

## Использование данных Landsat и БПЛА для оценки постпирогенной динамики осушенных верховых болот таёжной зоны Западной Сибири

А. А. Синюткина

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа —  
филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН  
Томск, 634050, Россия  
E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Использование данных ДЗЗ — надёжный и доступный метод для оценки интенсивности природных пожаров и мониторинга постпирогенного восстановления экосистем. В условиях антропогенной нагрузки болота подвержены возгораниям, которые приводят к значительным выбросам углерода в атмосферу, долгосрочным и иногда необратимым изменениям растительного покрова и нарушениям функционирования болота как поглотителя углерода. Цель исследования — разработать и апробировать методы, основанные на использовании данных съёмки с БПЛА (беспилотный летательный аппарат) для оценки состояния верховых болот в условиях постпирогенного восстановления. Объекты изучения — два осушенных верховых болота (Бакчарское и Усть-Бакчарское), расположенные в таёжной зоне Западной Сибири, горевшие в 2014 и 2016 гг. В настоящей работе использованы данные мультиспектральной съёмки с БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral, спутниковой съёмки Landsat и полевых геоботанических исследований. Сравнение значений NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс), рассчитанных на основе данных Landsat и БПЛА, показало схожую пространственную динамику, но значения, полученные с БПЛА, были выше на 0,01–0,08 ед. Факторный анализ NDVI и характеристик растительного покрова показал обратную зависимость NDVI с долей выгорания поверхности, проективным покрытием (ПП) *Polytrichum strictum* (*P. strictum*) и прямую с ПП сфагновыми мхами и сосной на Бакчарском болоте с меньшей интенсивностью осушения. На более сухом Усть-Бакчарском болоте NDVI имеет прямую зависимость с долей выгорания, ПП подростом берёзы, *P. strictum* и обратную с ПП сосной и сфагновыми мхами. Взаимосвязи NDVI с характеристиками растительного покрова болот в условиях постпирогенного восстановления индивидуальны для каждого объекта исследования. Рост индекса на одних участках может отразить восстановление растительности к исходному состоянию, как это было отмечено на Бакчарском болоте, на других, наоборот, необратимые изменения экосистемы.

**Ключевые слова:** пожар, Большое Васюганское болото, геоботанические исследования, Томская область, NDVI

Одобрена к печати: 07.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-163-172

### Введение

Климатические изменения и усиление антропогенного воздействия в последние десятилетия в бореальной зоне в целом и в Сибири в частности приводят к увеличению частоты и интенсивности природных пожаров, в том числе и на болотах, которые в период продолжительной засухи становятся объектами с высокой пожарной опасностью (Московченко и др., 2020; Feurdean et al., 2020). В естественном состоянии болота характеризуются высоким увлажнением, что и определяет их основную функцию — накопление углерода, которое происходило на протяжении всего голоцена. Освоение болот для хозяйственного использования и связанное с ним осушение в XX в. стало одним из основных факторов увеличения их горимости. Деградация болот в результате осушения и пирогенной нагрузки приводит к выбросам большого количества углерода в атмосферу, переводя их из поглотителя углерода в его источник (Moore et al., 2017). Влияние пирогенной нагрузки, проявляющееся в смене видового состава растительности, свойств торфяной залежи и гидрологических условий, продолжается на про-

тяжении длительного периода (Benscoter, Vitt, 2008), а вопрос полного восстановления экосистемных функций болота остаётся открытым, что определяет актуальность проведения исследований в данной области.

Данные дистанционного зондирования с БПЛА (беспилотный летальный аппарат) широко используются по всему миру для оценки состояния растительного покрова, картографирования поверхности и мониторинга восстановления болот после антропогенной нагрузки, в том числе в ходе вторичного обводнения ((Доронина и др., 2020; Орлов, Шахматов, 2020; Остроухов, Климина, 2020; Третьякова и др., 2022; Assiri et al., 2023; Szapiewski, 2022; Knoth et al., 2013; Lehmann et al., 2016; Simpson et al., 2024) и др.). Фотограмметрическая обработка данных беспилотной съёмки позволяет получать ортофотопланы и цифровые модели местности, разрешение которых обеспечивает возможность выделения контуров на уровне микрорельефа (Lehmann et al., 2016), что представляется особенно актуальным для верховых болот. Верховые болота характеризуются значительной дифференциацией растительного покрова, свойств торфа и гидрологических условий на микроуровне, которая увеличивается после пирогенной нагрузки. Интенсивность горения и закономерности восстановления отличаются между формами микрорельефа (Benscoter et al., 2005). Проведённое ранее исследование показало, что выгоранию чаще более подвержены понижения микрорельефа, в то время как положительные формы сохраняются либо выгорают частично (Синюткина и др., 2024). Восстановление растительности наоборот может происходить медленнее на положительных формах из-за большей трансформации условий увлажнения и формирования на поверхности торфа гидрофобного слоя (Kettridge et al., 2015; Moore et al., 2017). Поэтому при экстраполяции данных полевых исследований на точках становится важным достоверно оценить неоднородность поверхности болота.

