

# Динамика облесенности верховых болотных массивов южной тайги на примере Западнодвинского лесоболотного стационара (Тверская область)\*

К. П. Егоров<sup>1</sup>, М. А. Медведева<sup>1</sup>, О. В. Галанина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт лесоведения РАН,

Российская Федерация, 143030, Московская обл., с. Успенское, ул. Советская, 21

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

<sup>3</sup> Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН,

Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2

**Для цитирования:** Егоров, К. П., Медведева, М. А., Галанина, О. В. (2024). Динамика облесенности верховых болотных массивов южной тайги на примере Западнодвинского лесоболотного стационара (Тверская область). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (3), 528–550. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.308>

Статья посвящена изучению изменения древостоя на верховых болотных массивах и проверке гипотезы о текущем росте облесенности верховых болот лесной зоны, зависящих от изменения климатических условий. Для анализа динамики облесенности на примере верховых болот Тверской области была разработана методика, основанная на использовании спутниковых данных Landsat разных поколений. Методика была проверена на наземных данных и применена для анализа изменения облесенности в период с 1976 по 2022 г. на нескольких верховых болотных массивах, включая ненарушенные и осушенные для лесного хозяйства участки. В ходе исследования было протестировано около 20 спектральных индексов на различных съемках, включая летние и зимние (снежные) условия. Результаты классификации проверены с использованием данных таксации насаждений на круговых площадках и оценены с помощью матриц ошибок. Было установлено, что съемка высокого пространственного разрешения спутников Landsat, особенно зимняя, подходит для долгосрочного анализа динамики облесенности верховых болот. Предложены оптимальный вегетационный индекс SWVI (Short wave vegetation index) и методика классификации. Результаты исследования показали, что облесенность возрастает на всех неосушенных участках болот независимо от их исходного состояния. Наименьшие изменения наблюдаются для участков с низкой сомкнутостью крон (0–0.1), в большей степени — для сомкнутости 0.2–0.3, а наибольшие изменения происходят на участках с высокой сомкнутостью крон (0.6–0.7 и выше).

**Ключевые слова:** верховые болота, облесение, дистанционное зондирование Земли, спутниковые снимки, Landsat, вегетационный индекс, изменение климата, лесосушение.

---

\* Работа проводилась при участии Российского научного фонда (проект № 23-74-00067).

## 1. Введение

Торфяные болота занимают значительную часть территории России, простираясь на 1.39 млн км<sup>2</sup>, включая заболоченные земли. Большинство болот расположены в лесной зоне, они покрывают около 6 % площади европейской части России. Верховые болота, имеющие грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы, составляют около 19 % всех болот в стране (Вомперский и др., 1994; Вомперский и др., 2005). В настоящее время верховые болота являются наиболее чувствительными к изменениям количества атмосферных осадков и температуры, что влияет на водный режим и растительность болот. Современные изменения климата приводят к видимым изменениям в растительном покрове, включая облесение тундры и лесотундры, а также подъем верхней границы леса в горах (Masson-Delmotte, 2021). Рост облесения на болотах был зарегистрирован в разных странах, и это, вероятно, связано со снижением уровня воды и повышенным поступлением азота (Gunnarsson et al., 2000; Rydin and Jeglum, 2013). Результаты экспериментов по осушительной гидролесомелиорации подтверждают влияние снижения уровня воды на улучшение роста деревьев. Рост облесения можно рассматривать как модель для прогнозирования реакции болот на изменение климата.

Цель данного исследования — проверка гипотезы об усилении облесенности верховых болот в условиях изменения климата за последние 50 лет. Для достижения цели была разработана методика оценки облесенности на основе спутниковых данных, которая проверялась с использованием наземных данных. Были проанализированы изменения облесенности для нескольких хорошо изученных ранее верховых болот. Рассматривались как естественные верховые болотные массивы, так и болота, подвергнутые осушительной гидролесомелиорации.

## 2. Методика исследования и фактический материал

### 2.1. Объекты исследования

Появление новых технологий стимулирует исследование различных областей их применения, включая использование дистанционного зондирования для изучения Земли. Изначально низкое пространственное разрешение материалов дистанционной съемки ограничивало видимость крупномасштабных процессов на тысячи километров, но сегодня, благодаря увеличению пространственного разрешения снимков, можно изучать более мелкие объекты и использовать полученную информацию о них в разных научных областях. Объектами нашего исследования были выбраны три верховых болотных массива, расположенные на территории Западнодвинского лесоболотного стационара Института лесоведения РАН, находящегося в 15 км к югу от г. Западная Двина (Тверская обл.): Усвятский Мох, Большой Роговской Мох и Ламтевский Мох (рис. 1).

Район исследования расположен на юго-западе Тверской области и характеризуется равнинным рельефом зандрового типа и высокой степенью заболоченности. Он представляет собой северо-западную часть Западно-Двинской низины с высотами от 160 до 200 м, за исключением отдельных холмов, которые достигают высоты 221 м (Дорофеев и Хохлова, 2016). Климат района умеренно континентальный,

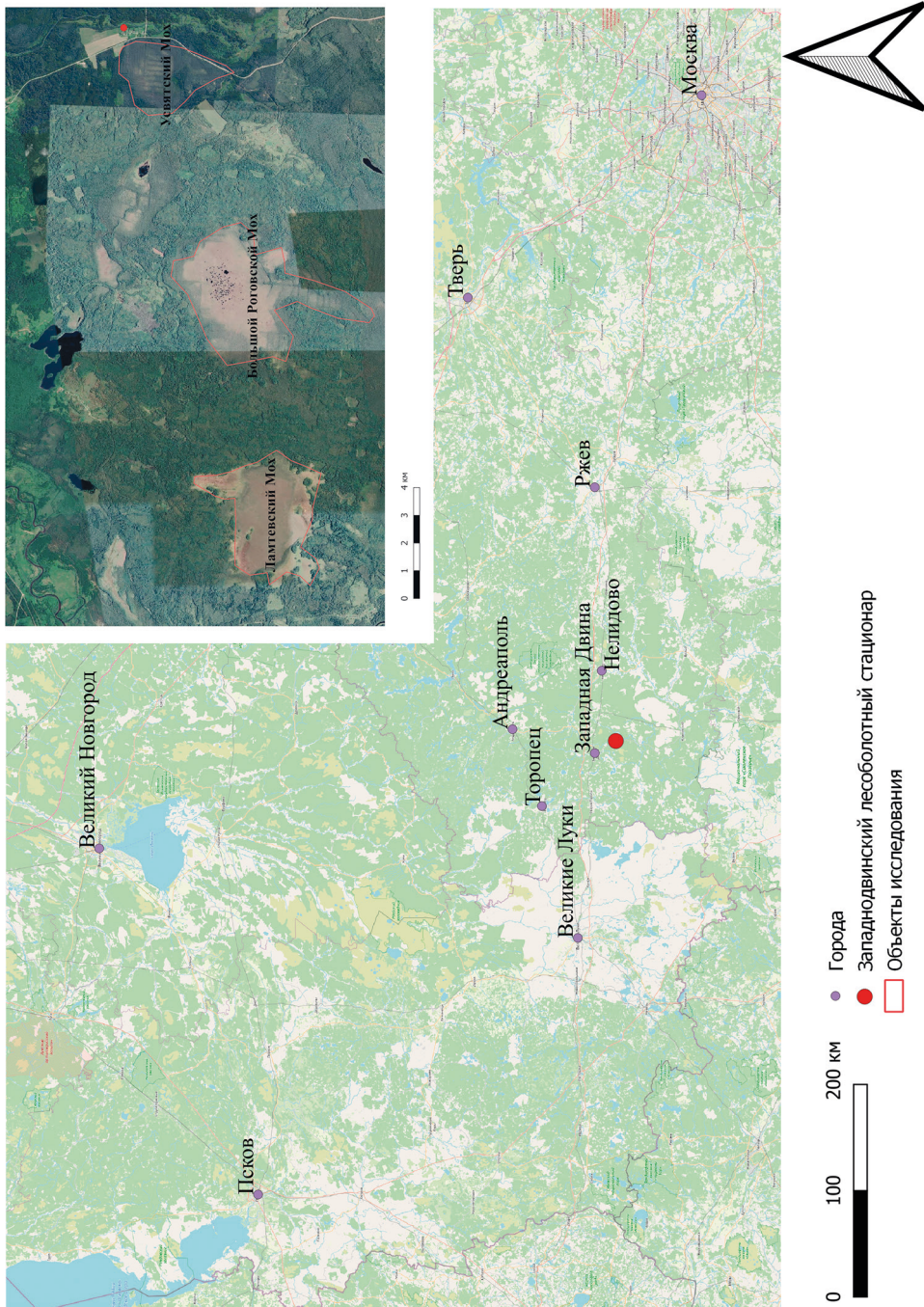


Рис. 1. Карта-схема расположения стационара и объектов исследования. Для создания карты-схемы использовались материалы Open Street Map и Bing Satellite

с более мягким температурным режимом по сравнению с центральными и восточными частями района. Годовое количество осадков варьируется в среднем от 600 до 750 мм благодаря влиянию Атлантики и задержанию влажных масс атлантического воздуха склонами Валдайской и Бельской возвышенностей, а также облесенности района и наличию водных объектов.

