SWIR2	
[Тигеев, Московченко, Фахретдинов, 2021]	ЯНАО	Пожар	MODIS	RED, NIR	NDVI
[Пространственно-временной анализ ... , 2020]	ЯНАО	Пожар	Landsat	NIR, SWIR,	NBR
[Курбатова, Верещака, Иванова, 2021]	Вологодская область	Осушение, добыча торфа	Landsat	GREEN, RED, NIR	NDVI, NDWI
[Паршин, 2021]	Архангельская область	Нет	Landsat 8	BLUE, GREEN, RED, NIR	
[Ткаченко, Короткова, 2022]	Большое Васюганское болото	Нет	Landsat	RED, NIR	NDVI

Несмотря на широкий ряд проведенных исследований в разных регионах мира, остается открытым вопрос выбора наиболее полезных спектральных диапазонов для дифференциации классов болот и оценки состояния их растительности и условий увлажнения. Например, в работе [Spectral analysis..., 2018] на примере болот Канады сделан вывод о высоком потенциале использования красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов для мониторинга водно-болотных угодий. NDVI часто используется для оценки восстановления растительности после пожаров. О. С. Сизовым с соавторами [Оценка постпирогенной динамики ... , 2020] на основе ретроспективного анализа распространения природных пожаров и оценки постпирогенной динамики растительности в зонах тундры, лесотундры и северной тайги Западной Сибири за последние 50 лет с использованием NDVI сделан вывод о длительном сохранении лиственной растительности на участках гарей вместо естественной мохово-лишайниковой. Таким образом, в тундрах и на болотах рост значений вегетационных индексов отражает не восстановление исходной растительности, а трансформацию ее видового состава.

В других исследованиях показано преимущество использования каналов в ближнем инфракрасном диапазоне (SWIR) и основанных на них индексов, что связано с их чувствительностью к содержанию влаги в поверхностном слое, в том числе и в растительном покрове, что является важным для роста болотной растительности [Зраенко, 2019; Муравьева, 2020; Муравьева, 2023]. В работе [Spectral detection ... , 2014] показан подход к применению

данных дистанционного зондирования для оценки содержания влаги и уровня болотных вод на верховых сфагновых болотах. Выявлено, что водный индекс SRWI (простой коэффициент водного индекса – отношение NIR/SWIR1) в наибольшей степени подходит для оценки влагосодержания в поверхностном слое.

Таким образом, система спутникового мониторинга природных пожаров и процессов постпирогенного восстановления растительности наиболее развита для лесных территорий, в то время как болота требуют разработки отдельных подходов к оценке их состояния в условиях пирогенной нагрузки, что связано со специфическими особенностями увлажнения и видового состава болотной растительности.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является пирогенный участок в пределах осушенной части Бакчарского болота (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота). Общая площадь 2700 км² (рис. 1). Территория исследования относится к подзоне южной тайги Западной Сибири. Климат континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в с. Бакчар (1960–2021 гг.) составляет 0,02 °С, количество осадков 474 мм [Описание массива данных].

В 1980-х гг. на площади 77 км² с целью лесомелиорации было проведено осушение сетью открытых каналов. Ожидаемый эффект, выраженный в увеличении продуктивности древесного яруса, достигнут не был. Влияние осушения проявилось в некотором снижении уровня болотных вод, увеличении проективного покрытия кустарничковым ярусом, изменении соотношения видов мохово-лишайникового яруса – частичном замещении сфагновых мхов лишайниками и зелеными мхами, увеличении доли *Sphagnum fuscum* в видовом составе сфагновых мхов. Мероприятия, связанные с поддержанием и ремонтом осушительной сети, не проводились. В настоящее время происходит интенсивное зарастание осушительных каналов сфагновыми мхами и травами, отмечено частичное восстановление болота [Трансформация поверхности ... , 2018; Sinyutkina, 2021]. Несмотря на низкий эффект лесомелиорации, осушение болота стало причиной возникновения пожаров, наиболее значимые из которых произошли в начале 1990-х и в 2016 г. Площадь распространения последнего составила около 5 км². Горению были подвержены в основном участки, занятые сосново-кустарничково-сфагновым растительным сообществом, и частично участки грядово-мочажинного болота. Полевые исследования, включавшие геоботанические описания растительности с определением проективного покрытия видов всех ярусов и суммарного покрытия каждым ярусом, оценку доли открытой поверхности, проведены в июле 2023 г. на 26 постпирогенных точках пожара 2016 г., одной точке в пределах пожара 1990-х, двух невыгоревших точках.

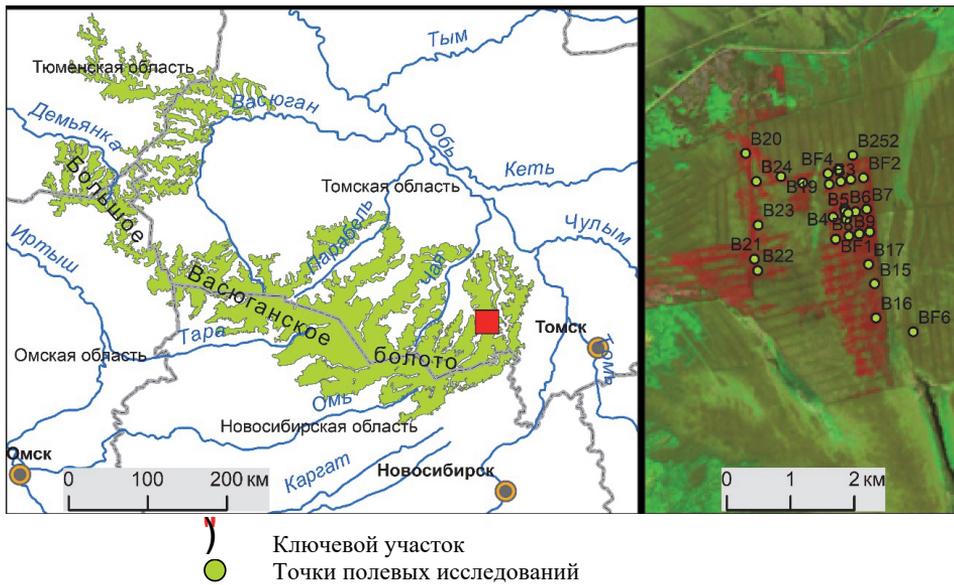


Рис. 1. Схема расположения ключевого участка и точек полевых исследований (Landsat 8, 5 июля 2017)