Для оценки процессов постпирогенного восстановления природных экосистем, в том числе болот, наиболее разработанными и апробированными представляются подходы с использованием спутниковых данных, например Landsat или Sentinel, основанные на определении растительных и водных индексов, в том числе NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс), выступающем показателем фотосинтетически активной биомассы. Краткий обзор исследований представлен в статьях (Синюткина, 2024; Шинкаренко, Барталев, 2023). Методы, основанные на использовании данных съёмки БПЛА для оценки состояния болот в условиях постпирогенного восстановления, разработаны в меньшей степени, что и определило цель данного изучения. В частности, в задачи исследования входит: 1) сравнить значения вегетационного индекса NDVI, рассчитанные на основе данных Landsat и БПЛА; 2) сопоставить значения вегетационного индекса с характеристиками растительного покрова, полученными в результате полевых геоботанических исследований; 3) провести площадную оценку состояния растительного покрова постпирогенных болот.

## Объекты исследования

Объекты исследования — два ключевых участка, расположенные на Бакчарском и Усть-Бакчарском верховых болотах, в таёжной зоне Западной Сибири в пределах Томской области (*рис. 1*, см. с. 165). Климат рассматриваемой территории континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в с. Бакчар (1960–2021) составляет 0,02 °С, количество осадков — 474 мм. В растительном покрове ключевых участков до антропогенной нагрузки преобладал сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз. В 1980-х гг. на обоих болотах было проведено осушение сетью открытых каналов, на Бакчарском болоте с целью лесомелиорации (расстояние между каналами 160–200 м), на Усть-Бакчарском для добычи торфа (расстояние между каналами 40 м). После осушения болота не использовались, мероприятия, связанные с поддержанием и ремонтом осушительной сети, не проводились. Лесомелиорация на Бакчарском болоте не показала ожидаемого эффекта, выраженного в увеличении продуктивности древесного яруса, влияние осушения проявилось в смене видового

состава мхов и разрастании кустарничков. В настоящее время происходит зарастание каналов и частичное восстановление исходной растительности (Sinyutkina, 2021). В 2016 г. на площади около 5 км<sup>2</sup> произошёл пожар. На Усть-Бакчарском болоте влияние осушения было более значимым, что в результате серии пожаров привело к полному выгоранию его осушенной части. На основе анализа архивных спутниковых данных Landsat и базы данных FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) на территории болота выделено три контура пожаров 1999, 2003 и 2014 гг. Наибольшая площадь распространения пожара составила 0,9 км<sup>2</sup> в 1999 г., пожары 2003 и 2014 гг. были менее обширными, площади горения — 0,7 и 0,4 км<sup>2</sup> соответственно. Следует отметить, что контуры пожаров часто пересекаются и площадь, горевшая все три раза, равна 0,23 км<sup>2</sup>. Более подробное описание объектов исследования представлено в работе (Синюткина и др., 2024).