Болота Западно-Двинской низины принадлежат к Ладожско-Ильменско-Западно-Двинской области олиготрофных сфагновых грядово-мочажинных торфяников (Кац, 1971). В данном районе преобладают верховые болота озерного послеледникового происхождения. Процессы заболачивания продолжаются, но в определенной мере сдерживаются проведенной в советское время мелиорацией. Исследуемые объекты относятся к наиболее распространенному типу болот в этом районе — верховым грядово-мочажинным болотам.

Верховые болотные массивы Западнотвинского лесоболотного стационара облесены сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*), представленной разными экологическими формами (Сукачев, 1905; Аболин, 1915). По краям болот, где условия мезо-олиготрофные, произрастают сосны *F. uliginosa* высотой 10–12 м. На грядах грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов можно встретить низкорослые экземпляры сосны *F. wilkommii* и *F. litwinowii* высотой 1–2 и 3–4 м соответственно. Наиболее угнетенные формы сосны *F. pumila*, которые из-за нехватки минеральных веществ в мощной торфяной залежи верхового типа имеют стланниковую форму, не характерны.

В окраинных частях изучаемых болотных массивов, помимо сосны, растут ель (*Picea abies*), береза пушистая (*Betula pubescens*) и ольха черная (*Alnus glutinosa*). Береза также встречается в центре болотного массива Усвятский Мох на месте пожара 1999 г. (Вомперский и др., 2007).

На спутниковом снимке района исследования (рис. 2) показана осушительная сеть канав, которая связана с р. Западной Двиной на западе и р. Велеса на востоке, а также три болотных массива: Усвятский Мох (полностью осушен), Большой Роговской Мох (частично осушен), Ламтевский Мох (не осушен). На болотных массивах присутствуют различные микроландшафты с разными условиями дренированности. Некоторые из них относятся к лесопокрытым площадям, где произрастают сосняки. В результате проведенной в 1970-е годы мелиорации произошли изменения в микрорельефе, состоянии древостоев и других характеристиках болотных экосистем (Молчанов, 1982).

## 2.2. Методика исследования

Методика исследования включала три этапа. На первом этапе использовались литературные и картографические источники, а также данные дистанционного зондирования Земли. Спутниковый снимок за летний период 2021 г. был обработан с помощью геоинформационной системы. По спутниковому снимку была проведена первичная неконтролируемая классификация через алгоритм быстрого выделения кластеров, которая помогла определить места расположения пробных площадей с помощью деления снимка на заданное количество классов.

На втором этапе исследования в августе 2021 г. был проведен сбор полевого материала на 36 пробных площадях. Пробные площади представляли собой одно-



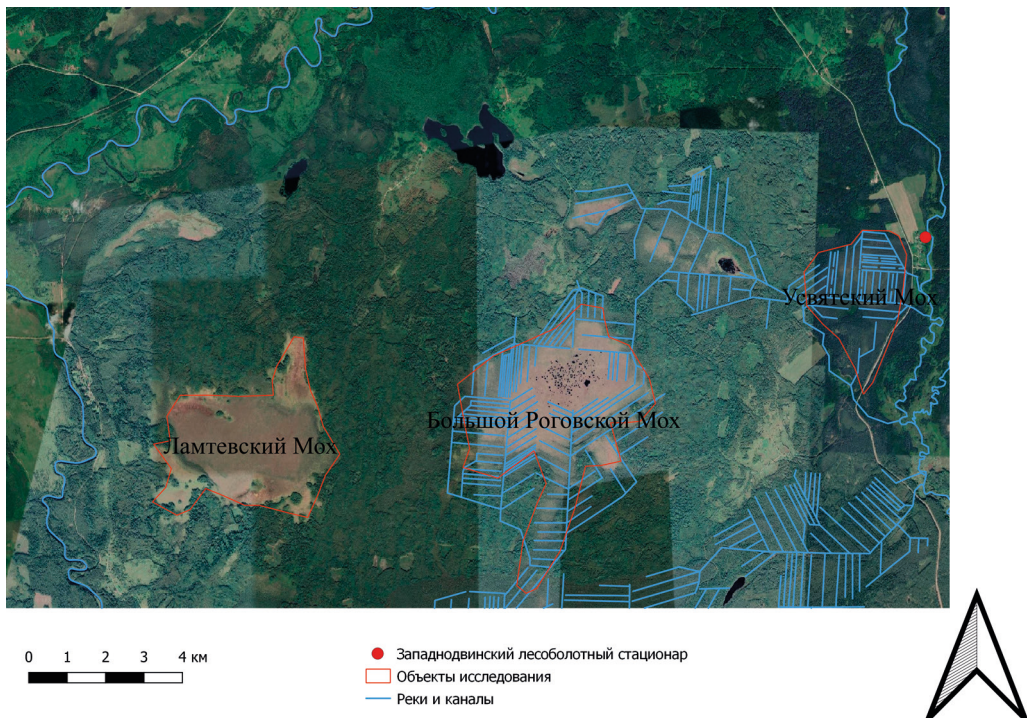


Рис. 2. Объекты исследования на Западнодвинском лесоболотном стационаре. Для создания схем, изображенных на рис. 2–3, использовались материалы Bing Satellite

родные участки леса определенного размера, на которых проводилась детальная перечислительная таксация. На каждой площади измерялись характеристики древостоя: полнота, сомкнутость, диаметр и высота дерева (Ветров, 2013).

Хотя было заложено 36 круговых площадок, некоторые из них пришлось исключить. Это связано с двумя факторами: выходом за границы объектов исследования или присутствием в первом ярусе большого количества других древесных видов. Площадки с иными древесными породами исключались из-за различного влияния при кластеризации за летний и зимний периоды. В итоге анализировались данные с 33 площадок.

Полученные в ходе полевых работ на массивах Большой Роговской Мох и Усвяцкий Мох таксационные характеристики древостоя представлены в прил. 8.1<sup>1</sup>. На рис. 3 приведен фрагмент спутникового снимка с обозначенными пробными площадками и их нумерацией. Данные для болота Ламтевский Мох были собраны в 2023 г. Их оценка появится позже.

Для каждой пробной площади были сделаны фотографии ее общего вида и сомкнутости крон. Предварительная классификация спутниковых данных использовалась для выбора точек наземной проверки в виде круговых площадок с диаметром 10 м. На этих точках определялись координаты их центров, полнота

<sup>1</sup> Здесь и далее прил. 8.1–8.3 можно найти по следующему электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/18168/11985>.

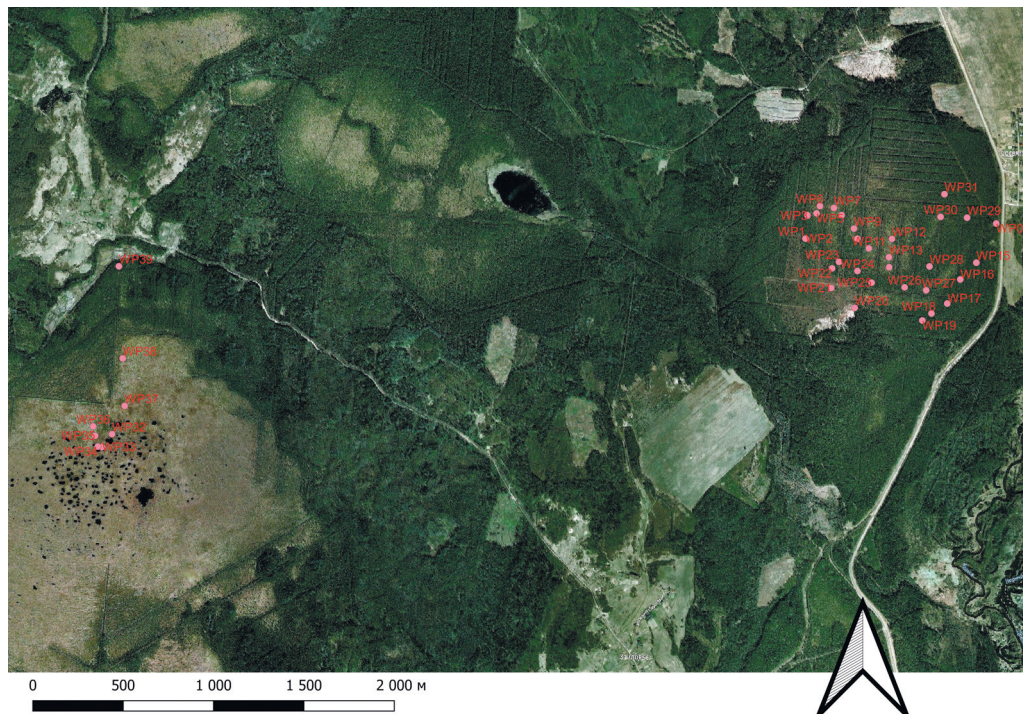


Рис. 3. Фрагмент спутникового снимка с обозначенными пробными площадками и их нумерацией (некоторые точки не были измерены по техническим причинам)

древостоя (по трем точкам) и делались фотографии общего вида и вертикальные для глазомерной оценки сомкнутости крон (рис. 4). Кроме того, для пяти средних деревьев измерялись диаметр и высота (Егоров и др., 2023б).