Доля выгорания поверхности оценивалась методом линейной таксации с определением присутствия и толщины горелого слоя в 20 точках на каждой геоботанической площадке и рассчитывалась как отношение количества точек с горелым слоем к общему количеству, выраженное в процентах. Средняя толщина горелого слоя определялась только для выгоревшей поверхности. Уровень болотных вод определялся относительно средней поверхности болота. Координаты точек полевых описаний фиксировались с помощью GPS-навигатора Garmin eTrex 22х.

Для расчета растительных и водных индексов использовался снимок Landsat 8 OLI/TIRS, collection 2, level 1, дата съемки 26.08.2023 (получен из открытого источника – Геологическая служба США, англ. United States Geological Survey, USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://libra.developmentseed.org/>). С помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin ПО QGIS (версия 7) была проведена атмосферная коррекция (DOS1) многоканальных сцен.

В исследовании использованы следующие индексы: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс), VARI (Visible Atmospherically Resistant Index – видимый атмосферостойкий вегетационный индекс), NBR (Normalized Burn Ratio – нормализованный индекс гарей), NDWI (Normalized Difference Water Index – нормализованный разностный водный индекс), WRI (Water Ratio Index – индекс влагостойкости).

Расчет индексов проведен с использованием растрового калькулятора QGIS 3.28.0 по следующим формулам:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}); \quad (1)$$

$$\text{VARI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE}); \quad (2)$$

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2}); \quad (3)$$

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1}); \quad (4)$$

$$\text{WRI} = (\text{GREEN} + \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1}) \quad (5)$$

где BLUE – отражение в голубой области спектра (B2); GREEN – отражение в зеленой области спектра (B3); RED – отражение в красной области спектра (B4); NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (B5); SWIR1,2 – отражение в коротковолновой инфракрасной области спектра (B6, B7).

Статистический анализ данных содержал проведение кластерного и факторного анализа с использованием метода главных компонент. Кластерный анализ проведен на основе данных полевых исследований и включал следующие переменные: доля выгорания поверхности, средняя толщина горелого слоя, проективное покрытие сохранившегося древесного яруса, проективное покрытие сосной и березой в ярусе подроста, появившегося после пожара, проективное покрытие кустарничковым ярусом, *Polytrichum strictum*, сфагновыми мхами, доля открытой поверхности. При характеристике кластеров в качестве показателей интенсивности пирогенной нагрузки использовались доля выгорания поверхности, толщина горелого слоя и проективное покрытие сохранившегося древесного яруса, показателей интенсивности восстановления – проективное покрытие подростом, сфагновыми мхами и доля открытой поверхности. Целью факторного анализа было выявить взаимосвязи характеристик растительного покрова верхового болота и индексов, полученных с использованием спутниковых данных.

Результаты

Изучаемый участок Бакчарского болота относится к верховому типу. В растительном покрове осушенной части за пределами контура пожара 2016 г. преобладает сосново-кустарничково-сфагновое растительное сообщество. В составе древесного яруса доминирует сосна высотой 2–3 м, проективное покрытие обычно не превышает 20 %. Для данного болота характерно широкое распространение кустарничкового яруса из багульника (*Ledum palustre*), хамедафны (*Chamaedaphne calyculata*), андромеды (*Andromeda polifolia*), голубики (*Vaccinium uliginosum*). Меньшую площадь занимают комплексные грядово-мочажинные болота с древесно-кустарничково-моховыми грядами и травяно-моховыми мочажинами. Проективное покрытие кустарничковым ярусом с доминированием багульника и хамедафны достигает 80 %. В составе мохово-лишайникового яруса доминируют сфагновые мхи с преобладанием *Sphagnum fuscum*, лишайники занимают 10–20 % поверхности гряд. В мочажинах наиболее типичными видами являются очеретник (*Rhynchospora alba*), пушица (*Eriophorum vaginatum*), сфагновые мхи – *S. balticum*, *S. jensenii* и др.

На участке пожара начала 1990-х гг. (точка ВФ6) отмечено практически полное восстановление сосново-кустарничково-сфагнового растительного сообщества, характерного для невыгоревшей части болота. Отличительными особенностями данной территории являются: 1) высокое проективное покрытие (до 20 %) молодых сосен разного возраста, выросших после пожара, при низком проективном покрытии соснами, сохранившимися после пожара; 2) в составе мохово-лишайникового яруса отмечен *P. strictum*, являющийся типичным видом постпирогенных болот и продолжающий сохранять высокую встречаемость даже более чем через 30 лет после пожара.

Растительный покров в пределах контура пожара 2016 г. характеризуется пространственной неоднородностью, связанной с исходными характеристиками болота до пожара, разным расположением осушительных каналов, что в свою очередь определяет разный уровень болотных вод и, как следствие, интенсивность горения и восстановления болота. В зависимости от интенсивности выгорания и характеристик растительного покрова через семь лет после пожара точки в пределах постпирогенного участка разделились на пять кластеров (рис. 2, табл. 2).