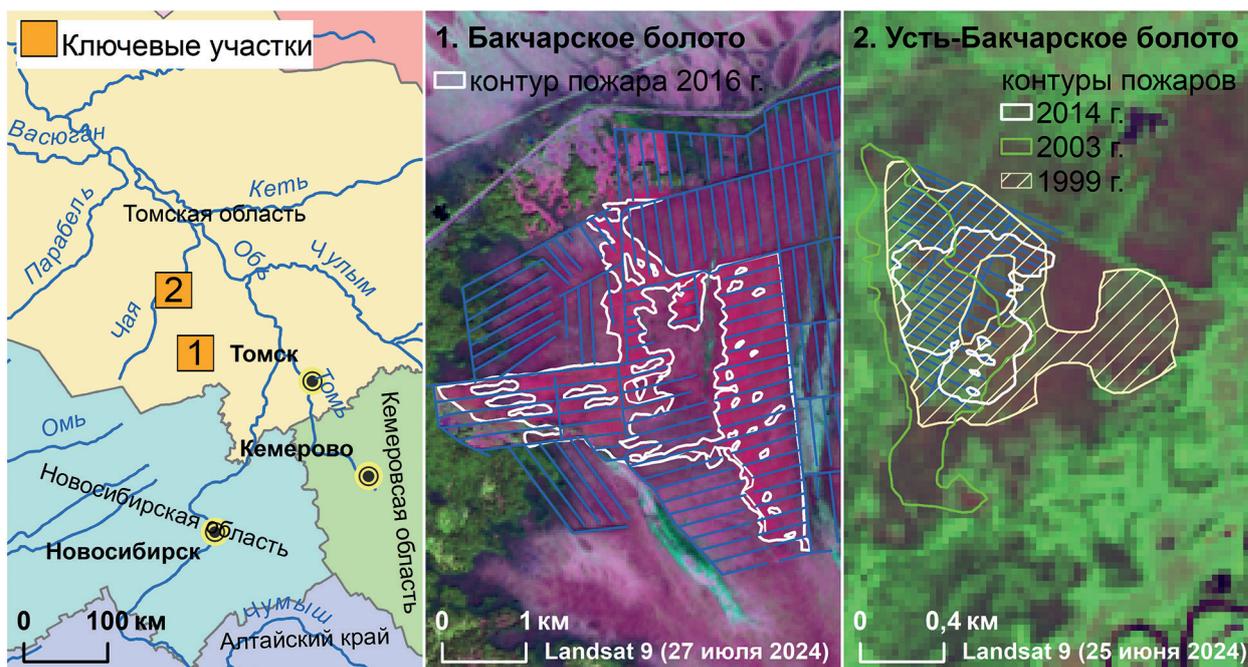


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования

## Материалы и методы

В настоящей работе использованы данные спутниковых наблюдений Landsat-9, съёмки с БПЛА и полевых исследований. Полевые геоботанические исследования проведены в 2023 г. на Бакчарском (30 площадок) и Усть-Бакчарском (16 площадок) болотах.

Мультиспектральная съёмка в синем, зелёном, красном, ближнем инфракрасном диапазонах, а также в области красного края выполнена с БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral в июле 2023 г. (табл. 1). Наблюдения проводились с высоты 150 м, пространственное разрешение составило 8 см/пиксель. Выполнено девять полётов на Бакчарском болоте, четыре — на Усть-Бакчарском, в каждом из которых было получено 95–99 снимков. Мультиспектральные изображения обработаны в программе Agisoft Metashape Professional: проведена калибровка отражательной способности с использованием данных датчика освещения; выполнено выравнивание снимков и построение облака точек; построен ортофотоплан, который был экспортирован для последующей обработки в программе QGIS (версия 7). Созданы карты современного состояния растительного покрова. Дешифрирование данных ДЗЗ проведено с использованием плагина полуавтоматической классификации SCP (англ. Semi-Automatic Classification Plugin), обучающая выборка составлялась по данным полевых описаний.

Таблица 1. Характеристики съёмочных систем, используемые для расчёта NDVI

Болото	DJI Phantom 4 Multispectral		Landsat-9 OLI/TIRS	
	Бакчарское	Усть-Бакчарское	Бакчарское	Усть-Бакчарское
Дата съёмки	26–28.07.2023	29–30.07.2023	26.08.2023	07.07.2023
Длина волны в красном диапазоне, мкм	0,650±0,016		0,64–0,67	
Длина волны в ближнем инфракрасном диапазоне, мкм	0,840±0,026		0,85–0,88	

Снимки Landsat-9 OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager и Thermal Infrared Sensor), collection 2, level 1 (*табл. 1*) получены из открытого источника USGS (*англ.* United States Geological Survey, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://libra.developmentseed.org/>, Геологическая служба США). С помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin программного обеспечения QGIS (версия 7) проведена радиометрическая и атмосферная коррекция многоканальных сцен.

В QGIS с использованием растрового калькулятора получены карты вегетационного индекса NDVI по данным БПЛА и Landsat по формуле:  $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ , где Red — отражение в красной области спектра, NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра. Определены значения NDVI для точек полевых исследований. Для этого был создан полигональный шейп-файл, состоящий из квадратов площадью 10 м<sup>2</sup>, центр которых соответствовал координатам площадок геоботанических описаний. Для этих квадратов NDVI определялся по данным съёмки с БПЛА. В связи с низким пространственным разрешением NDVI по данным Landsat определялся для 1 пикселя, включающего геоботаническую площадку, или брался для нескольких пикселей, если площадка располагалась на их границе. Проведено сопоставление NDVI, рассчитанного по мультиспектральной съёмке БПЛА, с данными по Landsat.

Для сопоставления значений NDVI с характеристиками растительного покрова проведён факторный анализ с использованием следующих переменных: доля выгорания поверхности; толщина горелого слоя; доля открытых поверхностей; проективное покрытие (ПП) взрослой сосной, подростом сосны, подростом берёзы, кустарничками, травами, сфагновыми мхами, *P. strictum*, лишайниками; NDVI по данным спутниковой съёмки Landsat; NDVI по данным съёмки с БПЛА.