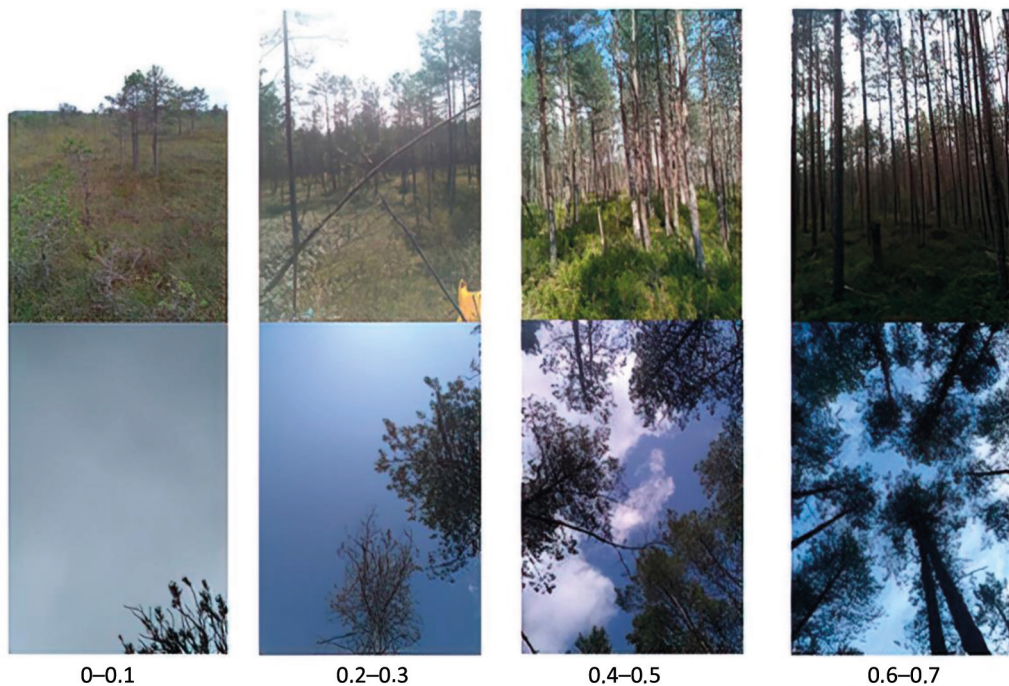
Третий этап оказался наиболее трудоемким и включал оцифровку данных, полученных во время полевых работ. Необходимо было собрать библиотеку спутниковых снимков за максимально возможное количество лет. После этого проводилась обработка снимков с использованием различных индексов и выполнялась их классификация. Путем сравнения классифицированного индекса и полевых данных определялся оптимальный индекс для оценки запаса древостоя.

### 2.2.1. Оценка облесенности

На данном этапе выполнялось вычисление различных спектральных индексов и производился выбор наиболее подходящих из них для целей исследования. Затем с помощью построения матриц ошибок, которые включают неконтролируемую классификацию по методу K-means (инструмент реализует кластерный анализ средних для сеток в двух вариантах: итеративное минимальное расстояние (Forgy, 1965) и восхождение на холм (Rubin, 1967)) и результаты полевых исследований, были отобраны оптимальные индексы.

Важно отметить, что при изучении растительного покрова нередко используются вегетационные индексы. Вегетационный индекс (ВИ) представляет собой





0–0.1

0.2–0.3

0.4–0.5

0.6–0.7

Рис. 4. Фотографии общего вида пробных площадей и сомкнутости крон на них, разделенные по классам

показатель, получаемый путем анализа различных спектральных каналов данных дистанционного зондирования. Часто этот показатель имеет прямую связь с параметрами растительности в конкретном пикселе снимка. Вегетационные индексы разрабатываются эмпирически, и их эффективность зависит от особенностей отражения. В связи с этим вариативность их применения возникает в зависимости от поставленных задач.

На данный момент существует огромное количество различных спектральных индексов (приблизительно 160), большинство из которых рассчитываются на красных (0.62–0.75 мкм) и ближних инфракрасных (0.75–1.3 мкм) зонах спектра. Это объясняется тем, что данные спектральные зоны являются наиболее стабильными (не зависящими от прочих факторов). На длине волны от 0.62 до 0.75 мкм (красная зона спектра) хлорофилл поглощает максимальное количество солнечной радиации. В то же время на ближней инфракрасной зоне, от 0.75 до 1.3 мкм, клеточная структура листа обладает максимальной способностью отражать энергию. Это означает, что растения с высокой фотосинтетической активностью, обычно имеющие большую фитомассу, проявляют более низкие коэффициенты отражения в красной зоне спектра и более высокие — в ближней инфракрасной зоне (Столярова и др., 2019).

При таком многообразии вегетационные индексы часто работают менее эффективно для территорий с разреженной растительностью. Когда растительность скудная, спектр излучения в первую очередь зависит от типа почвы. Для вегетационных индексов существуют пороги чувствительности к степени разреженности растительности. Почвы могут значительно отличаться по своему отражению, даже если

для анализа используются широкие спектральные диапазоны. Многие «фоновые» материалы, такие как почва, камни и растительные остатки, значительно изменяют спектр своего излучения в тех диапазонах, которые чаще всего используются при вычислении вегетационных индексов (Elvidge and Lyon, 1985; Huete et al., 1985).

Наиболее популярным и широко используемым вегетационным индексом является NDVI (нормализованный относительный вегетационный индекс). Значения этого индекса прямо связаны с наличием растительности: для растительных областей он принимает положительные значения. Он подвержен влиянию множества факторов, таких как количество зеленой биомассы, состав растительности, ее сомкнутость, состояние, уклон поверхности, цвет почвы и другие (Huang et al., 2021).

Нам предстояло вычислить наиболее подходящий спектральный индекс для всей используемой библиотеки спутниковых снимков. Это позволило определить изменения в растительности на исследуемых объектах за 46 лет. Кроме того, обработка метеорологической информации дала возможность сделать выводы о трендах изменения климата в районе исследования и выявить возможные связи между погодными условиями и запасом древостоя.

Было произведено вычисление 21 самого распространенного спектрального индекса, а затем после визуальной оценки отобрано 11 наиболее подходящих. Список отобранных спектральных индексов включает: SAVI (Huete, 1988); RVI(SR) (Jordan, 1969); R/G (Liu et al., 2021); NDWI; NDVI (Huang et al., 2021); NDSI (Salomonson and Appel, 2006); GreenNDVI (Buschmann and Nagel, 1993); GR (Gamon and Surfus, 1999); GNDVI (Buschmann and Nagel, 1993); SWVI (Hardisky et al., 1983); SWIR/G. Для каждого индекса была проведена проверка на зимних и летних снимках, полученных с помощью спутника Landsat-8. Зимние снимки сделаны 6 декабря 2021 г., а летние — 25 июня 2021 г.

В данной статье рассмотрена оценка точности только одного вегетационного индекса. Алгоритм работы с другими индексами был аналогичен.

Нормализованный вегетационный индекс NDVI — это стандартизированный индекс, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных — поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного сырья в инфракрасном канале (NIR). Значения этого индекса находятся в пределах от -1 до 1 (Huang et al., 2021):

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red), \quad (1)$$

где NIR — значения пикселей из ближнего инфракрасного канала; Red — значения пикселей из красного канала.

Использование NDVI возможно в летний и в зимний периоды (рис. 5).

При определении предпочтительного индекса возникла сложность по причине того, что эффективность некоторых индексов оказалась одинаковой в летний период. Очевидно, что разделение на классы является условным и в природе сомкнутость крон меняется по своим законам. На местах измерения данного параметра его значение может различаться даже в пределах 10 м от исходной точки измерения. Так как снимки Landsat-8 имеют пространственное разрешение 30 м, применение панхроматического канала, который обладает пространственным разрешени-



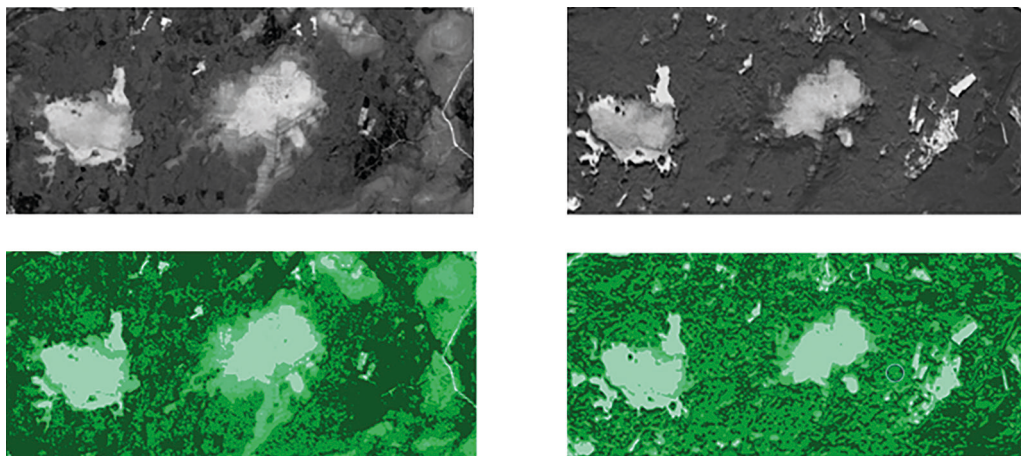


Рис. 5. Вычисленный ВИ NDVI для летнего и зимнего периода (вверху), а также неконтролируемая классификация ВИ NDVI для летнего и зимнего периода (внизу)

ем 15 м на пиксель, позволило улучшить разрешение всех каналов и снимков. Тем не менее это может привести к возникновению погрешностей на границах классов. Из-за этого было сделано допущение о том, что один класс может переходить в другой. Например, точка, относящаяся к классу 2–3, может попасть на территорию класса 4–5, и в таком случае считается, что она определена верно. Однако если данная точка попадает на территорию класса 0–1, то считается, что ее определение уже неверно.