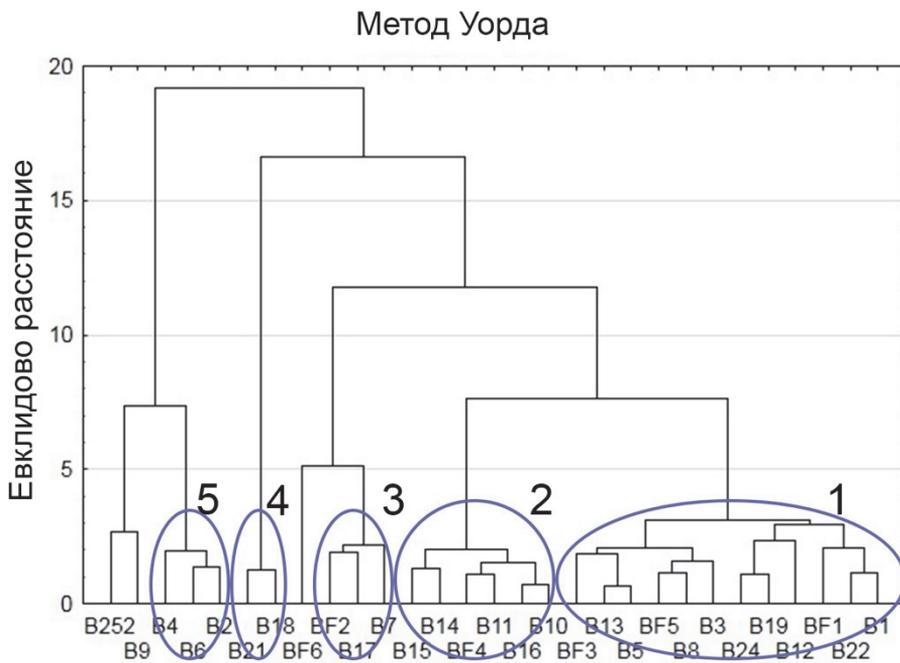


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа точек полевых описаний по показателям растительного покрова и интенсивности пирогенной нагрузки

Таблица 2

Значения показателей растительного покрова для кластеров

Кластеры	Доля выгорания поверхности, %	Толщина горелого слоя, см	Пп* сосен, %	Пп подроста, %	Пп сфагновых мхов, %	Доля открытой поверхности, %
1	63 (23–90)	0,47 (0,22–0,69)	1 (0–5)	3 (0–6)	47 (20–80)	18 (5–25)
2	89 (73–100)	0,56 (0,30–0,83)	0 (0–1)	4 (2–5)	13 (4–20)	18 (10–20)
3	43 (25–54)	0,54 (0,34–0,67)	2 (0–5)	10 (7–12)	67 (50–80)	7 (5–10)
4	83 (71–95)	0,39 (0,33–0,44)	0 (0–0)	10 (10–10)	23 (15–30)	25 (20–30)
5	52 (30–76)	0,47 (0,17–0,73)	10 (10–10)	1 (0–2)	47 (30–70)	5 (0–15)
Среднее для постпирогенных точек	67 (23–100)	0,49 (0,17–0,83)	2 (0–10)	4 (0–12)	40 (4–80)	16 (0–30)
ВФ6	н/д	н/д	2	21	70	10
Невыгоревшие точки	0	0	20 (20–20)	6 (3–10)	70 (70–70)	15 (10–20)

*Примечание: Пп – проективное покрытие.

Первый кластер, включающий максимальное количество точек (12), является средним как по пирогенной нагрузке, так и по интенсивности восстановления. Доля выгорания поверхности и проективное покрытие сфагновыми мхами существенно различается между точками (см. табл. 2). На шести точках сохранились живые сосны. Общим для точек данного кластера является относительно низкое проективное покрытие *P. strictum* (10–50 % со средним значением 24 %) и присутствие на большинстве точек подроста сосны или березы.

Второй кластер, включающий шесть точек, характеризуется максимальной среди кластеров пирогенной нагрузкой и низкой интенсивностью восстановления. Характерна максимальная доля выгорания поверхности, достигающая 100 % на трех точках, высокое проективное покрытие *P. strictum* (40–60 %) и низкое сфагновыми мхами (см. табл. 2). В ярусе подроста преобладает береза, встречающаяся на всех точках кластера. Низкий уровень болотных вод (37–52 см ниже поверхности на момент проведения полевых исследований) обусловил высокую интенсивность выгорания и зарастание нетипичными для верховых болот видами.

Наибольшая интенсивность восстановления при низкой пирогенной нагрузке характерна для третьего кластера, включающего всего три точки. Отличается максимальным среди точек проективным покрытием сфагновыми мхами, интенсивным восстановлением древесного яруса из сосны, проективное покрытие которой достигает 7–10 % в ярусе подроста (см. табл. 2), присутствием живых сосен на двух точках. Высокое проективное покрытие травяным ярусом (25–40 %) свидетельствует о постоянном относительно высоком уровне болотных вод, который на момент проведения полевых описаний составил 20–35 см ниже поверхности болота при среднем значении для

постпирогенных точек $-35,5$ см. Высокий уровень болотных вод вероятно способствовал меньшему выгоранию поверхности во время пожара. Следует отметить, что точка пожара 1990-х гг. ВФ6 образует отдельный подкластер внутри третьего кластера.

Четвертый кластер включает обе точки в пределах выгоревшей части грядово-мочажинного болота. Характеризуется средней пирогенной нагрузкой, при этом интенсивность восстановления минимальная. Отличается высокой долей выгорания поверхности, низким проективным покрытием как *P. strictum* (30 %), так и сфагновыми мхами (15–30 %). Отмечено интенсивное зарастание березой (проективное покрытие 10 %) при отсутствии сохранившихся сосен и подроста сосны. Травы занимают 25–40 % поверхности.

Пятый кластер характеризуется минимальной пирогенной нагрузкой и средней интенсивностью восстановления и включает три точки. Общим является низкая доля выгорания, не превышающая 50 %, присутствие сохранившихся сосен и отсутствие подроста березы. В отдельный подкластер пятого кластера вошли две невыгоревшие точки.

Общим для всех постпирогенных точек является практически полное восстановление кустарничкового яруса, проективное покрытие (60–80 %) и видовой состав которого не отличаются между постпирогенными и невыгоревшими точками.