## Результаты и обсуждение

### Состояние растительного покрова ключевых участков в условиях постпирогенного восстановления

На Бакчарском болоте влияние пожара 2016 г. проявилось в частичном или полном выгорании поверхности и образовании горелого слоя, частичном или полном выгорании деревьев, кустарничков и мхов. Доля выгорания поверхности на площадках изменяется от 25 до 100 % со средним значением 68 %. Через семь лет после пожара произошло практически полное восстановление кустарничкового яруса (ПП 40–80 %), на большинстве точек отмечены подрост сосны и берёзы (ПП 10 %), интенсивное зарастание выгоревших поверхностей *P. strictum*, началось восстановление сфагновых мхов, интенсивность которого различается между площадками. Тем не менее продолжает оставаться высокая доля открытых горелых поверхностей, достигающая на отдельных точках 50 %, среднее значение составляет 17 % (Синюткина, 2024). Анализ карты растительного покрова постпирогенных участков показал, что на Бакчарском болоте в пределах выгоревшего сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза преобладают поверхности, покрытые кустарничками (60 %), в том числе с присутствием мелкой сосны (высотой до 2 м), главным образом сохранившейся пятнами после

пожара. Понижения с открытыми поверхностями и частично заросшие мхами занимают 21 % площади.

На Усть-Бакчарском болоте доля выгорания большинства исследованных постпирогенных площадок приближается к 100 %, и только на площадках у границы контура пожара в пределах более обводнённых участков она ниже (около 30 %). Здесь также продолжает сохраняться высокая доля открытых поверхностей (20–30 %), отмечено зарастание *P. strictum* (ПП 10–15 %), ПП сфагновых мхов не более 10 %, ПП яруса подроста из сосны и берёзы достигает 30 %. Наблюдается полное восстановление кустарничкового яруса (ПП 70–90 %). Постпирогенное восстановление на участках старых пожаров (1999, 2003) отличается в зависимости от расположения относительно осушительной сети и расстояния между каналами. На более обводнённых участках растительность практически восстановилась — произошло возобновление древесного яруса и зарастание сфагновыми мхами, т. е. видовой состав и ПП соответствуют негоревшим участкам. На более сухих площадках восстановление сфагнового покрова не произошло, хотя присутствуют отдельные небольшие моховые подушки, ПП не превышает 20–30 %. Согласно данным съёмки с БПЛА, на Усть-Бакчарском болоте преобладают открытые поверхности (поверхности с редкой растительностью), занимающие 35 % площади. Широко распространена кустарничковая растительность — 26 %, сосны, в том числе сохранившиеся после пожара (33 %). Выделяются участки с берёзами, занимающие 4 % площади. Деревья главным образом сосредоточены вдоль каналов, а в межканальных пространствах распространены кустарнички и открытые поверхности.

### Сравнение вегетационного индекса между съёмочными системами и сопоставление с данными полевых исследований

Широкий разброс дат используемых снимков (см. табл. 1) связан с высокой облачностью в летний период 2023 г., из-за чего не удалось получить изображения в дни, близкие ко времени проведения полевых исследований и съёмки БПЛА. Тем не менее для Бакчарского и Усть-Бакчарского болот была выявлена тесная зависимость между данными (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,73$ ), но значения NDVI, полученные по спутниковым наблюдениям, были ниже в сравнении с данными съёмки БПЛА, что, вероятно, связано с максимальными запасами растительного вещества в конце июля по сравнению с более ранними и поздними датами. Преимущество использования данных съёмки в середине вегетационного периода описано в работе (Simpson et al., 2024). В период, когда растительность наиболее зелёная, многие виды показывают уникальные спектральные сигнатуры, что увеличивает различия между видами и повышает точность классификации. Индекс NDVI в этот период также будет иметь максимальные значения и наибольшие различия между контурами с разной растительностью. Следует отметить, что Бакчарское болото отличается большей сходимостью значений в сравнении с Усть-Бакчарским (рис. 2). На Бакчарском болоте NDVI в среднем отличается на 0,01, на Усть-Бакчарском — на 0,08. Это может быть связано как с особенностями сезонной динамики индекса, так и с большей пространственной неоднородностью растительности, характерной для Усть-Бакчарского болота.

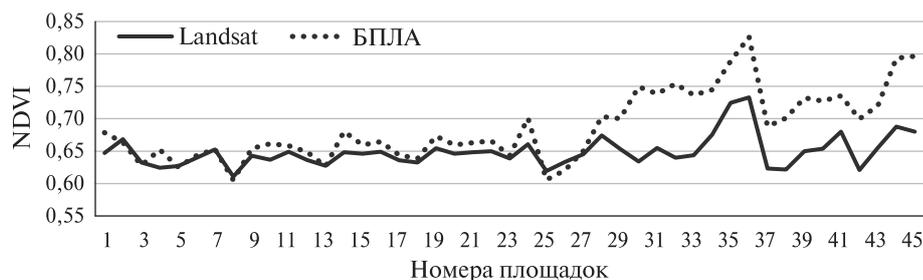


Рис. 2. Индекс NDVI по данным Landsat и БПЛА на геоботанических площадках: 1–29 — Бакчарское болото, 30–45 — Усть-Бакчарское болото