При дальнейшем исследовании было принято решение анализировать зимнюю съемку, поскольку она минимизирует влияние напочвенного слоя земли благодаря наличию снежного покрова. Кроме того, за зимний период был выделен всего один вегетационный индекс (SWVI), что упрощает задачу обработки снимков. Летние съемки будут использоваться только в случаях, когда за зиму не найдено подходящего снимка. Причиной этому могут быть повышенная облачность или короткий световой день. При выборе съемки периоды были разделены по годам: для летнего периода год съемки соответствует номинальному году, а для зимних снимков к 2022 г. относятся как начало 2022, так и конец 2021 г.

Несомненно, на качество съемки влияет множество факторов, включая месяц, когда съемка была проведена, время суток и др. Однако использование вегетационных индексов и периода с наличием снежного покрова помогает минимизировать влияние этих факторов. Ниже представлена табл. 1 с вегетационными индексами, которые использовались при исследовании.

### 2.2.2. Оценка влияния климатического фактора на изменение облесенности

Климатические изменения являются актуальной и вызывающей много споров проблемой, которая затрагивает и Россию. Главным фактором, связанным с изменениями климата, является выброс углерода в атмосферу, особенно касающийся болот, которые служат естественными «консерваторами» углерода. Осушение болот приводит к выделению углерода в атмосферу, что влияет на климат. Кроме того,

Таблица 1. Исследуемые вегетационные индексы

| №  | Индекс и расшифровка  | Эмпирическая формула   | Точность за летний период, % | Точность за зимний период, % |
|----|---|--|------------------------------|------------------------------|
| 1  | SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)   | $SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L)$  | 64                           | 0                            |
| 2  | RVI(SR) (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))  | $RVI(SR) = NIR/RED$  | 0                            | 54                           |
| 3  | R/G   | $R/G = Red / Green$  | 64                           | 64                           |
| 4  | NDWI (Normalized Difference Water Index)  | $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$   | 0                            | 0                            |
| 5  | NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)                                     | $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$   | 55                           | 61                           |
| 6  | NDSI (Normalized Difference Snow Index)   | $(Green - SWIR) / (Green + SWIR)$  | 70                           | 48                           |
| 7  | GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)                              | $GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$  | 0                            | 36                           |
| 8  | GreenNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index (альтернативная формула)) | $GreenNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Blue)$   | 70                           | 52                           |
| 9  | GR (основан на преобразовании Tasseled cap)                                       | $GR = -0.24717 \times Aerosol - 0.16263 \times Blue - 0.40639 \times Green + 0.85468 \times Red + 0.05493 \times NIR - 0.11749 \times SWIR2$ | 73                           | 61                           |
| 10 | SWVI (Short wave vegetation index)  | $SWVI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$   | 0                            | 70                           |
| 11 | SWIR/G  | $SWIR/G = SWIR/Green$  | 73                           | 45                           |
| 12 | EVI (Enhanced Vegetation Index)   | $EVI = 2.5 \times (NIR / Red) / (NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 13 | CVI (Chlorophyll Vegetation Index)  | $CVI = (NIR/Green) \times (Red/Green)$   | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 14 | SWIR/G  | $SWIR/G = SWIR/Green$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 15 | DVI (Difference Vegetation Index)   | $DVI = Red - Green$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 16 | TVI (Transformed VI)  | $TVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red) + 0.5) \cdot 0.5$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 17 | SARVI (Soil adjusted Atmospherically Resistant Vegetation Index)                  | $SARVI = 2.5 \times (Red - Green) / (1 + Red + 6 \times Green - 7.5 \times Aerosol)$   | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 18 | LMI   | $LMI = NIR/Red$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |

| №  | Индекс и расшифровка           | Эмпирическая формула   | Точность за летний период, % | Точность за зимний период, % |
|----|--------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| 19 | BR (Яркость)                   | $BR = 0.33183 \times \text{Aerosol} + 0.33121 \times \text{Blue} + 0.55177 \times \text{Green} + 0.42514 \times \text{Red} + 0.48087 \times \text{NIR} + 0.25252 \times \text{SWIR2}$  | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 20 | WET (Влажность)                | $WET = 0.13929 \times \text{Aerosol} + 0.22490 \times \text{Blue} + 0.40359 \times \text{Green} + 0.25178 \times \text{Red} - 0.70133 \times \text{NIR} - 0.45732 \times \text{SWIR2}$ | ВИ не прошел первичный отбор |                              |
| 21 | NDB4B6 (Влажность поверхности) | $NDB4B6 = (\text{Red} - \text{SWIR}) / (\text{Red} + \text{SWIR})$   | ВИ не прошел первичный отбор |                              |

осушение болот способствует ускоренному росту лесов: помимо улучшения динамики роста лесов из-за осушения повышается эффективность фотосинтеза.

Для анализа влияния погодных изменений на запас древостоя собирались и анализировались метеорологические данные. Для анализа климатических изменений в районе исследования были использованы метеорологические данные (r5.ru, 2022) о ежемесячных температурах и осадках с 1958 по 2017 г. (прил. 8.2–8.3). Это образует временной ряд продолжительностью 59 лет.

Для проверки связи между динамикой древостоя и климатическими изменениями был вычислен коэффициент корреляции. Однако возникла проблема, связанная с разрывами в данных. Метеорологические данные имеют временной ряд с 1958 до 2017 г., тогда как библиотека спутниковых снимков доступна с 1976 по 2022 г., и в этом периоде также наблюдались пропуски данных. Для расчета коэффициента корреляции было принято решение использовать интерполяцию, чтобы получить промежуточные значения.

При вычислении было выявлено несколько проблем. Во-первых, ряд метеорологических данных доступен только до 2017 г. Во-вторых, были обнаружены случайные выбросы метеорологических величин, которые сильно отклоняются от линии тренда. Это оказывает влияние на правильность коэффициентов корреляции.

### 3. Результаты исследований

На рис. 5 продемонстрированы графические результаты вычислений индекса NDVI и его неконтролируемой классификации. При построении матрицы ошибок для этого индекса по летним данным (табл. 2) его точность составляет 55 %, что делает его недостаточно точным. Аналогичный показатель для зимы — 61 % (табл. 3). Хотя NDVI является самым часто используемым индексом, при неконтролируемой классификации он не представил высоких результатов.

После тщательной проверки всех рассматриваемых вегетационных индексов было установлено, что в летний период наиболее точные индексы NDSI, GreenNDVI, GR и SWIR/G дали точность прогноза в районе 70–72 %. Для зимнего периода наиболее эффективным оказался индекс SWVI с точностью классификации 70 %.



**Таблица 2. Матрица ошибок для классификации вегетационного индекса NDVI и таксационных характеристик пробных площадей за летний период**

|       | 0 и 1 | 2 и 3 | 4 и 5 | 6 и 7 | Е  |
|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 0 и 1 | 5     | 0     | 0     | 0     | 5  |
| 2 и 3 | 4     | 4     | 1     | 0     | 9  |
| 4 и 5 | 0     | 7     | 9     | 3     | 19 |
| 6 и 7 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0  |
| Е     | 9     | 11    | 10    | 3     | 33 |

**Таблица 3. Матрица ошибок для классификации вегетационного индекса NDVI и таксационных характеристик пробных площадей за зимний период**

|       | 0 и 1 | 2 и 3 | 4 и 5 | 6 и 7 | Е  |
|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 0 и 1 | 6     | 0     | 0     | 0     | 6  |
| 2 и 3 | 3     | 5     | 0     | 0     | 8  |
| 4 и 5 | 0     | 5     | 7     | 1     | 13 |
| 6 и 7 | 0     | 1     | 3     | 2     | 6  |
| Е     | 9     | 11    | 10    | 3     | 33 |

**Таблица 4. Реальные классы по сомкнутости крон**

| Класс | Сомкнутость |
|-------|-------------|
| 0–1   | 0–0.1       |
| 2–3   | 0.2–0.3     |
| 4–5   | 0.4–0.5     |
| 6–7   | 0.6–0.7     |
| 7+    | 0.8–1       |

С допущением о возможном переходе классов значения точности ВИ с «размытием» составили: NDSI — 91 %; GreenNDVI — 85 %; GR — 88 %; SWIR/G — 82 %; а SWVI — 97 %.