Факторный анализ показателей интенсивности выгорания и характеристик растительного покрова показал, что высокие факторные нагрузки на первой факторной оси имеет доля выгорания поверхности (0,92), находящаяся в прямой зависимости с проективным покрытием *P. strictum* (0,88) и обратной с проективным покрытием сфагновыми мхами ($-0,89$). Меньшие факторные нагрузки имеет толщина горелого слоя (0,69) и проективное покрытие сохранившегося древесного яруса ($-0,66$). Вторая факторная ось отражает прямую зависимость проективного покрытия травяным ярусом ($-0,73$) от уровня болотных вод ($-0,61$) и обратную зависимость с проективным покрытием подростом березы (0,68) (рис. 3, а).

Несмотря на выявленные различия в растительном покрове как между невыгоревшими и постпирогенными точками, так и между рассмотренными выше кластерами, значения вегетационного индекса NDVI имеют схожие значения и изменяются в незначительных пределах 0,61–0,67 (табл. 3). Максимальное значение отмечено на точке ВФ6, что обусловлено разрастанием древесного яруса, общее проективное покрытие которым оказалось даже выше в сравнении с невыгоревшими точками. Минимальное значение характерно для одной из точек первого кластера, характеризующейся отсутствием сохранившихся сосен и единичными экземплярами сосны и березы в ярусе подроста. Тем не менее на большинстве (21 из 26) из постпирогенных точек NDVI ниже в сравнении с невыгоревшими участками в среднем на 0,012. На пяти постпирогенных точках, относящихся к разным кластерам, значения NDVI оказались равны или даже выше невыгоревших точек. Высокие значения NDVI отмечены даже на точках, относящихся ко второму кластеру с высокой пирогенной нагрузкой и низкой интенсивностью восстановления, за

счет высокого проективного покрытия зеленым мхом *P. strictum* и присутствием березы в ярусе подроста.

Таблица 3

Значения растительных и водных индексов для кластеров

Кластеры	NDVI	VARI	NBR	NDWI	WRI
1	0,636 (0,611–0,655)	–0,095 (–0,108...–0,081)	0,286 (0,278–0,294)	0,099 (0,049–0,144)	0,231 (0,226–0,237)
2	0,644 (0,633–0,649)	–0,088 (–0,102...–0,068)	0,288 (0,286–0,291)	0,097 (0,084–0,105)	0,226 (0,221–0,233)
3	0,650 (0,636–0,661)	–0,088 (–0,096...–0,079)	0,290 (0,284–0,296)	0,144 (0,118–0,161)	0,230 (0,226–0,235)
4	0,644 (0,625–0,668)	–0,085 (–0,102...–0,073)	0,290 (0,286–0,296)	0,137 (0,082–0,201)	0,233 (0,227–0,237)
5	0,639 (0,632–0,646)	–0,093 (–0,099...–0,087)	0,281 (0,281–0,282)	0,090 (0,063–0,118)	0,227 (0,226–0,229)
Среднее для постпироген- ных точек	0,641 (0,611–0,668)	–0,091 (–0,108...–0,068)	0,287 (0,278–0,296)	0,108 (0,049–0,201)	0,230 (0,221–0,237)
BF6	0,674	–0,057	0,318	0,228	0,230
Невыгоревшие точки	0,649 (0,643–0,655)	–0,071 (–0,088...–0,053)	0,298 (0,294–0,303)	0,170 (0,157–0,184)	0,242 (0,240–0,244)

Таким образом, с использованием NDVI оказалось невозможно оценить интенсивность восстановления исходной болотной растительности за счет его сильного отклика на присутствие видов, нехарактерных для верховых болот. Действительно, по результатам факторного анализа NDVI имеет низкие факторные нагрузки по первым двум факторным осям и имеет незначительную зависимость (0,65) с проективным покрытием травяным ярусом на третьей факторной оси (рис. 3, *b*). Схожие закономерности были отмечены в результате исследования О. С. Сизова с соавторами [Оценка постпирогенной динамики ... , 2020], в котором на участках гарей в зоне лесотундры зафиксировано длительное сохранение лиственной растительности вместо естественной мохово-лишайниковой.

Значения вегетационного индекса VARI изменяются в пределах от –0,108 до –0,053. Максимальные значения характерны для невыгоревшей точки и точки BF6. Минимальное значение отмечено на одной из точек первого кластера с отсутствием сохранившихся сосен, подроста березы и низким проективным покрытием *P. strictum*. На всех постпирогенных точках значение VARI оказалось ниже в сравнении с невыгоревшими точками в среднем на 0,020. Факторный анализ показал, что VARI имеет более высокие факторные нагрузки в сравнении с NDVI, но они продолжают оставаться незначительными. На первой факторной оси VARI показал обратную зависимость (0,53) с долей выгорания поверхности (–0,92), толщиной горелого слоя (–0,71), проективным покрытием *P. strictum* (–0,82) и прямую с проективным покрытием сохранившихся сосен (0,67) и сфагновыми мхами (0,83). На второй факторной оси отражены зависимости VARI (–0,59) от характеристик растительного покрова, обусловленных уровнем болотных вод – прямая с проективным покрытием березой (–0,67) и обратная с проективным покры-

тием травяным ярусом (0,67) и уровнем болотных вод (0,64). Таким образом, индекс оказался более показательным в сравнении с NDVI при оценке состояния постпирогенных верховых болот (рис. 3, *c*).

Значения индекса NBR изменяются в пределах 0,28 на постпирогенной точке первого кластера до 0,32 на точке BF6. На всех постпирогенных точках значение индекса оказалось ниже в сравнении с невыгоревшими в среднем на 0,011. NBR показал максимальную факторную нагрузку на первой оси среди рассмотренных вегетационных индексов, составляющую 0,62, и отражает те же зависимости, которые были отмечены для VARI (рис. 3, *d*).