По данным мультиспектральной съёмки с БПЛА на Бакчарском болоте среднее значение NDVI на постпирогенном участке составляет 0,66, на негоревшем — 0,68. На Усть-Бакчарском болоте NDVI оказался выше в сравнении с Бакчарским болотом, наиболее низкая величина 0,70 характерна для контура естественного болота. На постпирогенных участках пожара 2014 г. NDVI изменяется в пределах 0,72–0,85. Максимальное значение отмечено в границах берёзового кустарничкового зеленомошного осушенного болота, горевшего в 1999, 2003 и 2014 гг. Минимальное — в пределах кустарничково-сфагнового осушенного болота, горевшего тоже все три раза, но с меньшей интенсивностью, что объясняется большей обводнённостью участка. Среди контуров старых пожаров NDVI выше на участке с большей пирогенной трансформацией и низкой скоростью восстановления (0,79), что схоже и даже несколько выше среднего значения для постпирогенного контура 2014 г. (0,77). Это ещё раз подтверждает отсутствие восстановления на осушенных болотах с высокой нормой осушения. Схожие тенденции были отмечены при выгорании и последующем восстановлении растительности в лесотундре Западной Сибири (Сизов и др., 2020), где произошло замещение коренной растительности из лишайников на кустарнички и подрост берёзы, которые дают более высокий NDVI. На более обводнённом участке NDVI близок к негоревшему сосново-кустарничково-сфагновому болоту (0,72).

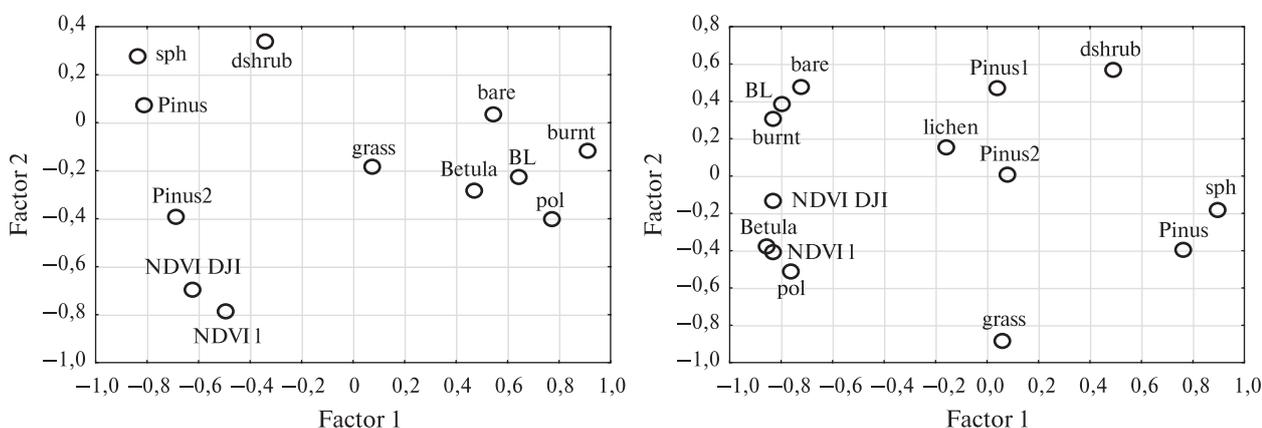


Рис. 3. Результаты факторного анализа показателей растительного покрова и NDVI для Бакчарского (слева) и Усть-Бакчарского (справа) болот. Переменные: burnt — доля выгорания поверхности, BL — толщина горелого слоя, bare — доля открытых поверхностей, проективное покрытие (Pinus — взрослая сосна; Pinus1 — подрост сосны после пожара 1999, 2003 гг.; Pinus2 — подрост сосны после пожара 2014 г.; Betula — подрост берёзы; dshrub — кустарничковый ярус; grass — травяной ярус; sph — сфагновые мхи; pol — *Polytrichum strictum*; lichen — лишайники), NDVI 1 — NDVI по данным спутниковой съёмки Landsat 7 июля 2023 г., NDVI DJI — NDVI по данным съёмки БПЛА DJI Phantom 26–30 июля 2023 г.