Для определения изменений в облесенности объектов исследования вычислялся оптимальный вегетационный индекс SWVI и проводилась неконтролируемая классификация. Этот процесс был выполнен для каждого объекта исследования отдельно, что позволило отследить влияние осушения и климатических факторов на изменение плотности растительности. Таким образом, были рассмотрены отдельно Усвятский Мох (осушен), Ламтевский Мох (не осушен), а Большой Роговской Мох (частично осушен) был разбит на осушенную и неосушенную части. Для анализа были использованы снимки за 1976, 1978, 1986, 1996, 2007, 2016, 2021 и 2022 гг. В результате классификации были выделены пять реальных классов, отражающих степень плотности растительности (табл. 4).

В целом на болотном массиве Ламтевский Мох наблюдается обильный рост древостоя на некоторых участках болотного массива. Этот рост прежде всего

Таблица 5. Изменение площадей реальных классов в гектарах на болотном массиве Ламтевский Мох по годам

| Класс | 1976   | 1978   | 1986   | 1996   | 2007   | 2016   | 2021   | 2022   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0-1   | 527.40 | 464.76 | 441.54 | 476.91 | 434.70 | 348.95 | 376.36 | 389.18 |
| 2-3   | 125.64 | 121.68 | 117.72 | 78.48  | 47.34  | 62.15  | 63.59  | 39.06  |
| 4-5   | 183.24 | 249.84 | 202.05 | 121.68 | 70.74  | 75.24  | 104.36 | 56.41  |
| 6-7   | 0.00   | 0.00   | 74.88  | 159.12 | 146.88 | 136.87 | 182.03 | 121.19 |
| 7+    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 136.53 | 137.70 | 110.61 | 231.10 |

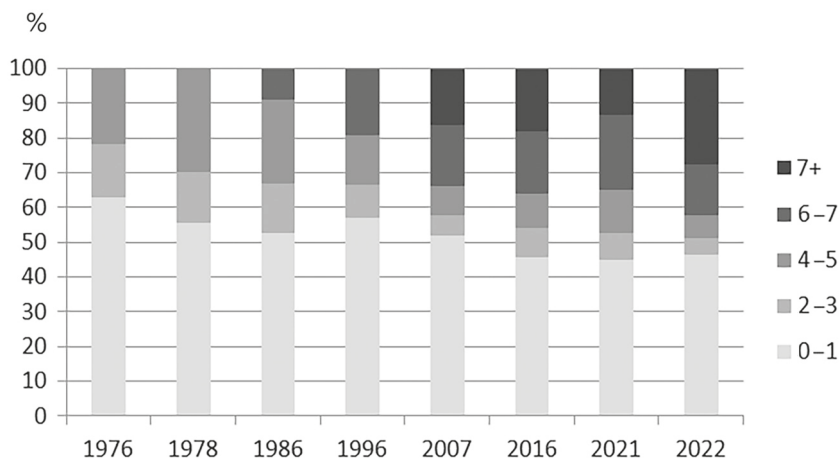


Рис. 6. Изменение площадей реальных классов по годам на болотном массиве Ламтевский Мох

отмечается в окраинных сосняках и сосняках кустарничково-сфагновых. Также интенсивный рост деревьев заметен на минеральных островах, расположенных внутри болотного массива. В то же время центральная часть болотного массива остается стабильной и не подвержена значительным изменениям. Подтверждение этому можно найти в табл. 5, которая показывает изменение площадей каждого класса в гектарах. Для более наглядной демонстрации данных показана нормированная гистограмма (рис. 6).

Как было упомянуто ранее, в данном случае прирост древесной массы в основном происходит в окружающем болото облесенном кольце и на минеральных островах. Это подтверждается и тем фактом, что в ходе изменений за 46 лет наименьшую площадь стали занимать классы, которые находятся между открытым пространством (в данном случае болотным массивом) и лесом.

Для сравнения рассмотрим динамику центральной части (неосушенной) болотного массива Большой Роговской Мох. Стоит отметить, что в данном случае облесенного кольца вокруг массива нет. На рис. 7 приведен один фрагмент для нескольких лет: 1976, 1978, 1986, 1996, 2007, 2016 и 2021 гг. Это связано с тем, что древостой на этом участке не менял своего состояния согласно реальным классам (табл. 6 и рис. 7).

Таблица 6. Изменение площадей реальных классов в гектарах на болотном массиве Большой Роговской Мох по годам (центральная неосушенная часть)

| Класс | 1976  | 1978  | 1986  | 1996  | 2007  | 2016  | 2021  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0-1   | 68.04 | 68.04 | 68.04 | 68.04 | 68.04 | 67.95 | 67.73 |
| 2-3   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.09  | 0.27  |
| 4-5   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.05  |
| 6-7   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 7+    | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |

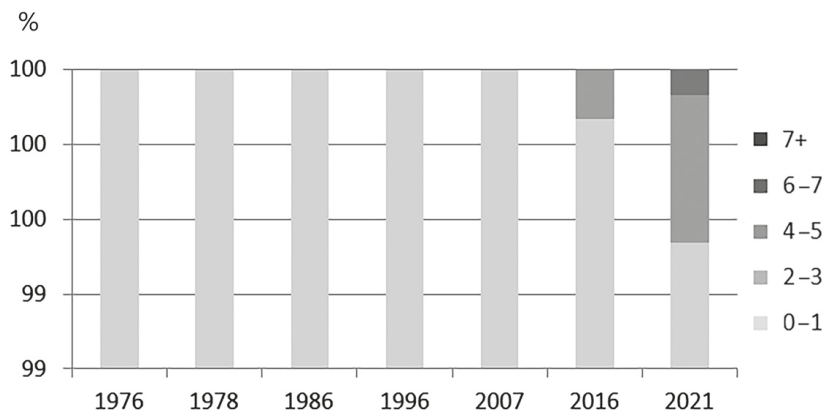


Рис. 7. Изменение площадей реальных классов по годам на болотном массиве Большой Роговской Мох (центральная неосушенная часть)

Полученные данные указывают, что в период с 1976 по 2021 г. площади различных реальных классов изменились менее чем на 1%. Важно отметить, что в этом анализе не был учтен 2022 г., так как после классификации наблюдалась та же динамика, что и до 2016 г. Вероятной причиной этого является возможная случайная ошибка, связанная с качеством доступных снимков. Из-за ограничений в качестве снимков на данном этапе работы анализ этого момента не представляется возможным. В таком контексте важно вспомнить об «условности» и «размытости» классов в природе, что уже было упомянуто при обзоре различных вегетационных индексов. Несмотря на это, полученная динамика для центральной неосушенной части болотного массива Большой Роговской Мох выглядит правдоподобно.

Теперь рассмотрим осушенную часть данного массива. Подобно результатам, полученным для болотного массива Ламтевский Мох, наиболее заметные изменения в облесенности болота Роговской Мох наблюдаются по краям болотного массива, в то время как его центральная часть остается достаточно обводненной. Тем не менее осушение также существенно влияет на динамику зарастания болотного массива. Это подтверждают полученные значения, приведенные в табл. 7 и на рис. 8.

Из предоставленных данных становится очевидным влияние осушения на изменение площади древостоя с различной степенью сомкнутости на исследуемом



Таблица 7. Изменение площадей реальных классов в гектарах на болотном массиве Большой Роговской Мох по годам (осушенная часть)

| Класс | 1976   | 1978   | 1986   | 1996   | 2007   | 2016   | 2021   | 2022   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0–1   | 640.80 | 540.00 | 510.93 | 456.84 | 371.43 | 241.94 | 266.45 | 278.53 |
| 2–3   | 102.24 | 101.52 | 123.57 | 92.79  | 108.00 | 206.48 | 170.35 | 75.65  |
| 4–5   | 88.20  | 189.72 | 151.47 | 125.64 | 107.01 | 140.31 | 168.50 | 99.11  |
| 6–7   | 0.00   | 0.00   | 42.30  | 153.00 | 152.10 | 130.70 | 145.85 | 155.77 |
| 7+    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 89.73  | 110.34 | 78.73  | 220.73 |

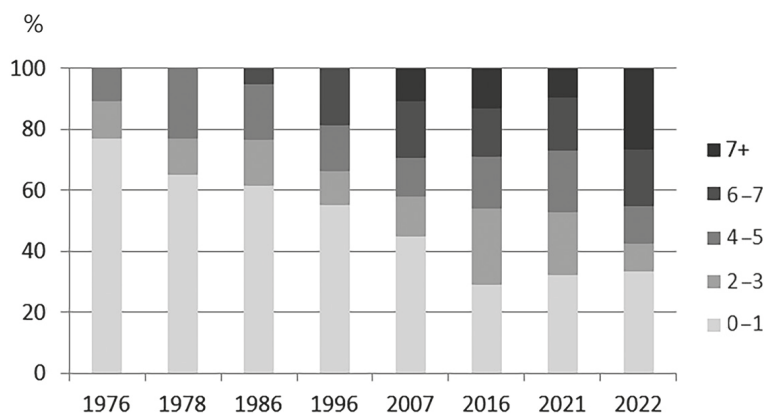


Рис. 8. Изменение площадей реальных классов по годам на болотном массиве Большой Роговской Мох (осушенная часть)

болотном массиве. В начале исследуемого периода около 75 % всего болотного массива занимал древостой с сомкнутостью 0–0.1, но к концу периода этот показатель сократился до 35 %. Для болота Ламтевский Мох аналогичные показатели составляют 65 и 45 % соответственно. На болотном массиве Большой Роговской Мох распределение реальных классов более равномерно.