Водный индекс NDWI имеет схожие закономерности распределения между точками с растительными индексами. Максимальное значение 0,32 характерно для точки BF6, минимальное 0,049 отмечено на той же точке, что и NBR. На всех постпирогенных точках, за исключением одной, значения NDWI ниже в сравнении с невыгоревшими в среднем на 0,066. Факторный анализ показал высокую факторную нагрузку на первой факторной оси (–0,74) и значимые обратные зависимости с долей выгоревшей поверхности (0,91) и проективным покрытием *P. strictum* (0,84) и прямую с проективным покрытием сфагновыми мхами (–0,86). При этом на второй факторной оси, отражающей влияние уровня болотных вод, значение факторной нагрузки близко к нулю (рис. 3, *e*). На основании этого сделан вывод, что NDWI нецелесообразно использовать для оценки уровня болотных вод при его отрицательных значениях, но он является хорошим индикатором интенсивности пирогенной нагрузки и интенсивности восстановления верхового болота.

Водный индекс WRI имеет также максимальное значение на невыгоревших точках (0,233), минимальное значение 0,221 отмечено на точке второго кластера, для которого в целом характерны низкие значения индекса (см. табл. 3). Таким образом, низкие значения индекса характерны для наиболее нарушенных участков постпирогенных болот. Индекс имеет значимые факторные нагрузки только на первой факторной оси (0,64) и имеет схожие закономерности с NDWI (рис. 3, *f*).

Значения всех рассмотренных индексов, за исключением NDVI, ниже на постпирогенных точках в сравнении с невыгоревшими. Максимальные значения индексов, за исключением WRI, отмечены на точке в пределах контура пожара начала 1990-х гг., что обусловлено восстановлением исходной болотной растительности и высоким проективным покрытием деревьями, которое оказалось даже выше в сравнении с невыгоревшими точками. Из всех рассмотренных растительных и водных индексов NDWI показал наибольшую факторную нагрузку и отражает долю выгорания поверхности и проективное покрытие сфагновыми мхами и *P. strictum*. Проективное покрытие древесным ярусом в лучшей степени отражает WRI. Водные индексы оказались более пригодными в сравнении с вегетационными для оценки пирогенной нагрузки и тенденций постпирогенного восстановления в условиях верховых болот, что согласуется с результатами исследований, представленных в работах [Зраенко, 2019; Муравьева, 2020; Муравьева, 2023; Spectral detection ... , 2014].

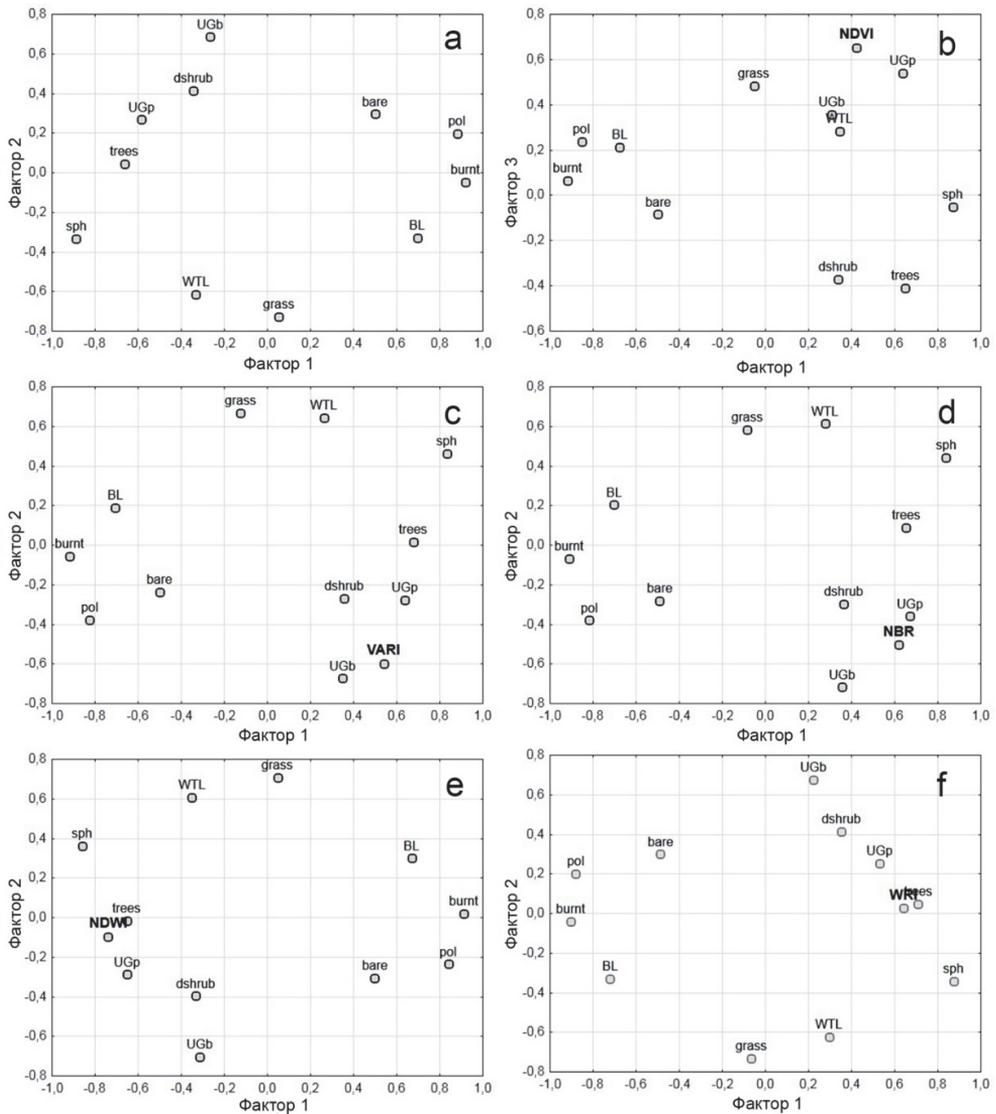


Рис. 3. Результаты факторного анализа показателей растительного покрова и растительных и водных индексов:

WTL – уровень болотных вод, burnt – доля выгоревшей поверхности, BL – толщина горелого слоя, bare – доля открытой поверхности; проективное покрытие: trees – сохранившийся древесный ярус, UGp – подрост сосны, UGb – подрост березы, dshrub – кустарничковый ярус, grass – травяной ярус, pol – *Polytrichum strictum*, sph – сфагновые мхи

Выводы

Влияние пожара на верховом болоте проявилось в частичном или полном обгорании поверхности торфяной залежи и образовании горелого слоя, частичном или полном выгорании деревьев, кустарничков и мхов. Через семь лет после пожара произошло практически полное восстановление ку-

старничкового яруса, на большинстве точек отмечено появление подроста сосны и березы, интенсивное зарастание выгоревших поверхностей *Polytrichum strictum*, началось восстановление сфагновых мхов, интенсивность которого отличается между точками.