Факторный анализ NDVI и характеристик растительного покрова показал, что NDVI может быть как выше, так и ниже на постпирогенных участках в сравнении с негоревшими или участками старых пожаров. На Бакчарском болоте NDVI ниже на постпирогенных площадках и находится в обратной зависимости с долей выгорания поверхности, ПП *P. strictum* и в прямой с ПП сфагновыми мхами и ПП сосной. Таким образом, на Бакчарском болоте NDVI в некоторой степени отражает интенсивность постпирогенного восстановления исходной растительности верхового болота. На Усть-Бакчарском болоте, наоборот, максимальные значения NDVI характерны для наиболее выгоревших площадок, заросших берёзой, а минимальные — наблюдаются на негоревших площадках сосново-кустарничково-сфагнового болота. Индекс NDVI находится в прямой зависимости с долей выгорания, ПП подростом берёзы, *P. strictum* и в обратной — с ПП сосной и сфагновыми мхами. Снижение NDVI здесь станет индикатором восстановления болотной растительности (рис. 3).

Таким образом, совместное использование данных спутниковой съёмки Landsat, аэрофотосъёмки с БПЛА и полевых исследований представляется эффективным методом для оценки динамики растительного покрова болот, в том числе сфагновых мхов, являющихся основным торфообразователем на верховых болотах (Kolari et al., 2022).

## Заключение

Значения NDVI, рассчитанные по данным БПЛА, имеют схожую пространственную динамику с данными Landsat, но оказались выше на большей части точек геоботанических описаний на обоих ключевых участках. Различия обусловлены, главным образом, разницей между датами получения данных, связанной с высокой облачностью на территории исследования.

Следует отметить, что через 7–9 лет после пожара проблематично определить площадь горелых поверхностей по данным дистанционного зондирования, в том числе и с использованием БПЛА, в связи с интенсивным зарастанием кустарничками, частичным восстановлением мхов, появлением подроста деревьев. Тем не менее статистический анализ данных показал высокие факторные нагрузки для доли выгорания поверхности и значений NDVI. На Усть-Бакчарском болоте на сохранившихся после пожара участках или на участках с низкой пирогенной нагрузкой значения NDVI оказались ниже в сравнении с участками, характеризующимися высокой интенсивностью пожара и сильной трансформацией видового состава растительного покрова. Снижение NDVI здесь выступит индикатором восстановления болотной растительности. На постпирогенном участке Бакчарского болота NDVI оказался ниже в сравнении с естественным. Здесь NDVI в некоторой степени отражает интенсивность постпирогенного восстановления растительности к исходному состоянию.

Интенсивность выгорания и современное состояние растительного покрова различаются между двумя ключевыми участками, что объясняется разными условиями увлажнения, связанными с особенностями осушения болот. По данным полевых исследований выявлено, что на более сухом Усть-Бакчарском болоте площадь горелых поверхностей достигает 100 %, на более увлажнённом Бакчарском болоте — в среднем составляет около 70 %. Различия сохраняются и в процессе постпирогенного зарастания и выражаются в большем распространении площадей с открытыми поверхностями на Усть-Бакчарском болоте в сравнении с Бакчарским (21 и 35 % соответственно).

Таким образом, взаимосвязь NDVI с характеристиками растительного покрова болот в условиях постпирогенного восстановления индивидуальна для каждого объекта исследования и определяется исходным состоянием экосистемы, интенсивностью пожара, обуславливающими закономерности постпирогенных сукцессий. Рост индекса на одних участках может отразить восстановление растительности к исходному состоянию, на других, наоборот, необратимые изменения экосистемы. Поэтому для достоверной интерпретации данных дистанционного зондирования необходимо использование материалов полевых исследований на ключевых площадках в пределах каждого объекта исследования.

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

## Литература

1. Доронина А. Ю., Галанина О. В., Смагин В. А., Орлов Т. В. Болота Лемболовской возвышенности (Ленинградская область) // Ботанический журн. 2020. Т. 105. № 9. С. 909–918. DOI: 10.31857/S0006813620090033.
2. 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. Т. 27. № 2. С. 243–255. DOI: 10.15372/SEJ20200210.