Теперь осталось рассмотреть динамику древостоя на полностью осушенном болотном массиве Усвятский Мох. Из полученных данных (табл. 8 и рис. 9) следует, что на болотном массиве Усвятский Мох происходит облесение с наибольшей сомкнутостью крон. В начале исследуемого периода площадь с древостоем с сомкнутостью крон 0–0.1 составляла 45 %, но к концу исследования это значение сократилось всего до 2–3 %, что является результатом осушения. Таким образом, на данном болотном массиве осталось минимальное количество болотных микроландшафтов. При своевременном уходе за мелиоративной сетью предполагается продолжение роста древостоя.

По полученным результатам можно сделать вывод, что рост древостоя отмечается на всех рассмотренных болотных массивах. Доля более плотного древостоя повысилась во всех случаях и, вероятно, будет продолжать расти. Однако в центральной части болотного массива Ламтевский Мох и в центральной неосушенной части болотного массива Большой Роговской Мох ожидать существенных изменений не стоит. Увеличение сомкнутости крон древостоя на болоте Ламтевский Мох

Таблица 8. Изменение площадей реальных классов в гектарах на болотном массиве Усвятский Мох по годам

| Класс | 1976   | 1978  | 1986  | 1996  | 2007  | 2016  | 2021   | 2022  |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 0–1   | 114.12 | 84.60 | 48.78 | 51.30 | 28.44 | 5.78  | 1.28   | 3.98  |
| 2–3   | 47.52  | 70.92 | 93.87 | 70.38 | 76.77 | 73.82 | 50.18  | 31.75 |
| 4–5   | 82.80  | 88.92 | 83.25 | 66.15 | 64.62 | 99.81 | 132.10 | 68.42 |
| 6–7   | 0.00   | 0.00  | 16.20 | 54.27 | 50.58 | 38.23 | 46.53  | 85.01 |
| 7+    | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 21.69 | 29.25 | 15.37  | 57.74 |

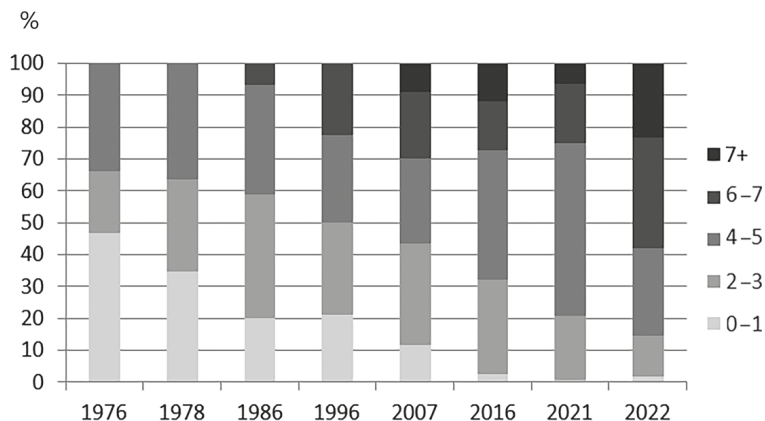


Рис. 9. Изменение площадей реальных классов по годам на болотном массиве Усвятский Мох

произошло в основном за счет окраин болота и минеральных островов. Центральная часть болотного массива Большой Роговской Мох не показала существенной динамики облесенности, хотя небольшие изменения все же произошли. Для прогноза развития древостоя на данной территории необходимо продолжать наблюдения за динамикой роста или использовать снимки более высокого пространственного разрешения.

Наиболее значительный рост древостоя отмечается на тех болотных массивах, где было осуществлено осушение, поэтому осушенная часть Большого Роговского Мха и болото Усвятский Мох наиболее сильно подвержены усилению облесенности.

Для оценки влияния климатического фактора на изменение облесенности были вычислены суммы годовых осадков и среднегодовые значения температур. Затем по этим данным были построены графики с линейной линией тренда (рис. 10–11). Графики показывают, что для осадков и температуры наблюдается положительный тренд изменений, что означает их увеличение. В ходе анализа метеорологических рядов были вычислены средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации случайной величины. Коэффициент вариации характеризует изменчивость случайной величины или относительный разброс относительно среднего значения. Для ряда осадков этот коэффициент составляет от 0.02 до 5.15%, а для ряда температур — от 0.03 до 6.85%. Эти значения указывают на однородность ряда. В среднем

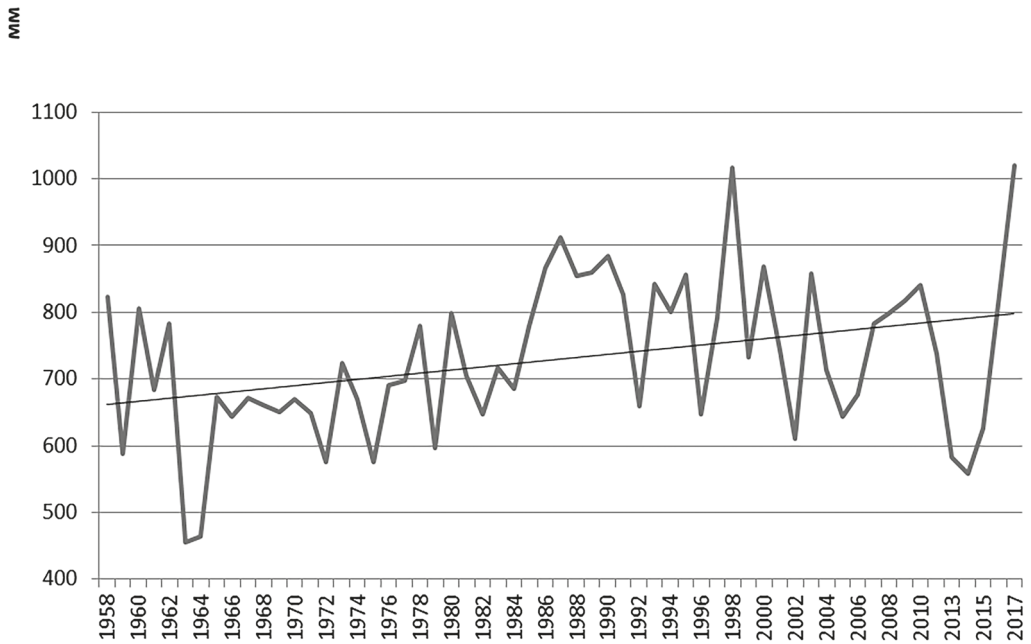


Рис. 10. График динамики годовых сумм осадков в г. Западная Двина

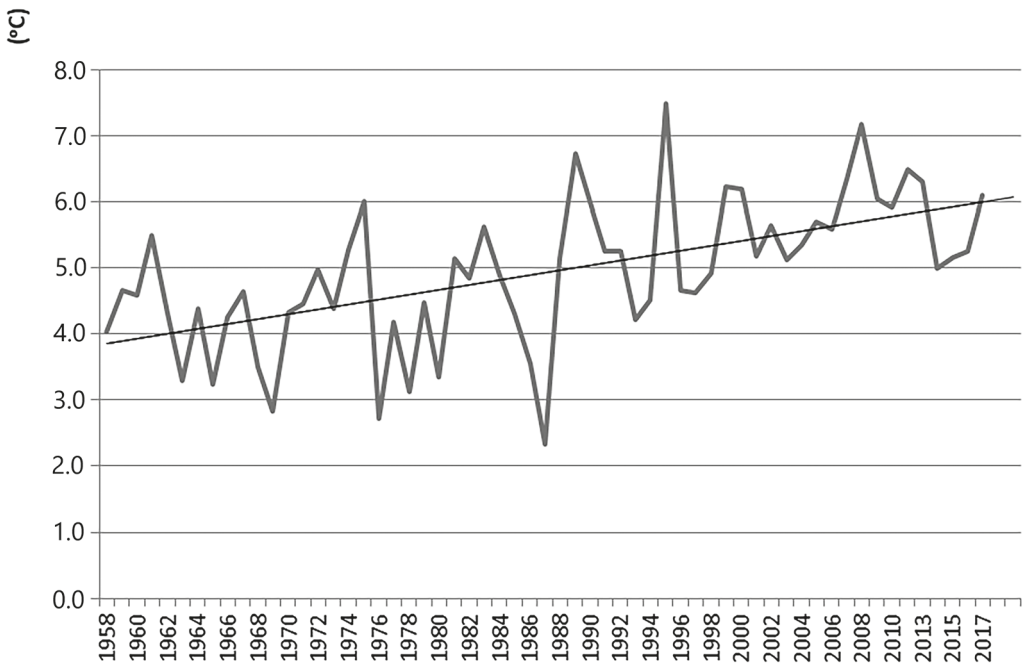


Рис. 11. График динамики среднегодовых значений температур в г. Западная Двина



Таблица 9. Коэффициенты корреляции различных реальных классов и климатических факторов на объектах исследования

| Класс         | Осадки | Температура | Класс          | Осадки | Температура | Класс                 | Осадки | Температура |
|---------------|--------|-------------|----------------|--------|-------------|-----------------------|--------|-------------|
| 0–1           | 0.01   | –0.56       | 0–1            | 0.19   | –0.33       | 0–1                   | 0.15   | –0.53       |
| 2–3           | 0.27   | 0.07        | 2–3            | 0.07   | –0.60       | 2–3                   | –0.24  | 0.13        |
| 4–5           | –0.26  | –0.36       | 4–5            | 0.04   | –0.57       | 4–5                   | –0.04  | –0.38       |
| 6–7           | 0.12   | 0.59        | 6–7            | 0.14   | 0.59        | 6–7                   | 0.08   | 0.60        |
| 7+            | –0.25  | 0.45        | 7+             | –0.23  | 0.48        | 7+                    | –0.25  | 0.46        |
| Усвятский Мох |        |             | Ламтевский Мох |        |             | Большой Роговской Мох |        |             |

за рассматриваемый период количество осадков увеличилось с 660 до 800 мм/год, а температура повысилась с 3.9 до 6.1 °С.