Водные индексы NDWI и WRI оказались более пригодными в сравнении с вегетационными для оценки степени пирогенной нагрузки, определяющей долей выгорания поверхности, толщиной горелого слоя и присутствием сохранившихся после пожара живых деревьев.

Водный индекс NDWI в лучшей степени отражает проективное покрытие сфагновыми мхами, поэтому его целесообразно использовать при оценке постпирогенного восстановления верховых болот.

Полученные результаты будут использованы для создания обучающих выборок при дешифрировании спутниковых данных и проведение пространственно-временной оценки восстановления постпирогенных участков в пределах верховых болот Западной Сибири.

Список литературы

Глухова Т. В., Сирин А. А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>

Дюкарев Е. А., Алексеева М. Н., Головацкая Е. А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исследование Земли и космоса. 2017. № 2. С. 38–51. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020014>

Зраенко С. М. Анализ алгоритмов обнаружения заболоченных лесных участков по космическим снимкам // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 9. С. 23–25.

Исследование постпожарной динамики лесной растительности / Е. В. Самофал, Ф. В. Стыценко, С. А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 18-й Всерос. открытой конф. М. : ИКИ РАН, 2020. С. 359. <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>

Копотева Т. А., Кушцова В. А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21. <https://doi.org/10.7868/S0367059715060086>

Корниенко С. Г. Изучение трансформаций тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 1. С. 93–104. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(93-104\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104))

Крутских Н. В., Миронов В. Л., Рязанцев П. А. Использование ГИС-технологий для обеспечения работ по изучению болотных массивов // ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС. 2018. № 1(24). С. 405–418. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418>

Курбатова И. Е., Верещака Т. В., Иванова А. А. Космический мониторинг трансформации болотных ландшафтов в условиях антропогенных воздействий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. № 18(4). С. 216–227. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227>

Малащук А. А., Филиппов Д. А. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2021. № 4(1). С. 104–121. <https://doi.org/10.23859/estr-200512>

Муравьева Л. В. Изучение многолетней динамики природно-антропогенных комплексов нарушенных болот с помощью снимков Landsat // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2020. № 1(29). С. 52–60. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-52-60>

Муравьева Л. В. Пространственно-временная неоднородность теплового поля нарушенного участка болота Оршинский Мох по данным спутника Landsat // Вестник Тверского госу-

дарственного университета. Серия: География и геоэкология. 2019. № 4 (28). С. 57–63. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2019-4-57-63>

Муравьева Л. В. Распространение пожаров и их влияние на развитие природно-антропогенных комплексов болота Васильевский мох // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2023. № 1 (41). С. 47–55. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2023-1-47-55>

Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 / О. Н. Бульгина, В. Н. Разуваев, Коршунова Н. Н. и др.

Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения / О. С. Сизов, П. Р. Цымбарович, Е. В. Ежова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 4. С. 137–153. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153>

Паршин А. О. Разработка методики определения заболоченности территории при помощи данных ДЗЗ // Наукосфера. 2021. № 6(2). С. 109–112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5016357>

Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири / Д. В. Московченко, С. П. Арефьев, М. Д. Московченко [и др.] // Сибирский экологический журнал. 2020. № 2. С. 243–255. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200210>

Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С. А. Барталев, Ф. В. Стыценко, В. А. Егоров [и др.] // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Стыценко Ф. В., Сайгин И. А., Барталев С. А. Методика ежегодной актуализации данных о площадях необлесенных гарей на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 19-й Междунар. конф. М. : ИКИ РАН, 2021. С. 381. <https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>

Тигеев А. А., Московченко Д. В., Фахретдинов А. В. Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 166–177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>

Ткаченко А. Е., Короткова Е. М. Мониторинг территории заповедника «Васюганский» по данным ДЗЗ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 7, № 1. С. 151–156.

Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири / А. А. Синюткина, Л. П. Гашкова, А. А. Малолетко [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 196–223. <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10>

A highly automated algorithm for wetland detection using multi-temporal optical satellite data / C. Ludwig, A. Walli, C. Schleicher [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2019. No. 224. P. 333–351. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.017>

Benscoter B. W., Vitt D. H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // Ecosystems. 2008. N 11. P. 1054–1064. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>

Davranche A., Lefebvre G., Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series // Remote Sensing of Environment. 2010. N 114. P. 552–562.

Di Vittorio C. A., Georgakakos A. P. Land cover classification and wetland inundation mapping using MODIS // Remote Sensing of Environment. 2018. N 204. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.001>

Ghosh S., Mishra D. R., Gitelson A. A. Long-term monitoring of biophysical characteristics of tidal wetlands in the northern Gulf of Mexico – A methodological approach using MODIS // Remote Sensing of Environment. 2016. N 173. P. 39–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.015>

Gunnarsson U. Global patterns of Sphagnum productivity // Journal of Bryology. 2005. N 27. P. 269–279. <https://doi.org/10.1179/174328205X70029>

Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes / A. M. Laine, L. Mehtatalo, A. Tolvanen [et al.] // Science of the Total Environment. 2019. N 647. P. 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.390>

Minkinen K., Laine J. Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland // Canadian Journal of Forest Research. 1998. N 28. P. 178–186. <https://doi.org/10.1139/cjfr-28-2-178>

Multispectral satellite based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow Region (Russia) / A. A. Sirin, M. A. Medvedeva, D. A. Makarov [et al.] // Ecological Engineering. 2020. N 158. 106044. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>

Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands / K. Nelson, D. Thompson, C. Hopkinson [et al.] // Science of the Total Environment. 2021. N 769. 145212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145212>