3. Орлов Т. В., Шахматов К. Л. Анализ эффективности работ по вторичному обводнению торфяников Тверской области с помощью данных дистанционного зондирования // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 6. С. 74–82. DOI: 10.31857/S0869780920060089.
4. Остроухов А. В., Климина Е. М. Ландшафтное картирование труднодоступных территорий с использованием геоинформационных технологий (на примере особо охраняемых территорий Хабаровского края) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 139–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-139-149.
5. Сизов О. С., Цымбарович П. Р., Ежова Е. В. 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 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 137–153. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153.
6. Синюткина А. А. Использование вегетационных и водных индексов для оценки состояния постпирогенных верховых болот Западной Сибири // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2024. Т. 48. С. 90–109. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.48.90.
7. Синюткина А. А., Гашкова Л. П., Харанжевская Ю. А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 1. С. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.
8. Третьякова А. С., Груданов Н. Ю., Вахрушева А. Д. и др. Флора охраняемых болот южной части Свердловской области: Сообщение 1 // Растительный мир Азиатской России. 2022. Т. 15. № 4. С. 280–292. DOI: 10.15372/RMAR20220403.
9. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Применение данных дистанционного зондирования для широкомасштабного мониторинга водно-болотных угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 9–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
10. Assiri M., Sartori A., Persichetti A. et al. Leaf area index and aboveground biomass estimation of an alpine peatland with a UAV multi-sensor approach // GIScience and Remote Sensing. 2023. V. 60. Iss. 1. Article 2270791. DOI: 10.1080/15481603.2023.2270791.
11. Benscoter B. W., Vitt D. H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // Ecosystems. 2008. V. 11. P. 1054–1064. DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.
12. Benscoter B. W., Vitt D. H., Wieder R. K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs // Canadian J. Forest Research. 2005. V. 35. No. 9. P. 2188–2193.
13. Czapiewski S. Assessment of the applicability of UAV for the creation of digital surface model of a small peatland // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. Article 834923. DOI: 10.3389/feart.2022.834923.
14. Feurdean A., Florescu G., Tanțău I. et al. Recent fire regime in the southern boreal forests of Western Siberia is unprecedented in the last five millennia // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 244. Article 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
15. Kettridge N., Turetsky M. R., Sherwood J. H. et al. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift // Scientific Reports. 2015. V. 5. Article 8063. DOI: 10.1038/srep08063.
16. Knoth C., Klein B., Prinz T., Kleinebecker T. Unmanned aerial vehicles as innovative remote sensing platforms for high-resolution infrared imagery to support restoration monitoring in cut-over bogs // Applied Vegetation Science. 2013. V. 16. Iss. 3. P. 509–517. DOI: 10.1111/avsc.12024.
17. Kolari T. H. M., Sallinen A., Wolff F. et al. Ongoing fen–bog transition in a boreal aapa mire inferred from repeated field sampling, aerial images, and Landsat data // Ecosystems. 2022. V. 25. P. 1166–1188. DOI: 10.1007/s10021-021-00708-7.
18. Lehmann J. R. K., Münchberger W., Knoth C. et al. High-resolution classification of South Patagonian peat bog microforms reveals potential gaps in up-scaled CH<sub>4</sub> fluxes by use of unmanned aerial system (UAS) and CIR imagery // Remote Sensing. 2016. V. 8. Iss. 3. Article 173. DOI: 10.3390/rs8030173.
19. Moore P. A., Lukenbach M. C., Kettridge N. et al. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity // J. Hydrology. 2017. V. 554. P. 656–665. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.036.
20. Simpson G., Nichol C. J., Wade T. et al. Species-level classification of peatland vegetation using ultra-high-resolution UAV imagery // Drones. 2024. V. 8. Iss. 3. Article 97. DOI: 10.3390/drones8030097.
21. 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. V. 205. Article 105464. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.

## Using Landsat and UAV data to assess post-pyrogenic dynamics of drained raised bogs in the taiga zone of Western Siberia

A. A. Sinyutkina

*Siberian Research Institute of Agriculture and Peat — Division of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies RAS, Tomsk 634050, Russia  
E-mail: ankalaeva@yandex.ru*

The use of Earth remote sensing data is a reliable and affordable method for assessing the intensity of wildfires and monitoring post-pyrogenic ecosystem restoration. Under anthropogenic stress, mires are prone to fires that lead to significant carbon emissions into the atmosphere, long-term and sometimes irreversible changes in vegetation cover and disruptions in the functioning of the mire as a carbon sink. The purpose of the study is to develop and test methods based on the use of UAV survey data to assess the state of raised bogs in conditions of post-pyrogenic restoration. The objects of the study are two drained raised bogs (Bakchar and Ust-Bakchar) located in the taiga zone of Western Siberia. They burned in 2014 and 2016. The study uses data from multispectral imagery from the DJI Phantom 4 Multispectral UAV, Landsat satellite imagery and field geobotanical research. A comparison of the values of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculated on the basis of Landsat and UAV data shows similar spatial dynamics, but the values obtained from the UAV are higher by 0.01–0.08 units. A factor analysis of NDVI values and vegetation cover characteristics shows an inverse relationship of NDVI with the proportion of surface burnout, the projective cover (PC) of *Polytrichum strictum* and a direct relationship with PC of sphagnum mosses and pine in the Bakchar bog with lower drainage intensity. In the drier Ust-Bakchar bog, NDVI has a direct relationship with the proportion of burnout, PC of birch undergrowth, *P. strictum* and an inverse relationship with PC of pine and sphagnum mosses. The interrelationships of NDVI values with the characteristics of the vegetation cover of raised bogs in conditions of post-pyrogenic restoration are individual for each object of study. An increase in the index may reflect restoration of vegetation to its original state on some sites, as is noted on the Bakchar bog, while on other bogs, on the contrary, irreversible changes in the ecosystem.