Для оценки влияния климатического фактора на изменение облесенности для болотного массива Большой Роговской Мох рассматривалась только осушенная часть, поскольку неосушенная часть не проявляла четкой динамики. Коэффициенты корреляции (табл. 9.) в целом находятся в узком диапазоне — от –0.8 до 0.8, что говорит об их незначительной взаимосвязи. Однако для некоторых реальных классов коэффициенты корреляции выходят за пределы и составляют величины от –0.5 до 0.5, что указывает на существующую, хоть и несильную, связь между изменением климата и динамикой роста древостоя. Особенно заметна связь с температурой, в то время как динамика роста древостоя слабо связана с количеством осадков.

#### 4. Заключение

Дистанционно была выполнена первоначальная классификация объектов исследования с целью определения пробных площадей, для которых предполагалось получить таксационные характеристики. В полевых условиях были получены данные для 33 пробных площадей, где были измерены характеристики древостоя.

В камеральных условиях была собрана библиотека снимков на основе всех поколений спутников Landsat. Были проведены итерации по выбору оптимального вегетационного индекса, и SWVI (коротковолновый вегетационный индекс) оказался лучшим для зимнего периода. Зимний период был предпочтителен из-за уменьшения влияния напочвенного покрова на спутниковые изображения, хотя выбор спутниковых снимков за зиму был ограничен из-за короткого светового дня и обильной облачности.

После этого была выполнена неконтролируемая классификация библиотеки спутниковых снимков за зимний период с 1976 по 2022 г. и выделены пять реальных классов с разными сомкнутостями крон. Это позволило отследить динамику роста древостоя на исследуемых болотных массивах. Общая тенденция к облесению была замечена на всех массивах, однако проявление этой тенденции отличалось по каждому из них.

Для болотного массива Усвятский Мох были замечены следующие изменения площадей классов с сомкнутостью крон: 0–0.1 — с 114 до 3 га; 0.2–0.3 — с 42 до 31 га; 0.4–0.5 — с 82 до 68 га; 0.6–0.7 — с 0 до 85 га; 0.8–1.0 — с 0 до 57 га. Это связано

с полным осушением данного болотного массива. В настоящее время «болотные» классы занимают минимальные площади, а «лесные» классы — максимальные. Переходные классы занимают промежуточное положение, но они доминировали с 1986 по 2016 г. Ожидается, что дальше древостой продолжит развиваться и увеличит свою сомкнутость.

Для болотного массива Большой Роговской Мох, который осушен частично, произошли следующие изменения площадей реальных классов осушенной части: класс 0–1 уменьшился с 640 до 278 га; 2–3 — с 102 до 75 га, в то время как для классов 4–5 наблюдалось увеличение с 88 до 99 га, 6–7 — с 0 до 155 га; а 7+ — с 0 до 220 га. Общая динамика роста древостоя напоминает тенденцию на болотном массиве Усвятский Мох, но есть различия. Основное отличие заключается в том, что класс 0–1 занимает значительную площадь, связанную с неосушенной центральной частью.

Для центральной неосушенной части болотного массива Большой Роговской Мох практически не наблюдалось динамики роста древостоя, изменения затронули только три класса с наименьшей сомкнутостью крон. Площадь класса 0–1 уменьшилась незначительно — с 68.04 до 67.73 га, в то время как в классах 2–3 и 4–5 произошло увеличение с 0 до 0.27 га и с 0 до 0.09 га соответственно. Хотя общая тенденция прослеживается, возможно, эти изменения связаны с технической ошибкой, и требуется дальнейший мониторинг для подтверждения результатов.

Для болотного массива Ламтевский Мох, который не был осушен, наблюдается следующее распределение площадей реальных классов: класс 0–1 уменьшился с 527 до 389 га; 2–3 — с 125 до 39 га; 4–5 — с 183 до 56 га; для класса 6–7 увеличился с 0 до 121 га; а для 7+ — с 0 до 231 га. Положительный прирост замечен только у самых лесистых классов. Это объясняется границами массива, которые захватывают лесные ландшафты на окраинах, а также максимальной облесенностью на минеральных островах. Переходные классы занимают наименьшую площадь, и, вероятно, тенденция к увеличению количества древостоя будет сохраняться до определенного порога (Егоров и др., 2023а). Корреляция между климатическим фактором и изменением сомкнутости крон, хоть и несильная, все же наблюдается, особенно для температуры. Общие тренды показателей изменения климата остаются положительными, как для средней годовой температуры, так и для годового количества осадков.

Методика доказала свою эффективность, и ее можно рекомендовать для применения на аналогичных объектах. Чтобы повысить точность, следует использовать съемку с более высоким пространственным разрешением и расширить количество пробных площадей для лучшей коррекции классификации. Таким образом, экспериментально подтверждена гипотеза о росте облесенности верховых болот, который, вероятно, связан с изменениями климата.

В 2023 г. сбор данных на Западновинском лесоболотном стационаре продолжился. Были заложены новые пробные площади (в том числе на болотном массиве Ламтевский Мох, который не посещался ранее). 15 августа 2023 г. осуществлялась съемка с помощью беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Pro с высоты относительно поверхности Земли 300 м (7.5 см/пикс) объекта Усвятский Мох. С помощью программы AgisoftMetashape после выравнивания снимков были построены плотное облако точек, цифровая модель местности и ортофотоплан.

Важно отметить, что в архивах Института лесоведения РАН находится ортофотоплан Западновинского лесоболотного стационара, который был выполнен

в 1980-х годах. В перспективе это открывает широкие возможности для изучения объектов исследования.

Оцифровка архивного ортофотоплана и дальнейшее его сравнение с данными БПЛА (в дальнейшем планируется получить и ортофотопланы оставшихся объектов) позволит более детально отследить изменения площадей различных классов. Также данные БПЛА помогут разрешить часть методических вопросов, которые накопились в ходе исследования, и дать некоторые средние характеристики древостоя.

## Благодарности

Авторы благодарны К. Л. Шахматову (Тверской государственной технической университет) за помощь в проведении съемки БПЛА.

## Литература

- Аболин, Р.И. (1915). Болотные формы *Pinus silvestris* L. *Труды Ботанического музея Академии наук*, 14, 62–84.
- Ветров, Л. С., ред. (2013). *Таксация леса: методические указания*. СПб.: СПбГЛТУ.
- Вомперский, С.Э., Иванов, А.И., Цыганова, О.П., Валяева, Н.А., Глухова, Т.В., Дубинин, А.И., Глухов, А.И., Маркелова, Л.Г. (1994). Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах. *Почвоведение*, 12, 17–25.
- Вомперский, С.Э., Сирина, А.А., Цыганова, О.П., Валяева, Н.А., Майков, Д.А. (2005). Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 5, 39–50.
- Вомперский, С.Э., Глухова, Т.В., Смагина, М.В., Ковалев, А.Г. (2007). Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах. *Лесоведение*, 6, 35–44.
- Дорофеев, А.А. и Хохлова, Е.Р. (2016). *Ландшафты Тверской области*. Тверь: Тверской государственный университет.
- Егоров, К.П., Медведева, М.А., Галанина, О.В., Сирина, А.А. (2023а). Изменение облесенности верховых болот за последние десятилетия: некоторые данные (на примере объектов Западнодвинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН, Тверская область). В: *XII Галкинские чтения. Типы болот регионов России: материалы конференции*. СПб.: Изд-во БИН РАН, 71–73.
- Егоров, К.П., Медведева, М.А., Галанина, О.В., Сирина, А.А. (2023б). Меняется ли облесенность верховых болот? Методика и предварительные результаты. В: *Болота Северной Евразии: биосферные функции, разнообразие и управление. Тезисы докладов международного симпозиума*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 31–32.
- Кац, Н.Я. (1971). *Болота земного шара*. М.: Наука.
- Молчанов, А.А., ред. (1982). *Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидро-мелиорацией*. М.: Наука.
- Столярова, В.В., Любимов, А.В., Будник, М.Г., Галанина, Ю.А. (2019). Использование вегетационных индексов для оценки состояния растительности по материалам дистанционного зондирования. В: *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV научно-технической конференции*. СПб.: Политех-Пресс, 61–63.
- Сукачев, В.Н. (1905). О болотной сосне. *Лесной журнал СПб.*, 35 (3), 354–372.
- Buschmann, C. and Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (4), 711–722. <https://doi.org/10.1080/01431169308904370>
- Elvidge, C. D. and Lyon, R. J. P. (1985). Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sensing of Environment*, 17 (3). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90099-9)
- Forgy, E. (1965). Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *Biometrics*, 21, 768–780.
- Gamon, J. A. and Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143 (1), 105–117. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x>