Petus C., Lewis M., White D. Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI // Ecological Indicators. 2013. N 34. P. 41–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.04.009>

Plant Litter Decomposition and Nutrient Release in Peatlands / L. Bragazza, A. Buttler, A. Siegenthaler [et al.] // Carbon Cycling in Northern Peatlands. 2009. N 184. P. 99–110. <https://doi.org/10.1029/2008GM000815>

Questioning ten common assumptions about peatlands / K. L. Bacon, A. J. Baird, A. Blundell [et al.] // Mire Peat. 2017. N 19(12), P. 1–23. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.253>

Rebelo L. M., Finlayson C. M., Nagabhatla N. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis // Journal of Environmental Management. 2009. N 90. P. 2144–2153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>

Rein G., Huang X. Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives // Environmental Science and Health. 2021. N 24. 100296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>

Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // Catena. 2021. N 205. 105464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Spectral analysis of wetland using multi-source optical satellite imagery / M. Amani, B. Salehi, S. Mahdavi [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. N 144. P. 119–136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005>

Spectral detection of near-surface moisture content and water-table position in northern peatland ecosystems / K. M. Meingast, M. J. Falkowski, E. S. Kane [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2014. N 152. P. 536–546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.014>

Using digital camera and Landsat imagery with eddy covariance data to model gross primary production in restored wetlands / S. H. Knox, I. Dronova, C. Sturtevant [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. 237–238. P. 233–245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.020>

References

Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian soil science*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 542-549. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>

Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A. Issledovanie rastitelnogo pokrova bolotnykh ekosistem po sputnikovym dannym [Study of Wetland Ecosystem Vegetation Using Satellite Data]. *Issledovanie Zemli ikh kosmosa* [Exploring the Earth from Space], 2017, no. 2, pp. 38-51. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020014> (in Russian)

Zraenko S.M. Analiz algoritmov obnaruzheniya zabolochennykh lesnykh uchastkov po kosmicheskim snimkam [Analysis of the possibilities of detecting waterflogged forest sections by Space images]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical Volga region bulletin], 2019, no. 9, pp. 23-25. (in Russian)

Samofal E.V., Stytsenko F.V., Bartalev S.A. et al. Issledovanie postpozharnoi dinamiki lesnoi rastitel'nosti [Research of post-fire dynamics of forest vegetation]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Proc. of the 18th Russian Open Conf.]. Moscow, IKI RAS Publ., 2020, P. 359. <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a> (in Russian)

Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland. *Russian journal of ecology*, 2016, vol. 47, no. 1, p. 11-18. <https://doi.org/10.7868/S0367059715060086> (in Russian)

Kornienko S.G. Izuchenie transformatsii tundrovogo napochvennogo pokrova na uchastkakh pirogenno porazheniya po dannym sputnikov Landsat [Transformation of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance: studies based on Landsat satellite data]. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2017, vol. 31, no. 1, pp. 93-104. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(93-104\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104)) (in Russian)

Krutsikh N.V., Mironov V.L., Ryazantsev P.A. Ispolzovanie GIS-tekhnologii dlya obespecheniya rabot po izucheniyu bolotnykh massivov [The use of GIS-technologies for mire studies]. *Interkarto. InterGIS* [InterCarto.InterGIS], 2018, no. 1(24), pp. 405-418. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418> (in Russian)

Kurbatova I.E., Vereshchaka T.V., Ivanova A.A. Kosmicheskii monitoring transformatsii bolotnykh landshaftov v usloviyakh antropogennykh vozdeistvii [Space monitoring bog landscape transformation under anthropogenic impact conditions]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2021, vol. 18, no. 4, pp 216-227. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227> (in Russian)

Malashchuk A.A., Filippov D.A. Postpirogennaya dinamika rastitel'nogo pokrova verkhovogo bolota Barskoe (Vologodskaya oblast) [Post-pyrogenic dynamics of the vegetation cover of the Barskoe raised bog (Vologda Region, Russia)]. *Transformatsiya ekosistem* [Ecosystem Transformation], 2021, vol. 4, no. 1, pp. 104-121. <https://doi.org/10.23859/estr-200512> (in Russian)

Murav'eva L.V. Izuchenie mnogoletnei dinamiki prirodno-antropogennykh kompleksov narushennykh bolot s pomoshch'yu snimkov Landsat [Study of the multi-year dynamics of natural-anthropogenic complexes of disturbed bogs by using Landsat pictures]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Geografiya i geoekologiya"* [Herald of Tver state university. Series: geography and geoecology], 2020, no. 1(29), pp. 52-60. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-52-60> (in Russian)

Murav'eva L.V. Prostranstvenno-vremennaya neodnorodnost teplovogo polya narushennogo uchastka bolota orshinskii mokh po dannym sputnika Landsat [Spatial-temporal heterogeneity of the thermal field of the disturbed part of Orshinsky moss according to the Landsat satellite]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Geografiya i geoekologiya"* [Herald of Tver state university. Series: geography and geoecology], 2019, no. 4 (28), pp. 57-63. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2019-4-57-63> (in Russian)

Murav'eva L.V. Rasprostranenie pozharov i ikh vliyanie na razvitie prirodno-antropogennykh kompleksov bolota Vasil'evskii mokh [The spread of fires and their influence on the development of natural-anthropogenic complexes of the swamp Vasilievsky mokh]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Geografiya i geoekologiya"* [Herald of Tver state university. Series: geography and geoecology], 2023, no. 1(41), pp. 47-55. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2023-1-47-55> (in Russian)

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. et al. "Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh rossii". Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2015620394 [Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations". Certificate of state registration of the database, no. 2015620394]. (in Russian)

Sizov O.S., Tsymbarovich P.R., Ezhova E.V. et al. Otsenka postpirogennoi dinamiki tundrovoy rastitelnosti na severe Zapadnoi Sibiri za poslednie 50 let (1968-2018) na osnove dannykh DZZ detalnogo i vysokogo razresheniya [Assessment of the post-pyrogenic dynamics of tundra vegetation in the northern part of Western Siberia over the past 50 years (1968-2018) based on detailed and high resolution remote sensing data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2020, vol. 17, no. 4, pp. 137-153. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153> (in Russian)