**Keywords:** wildfire, Great Vasyugan mire, geobotanical research, Tomsk region, NDVI

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-77-10024.

Accepted: 07.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-163-172

### References

1. Doronina A. Yu., Galanina O. V., Smagin V. A., Orlov T. V., Bogs of the Lembolovskaya upland (Leningrad Region), *Botanical J.*, 2020, V. 105, No. 9, pp. 909–918 (in Russian), DOI: 10.31857/S0006813620090033.
2. Moskovchenko D. V., Aref'ev S. P., Moskovchenko M. D., Yurtaev A. A., Spatio-temporal 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.
3. Orlov T. V., Shakhmatov K. L., Efficiency analysis of rewetting peatbogs in Tver Oblast on the basis of remote sensing data, *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, No. 6, pp. 74–82 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869780920060089.
4. Ostroukhov A. V., Klimina E. M., Landscape mapping of hard-to-reach regions using geoinformation technologies (the case of specially protected nature reserves of Khabarovsk Territory), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 139–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-139-149.
5. Sizov O. S., Tsymbarovich P. R., Ezhova E. V. et al., 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*, 2020, V. 17, No. 4, pp. 137–153 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153.
6. Sinyutkina A. A., The application of vegetation and water indices to assess the state of post-pyrogenic raised bogs in Western Siberia, *Bull. Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, V. 48, pp. 90–109 (in Russian), DOI: 10.26516/2073-3402.2024.48.90.

7. Sinyutkina A. A., Gashkova L. P., Kharanzhevskaya Yu. A., Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia, *Lomonosov Geography J.*, 2024, V. 79, No. 1, pp. 78–88 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.
8. Tretyakova A. S., Grudanov N. Yu., Vakhrusheva A. D. et al., Flora of protected mires in the southern part of the Sverdlovsk Region: Report 1, *Flora and Vegetation of Asian Russia*, 2022, V. 15, No. 4, pp. 280–292 (in Russian), DOI: 10.15372/RMAR20220403.
9. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Application of remote sensing data in large-scale monitoring of wetlands, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 9–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
10. Assiri M., Sartori A., Persichetti A. et al., Leaf area index and aboveground biomass estimation of an alpine peatland with a UAV multi-sensor approach, *GIScience and Remote Sensing*, 2023, V. 60, Iss. 1, Article 2270791, DOI: 10.1080/15481603.2023.2270791.
11. Benscoter B. W., Vitt D. H., Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence, *Ecosystems*, 2008, V. 11, pp. 1054–1064, DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.
12. Benscoter B. W., Vitt D. H., Wieder R. K., Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs, *Canadian J. Forest Research*, 2005, V. 35, No. 9, pp. 2188–2193.
13. Czapiewski S., Assessment of the applicability of UAV for the creation of digital surface model of a small peatland, *Frontiers in Earth Science*, 2022, No. 10, Article 834923, DOI: 10.3389/feart.2022.834923.
14. Feurdean A., Florescu G., Tanțău I. et al., Recent fire regime in the southern boreal forests of Western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, V. 244, Article 106495, DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
15. Kettridge N., Turetsky M. R., Sherwood J. H. et al., Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift, *Scientific Reports*, 2015, V. 5, Article 8063, DOI: 10.1038/srep08063.
16. Knoth C., Klein B., Prinz T., Kleinebecker T., Unmanned aerial vehicles as innovative remote sensing platforms for high-resolution infrared imagery to support restoration monitoring in cut-over bogs, *Applied Vegetation Science*, 2013, V. 16, Iss. 3, pp. 509–517, DOI: 10.1111/avsc.12024.
17. Kolari T. H. M., Sallinen A., Wolff F. et al., Ongoing fen–bog transition in a boreal aapa mire inferred from repeated field sampling, aerial images, and Landsat data, *Ecosystems*, 2022, V. 25, pp. 1166–1188, DOI: 10.1007/s10021-021-00708-7.
18. Lehmann J. R. K., Münchberger W., Knoth C. et al., High-resolution classification of South Patagonian peat bog microforms reveals potential gaps in up-scaled CH<sub>4</sub> fluxes by use of unmanned aerial system (UAS) and CIR imagery, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, Iss. 3, Article 173, DOI: 10.3390/rs8030173.
19. Moore P. A., Lukenbach M. C., Kettridge N. et al., Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity, *J. Hydrology*, 2017, No. 554, pp. 656–665, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.036.
20. Simpson G., Nichol C. J., Wade T. et al., Species-level classification of peatland vegetation using ultra-high-resolution UAV imagery, *Drones*, 2024, V. 8, Iss. 3, Article 97, DOI: 10.3390/drones8030097.
21. 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, V. 205, Article 105464, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.