- Gunnarsson, U., Sjörs, H., Rydin, H. (2000). Diversity and pH changes after 50 years on the boreal mire Skattlösbergs Stormosse, Central Sweden. *Journal of Vegetation Science*, 11, 277–286.
- Hardisky, M. A., Klemas, V., Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina Alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48 (1), 77–84.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang Y., Shao G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17 (1), 37–53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7)
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50 (4), 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Liu, Y., Hatou, K., Aihara, T., Kurose, S., Akiyama, T., Kohno, Y., Lu, S., Omasa, K. (2021). A Robust Vegetation Index Based on Different UAV RGB Images to Estimate SPAD Values of Naked Barley Leaves. *Remote Sensing*, 13 (4), 686. <https://doi.org/10.3390/rs13040686>
- Masson-Delmotte, V., ed. (2021). *IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- rp5.ru (2022). *Расписание погоды* [online] Доступно на: <https://rp5.ru/> [Дата доступа 02.05.2022].
- Rubin, J. (1967). Optimal classification into groups: an approach for solving the taxonomy problem. *Theoretical Biology*, 15, 103–144.
- Rydin, H. and Jeglum, J. (2013). *The biology of peatlands*. 2<sup>nd</sup> edn. Oxford: Oxford University Press.
- Salomonson, V. V. and Appel, I. (2006). Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (7), 1747–1756. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.876029>

Статья поступила в редакцию 29 февраля 2024 г.

Статья рекомендована к печати 20 июня 2024 г.

Информация об авторах:

Егоров Кирилл Петрович — <https://orcid.org/0009-0007-0092-95-05>, 79066516829@yandex.ru

Медведева Мария Андреевна — <https://orcid.org/0000-0002-3511-6535>, eveeza@yandex.ru

Галанина Ольга Владимировна — <https://orcid.org/0000-0001-5723-309X>, o.galanina@spbu.ru

## Dynamics of the forest cover of raised bogs in southern taiga: Zapadnaya Dvina forest peatland station as an example (Tver region)\*

K. P. Egorov<sup>1</sup>, M. A. Medvedeva<sup>1</sup>, O. V. Galanina<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,  
21, ul. Sovetskaya, Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

<sup>3</sup> Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
2, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russian Federation

**For citation:** Egorov, K. P., Medvedeva, M. A., Galanina, O. V. (2024). Dynamics of the forest cover of raised bogs in southern taiga: Zapadnaya Dvina forest peatland station as an example (Tver region). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (3), 528–550. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.308> (In Russian)

\* The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-74-00067).

The article is devoted to testing the hypothesis about the current increase in the forest cover of raised bogs in the forest zone, depending on changes in climatic conditions. To analyze the dynamics of forest cover using the example of raised bogs in the Tver region, a methodology was developed based on the use of different generations of Landsat satellite data. The methodology was tested on ground data and applied to analyze changes in forest cover between 1976 and 2022 in several raised bog areas, including undisturbed areas and areas drained for forestry. The study tested approximately 20 vegetation indices across a variety of surveys, including summer and winter (snow) conditions. The classification results were verified using planting taxation data on circular plots and assessed using error matrices. Moderate-resolution Landsat satellite imagery, especially winter imagery, has been found to be suitable for long-term analysis of afforestation dynamics in raised bogs. An optimal vegetation index SWVI (Short wave vegetation index) and classification technique are proposed. The results of the study showed that afforestation increases in all undrained areas of raised bogs, regardless of their initial state. The smallest changes are observed for areas with low crown density (0–0.1), to a greater extent for density 0.2–0.3, and the greatest changes occur in areas with high crown density (0.6–0.7 and higher).

**Keywords:** raised bogs, dynamics of the forest cover, remote sensing, satellite imagery, Landsat, vegetation index, climate change, forest drainage.

## References

- Abolin, R. I. (1915). Bog forms of *Pinus silvestris* L. *Trudy Botanicheskogo muzeia Akademii nauk*, 14, 62–84. (In Russian)
- Buschmann, C. and Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (4), 711–722. <https://doi.org/10.1080/01431169308904370>
- Dorofeev, A. A. and Hohlova, E. R. (2016). *Landscapes of the Tver region*. Tver: Tver State University Press. (In Russian)
- Egorov, K. P., Medvedeva, M. A., Galanina, O. V., Sirin, A. A. (2023a). Changes in the forest cover of raised bogs over recent decades (some data on the sites of the West-Dvina forest-peatland station of IFS RAS, Tver region). In: *Tipy bolot regionov Rossii: materialy konferentsii "XII Galkinskie chtenia"*. St Petersburg: BIN RAN Publ., 71–73. (In Russian)
- Egorov, K. P., Medvedeva, M. A., Galanina, O. V., Sirin, A. A. (2023b). Does forestation rate of raised bogs change? The methods and the preliminary results. In: *Bolota Severnoi Evrazii: biosfernyie funktsii, raznoobraziie i upravleniie: tezisy dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma*. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentri RAN Publ., 31–32. (In Russian)
- Elvidge, C. D. and Lyon, R. J. P. (1985). Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sensing of Environment*, 17 (3). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90099-9)
- Forgy, E. (1965). Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *Biometrics*, 21, 768–780.
- Gamon, J. A. and Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143 (1), 105–117. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x>
- Gunnarsson, U., Sjörs, H., Rydin, H. (2000). Diversity and pH changes after 50 years on the boreal mire Skattlösbergs Stormosse, Central Sweden. *Journal of Vegetation Science*, 11, 277–286.
- Hardisky, M. A., Klemas, V., Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina Alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48 (1), 77–84.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17 (1), 37–53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7)

- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50 (4), 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Kats, N. Ya. (1971). *Mires of the World*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Liu, Y., Hatou, K., Aihara, T., Kurose, S., Akiyama, T., Kohno, Y., Lu, S., Omasa, K. (2021). A Robust Vegetation Index Based on Different UAV RGB Images to Estimate SPAD Values of Naked Barley Leaves. *Remote Sensing*, 13 (4), 686. <https://doi.org/10.3390/rs13040686>
- Masson-Delmotte, V. ed (2021). *IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Molchanov, A. A., ed. (1982). *Biogeocenological study of swamp forests in relation to experimental hydromelioration*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- rp5.ru (2022). *Weather Schedule* [online] Available at: <https://rp5.ru/> [Accessed 02.05.2022].
- Rubin, J. (1967). Optimal classification into groups: an approach for solving the taxonomy problem. *Theoretical Biology*, 15, 103–144.
- Rydin, H., Jeglum, J. (2013). *The biology of peatlands*. 2<sup>nd</sup> edn. Oxford: Oxford University Press.
- Salomonson, V. V. and Appel, I. (2006). Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (7), 1747–1756. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.876029>
- Stolyarova, V. V., Lyubimov A. V., Budnik M. G., Galanina Yu. A. (2019). Vegetation indices using to assess the state of vegetation cover based on remote sensing data. In: *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie. Materialy IV nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. St Petersburg, Politekh-Press Publ., 61–63. (In Russian)
- Sukachev, V. N. (1905). About bog pine. *Lesnoi zhurnal SPb.*, 35 (3), 354–372. (In Russian)
- Vetrov, L. S., ed. (2013). *Taksatsia lesa: Metodicheskie ukazania*. St Petersburg: SPbGLTU Publ. (In Russian)
- Vomperskii, S. E., Glukhova, T. V., Smagina, M. V., Kovalev, A. G. (2007). Conditions and consequences of wildfires in pine forests on the drained mires. *Russian Journal of Forest Science*, 6, 35–44. (In Russian)
- Vomperskiy, S. E., Ivanov, A. I., Tsyganova, O. P., Valyaeva, N. A., Glukhova, T. V., Dubinin, A. I., Glukhov, A. I., Markelova, L. G. (1994). Paludified soils and mires of Russia and carbon pool of their peat. *Soil Science*, 12, 17–25. (In Russian)
- Vompersky, S. E., Sirin, A. A., Tsyganova, O. P., Valyaeva, N. A., Maikov, D. A. (2005). Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii nauk. Seriiia geograficheskaiia*, 5, 9–50. (In Russian)

Received: February 29, 2024

Accepted: June 20, 2024

#### Authors' information:

Kirill P. Egorov — <https://orcid.org/0009-0007-0092-95-05>, [79066516829@yandex.ru](mailto:79066516829@yandex.ru)

Maria A. Medvedeva — <https://orcid.org/0000-0002-3511-6535>, [eveeza@yandex.ru](mailto:eveeza@yandex.ru)

Olga V. Galanina — <https://orcid.org/0000-0001-5723-309X>, [o.galanina@spbu.ru](mailto:o.galanina@spbu.ru)