Parshin A.O. Razrabotka metodiki opredeleniya zabolochennosti territorii pri pomoshchi dannykh DZZ [Development of a methodology for determining the wetness of the territory using remote sensing data]. *Naukosfera*, 2021, no. 6(2), pp. 109-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5016357> (in Russian)

Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko M.D. et al. Prostranstvenno-vremennoi analiz prirodnnykh pozharov v lesotundre Zapadnoi Sibiri [Spatio-temporal analysis of wildfires in the forest-tundra of Western Siberia]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2020, no. 2, pp. 243-255. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200210> (in Russian)

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A. et al. Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov [Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 2, pp. 83-94. (in Russian)

Stytsenko F.V., Saigin I.A., Bartalev S.A. Metodika ezhegodnoi aktualizatsii dannykh o ploshchadyakh neoblesennykh garei na territorii Rossii [The methodology of annual updating of data on the areas of unforested hares in Russia]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Proc. of the 18th Russian Open Conf.]. Moscow: IKI RAN, 2021, P. 381. <https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a> (in Russian)

Tigeev A.A., Moskovchenko D.V., Fakhretdinov A.V. Sovremennaya dinamika prirodnoi i antropogennoi rastitel'nosti zony predtundrovyykh lesov Zapadnoi Sibiri po dannym vegetatsionnogo indeksa [Current trends in natural and anthropogenic vegetation in Western Siberia's sub-tundra forests based on vegetation indices data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 166-177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177> (in Russian)

Tkachenko A.E., Korotkova E.M. Monitoring territorii zapovednika "Vasyuganskii" po dannym DZZ [Monitoring of the Vasyuganskiy Nature Reserve territory based on Remote Sensing Data]. *Interespo Geo-Sibir* [Interexpo GEO-Siberia], 2022, vol. 7, no. 1, pp. 151-156. (in Russian)

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Yu.A. Transformatsiya poverkhnosti i rastitel'nogo pokrova osushennykh verkhovykh bolot yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri [Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2018, no. 43, pp. 196-223. <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10> (in Russian)

Ludwig C., Walli A., Schleicher C. et al. A highly automated algorithm for wetland detection using multi-temporal optical satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2019, no. 224, pp. 333-351. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.017>

Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence. *Ecosystems*, 2008, no. 11, pp. 1054-1064. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>

Davranche A., Lefebvre G., Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, no. 114, pp. 552-562.

Di Vittorio C.A. Georgakakos A. P. Land cover classification and wetland inundation mapping using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2018, no. 204, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.001>

Ghosh S., Mishra D.R., Gitelson A.A. Long-term monitoring of biophysical characteristics of tidal wetlands in the northern Gulf of Mexico – A methodological approach using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2016, no. 173, pp. 39-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.015>

Gunnarsson U. Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of Bryology*, 2005, no. 27, pp. 269-279. <https://doi.org/10.1179/174328205X70029>.

Laine A.M., Mehtatalo L., Tolvanen A. et al. Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes. *Science of the Total Environment*, 2019, no. 647, pp. 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.390>.

Minkinen K., Laine J. Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, no. 28, pp. 178-186. <https://doi.org/10.1139/cjfr-28-2-178>

Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A. et al. Multispectral satellite based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow Region (Russia). *Ecological Engineering*, 2020, no. 158, 106044. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>

Nelson K., Thompson D., Hopkinson C. et al. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands. *Science of the Total Environment*, 2021, no. 769, 145212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145212>

Petus C., Lewis M., White D. Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI. *Ecological Indicators*, 2013, no. 34, pp. 41-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.04.009>

Bragazza L., Buttler A., Siegenthaler A. et al. Plant Litter Decomposition and Nutrient Release in Peatlands. *Carbon Cycling in Northern Peatlands*, 2009, no. 184, pp. 99-110. <https://doi.org/10.1029/2008GM000815>.

Bacon K.L., Baird A.J., Blundell A. et al. Questioning ten common assumptions about peatlands. *Mire Peat*, 2017, no. 19(12), pp. 1-23. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.253>.

Rebello L.M., Finlayson C.M., Nagabhatla N. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management*, 2009, no. 90, pp. 2144-2153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>

Rein G., Huang X. Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives. *Environmental Science and Health*, 2021, no. 24, 100296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>

Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*, 2021, no. 205, 105464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Amani M., Salehi B., Mahdavi S., Brisco B. Spectral analysis of wetland using multi-source optical satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, no. 144, pp. 119-136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005>

Meingast K.M., Falkowski M.J., Kane E.S., Potvin L.R., Benscoter B.W., Smith A.M.S., Bourgeau-Chavez L.L., Miller M.E. Spectral detection of near-surface moisture content and water-table position in northern peatland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2014, no. 152, pp. 536-546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.014>

Knox S.H. Dronova I., Sturtevant C., Oikawa P.Y., Matthes J.H., Verfaillie J., Baldocchi D. Using digital camera and Landsat imagery with eddy covariance data to model gross primary production in restored wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, no. 237-238, pp. 233-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.020>

Сведения об авторе

Синюткина Анна Алексеевна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
Сибирский научно-исследовательский
институт сельского хозяйства и торфа –
филиал Сибирского федерального научного
центра агробиотехнологий РАН
634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3
e-mail: ankalaeva@yandex.ru

Information about the author

Sinyutkina Anna Alekseevna
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Researcher
Siberian Research Institute of Agriculture and
Peat – branch of the Siberian Federal Scientific
Centre of Agro-Bio Technologies RAS
3, Gagarin st., Tomsk, 634050,
Russian Federation
e-mail: ankalaeva@yandex.ru

Код научной специальности: 1.6.12

Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 07.05.2024; принята к публикации 10.06.2024
The article was submitted January, 16, 2024; approved after reviewing May, 07, 2024; accepted for publication June, 10, 2024