# Многолетняя динамика состояния ельников заказника «Озеро Щучье» по спутниковым данным

**А. В. Киселев[1], А. А. Тронин[1], С. Г. Крицук[1], В. И. Горный[1], В. Н. Храмцов[2]**

[1] *Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 199178, Россия*
*E-mail: kiselev.a@spcras.ru*

[2] *Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН*
*Санкт-Петербург, 197376, Россия*

Работа посвящена определению состояния лесов регионального природного заказника «Озеро Щучье» (Санкт-Петербург) и прилегающих территорий на основе спутниковых данных среднего разрешения. С 2021 г. по данным спутниковых наблюдений регистрируется усыхание ельников. Для территории заказника определена доля повреждённых ельников. В результате сравнения двух спектральных индексов — вегетационного (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и водного (*англ.* Normalized Difference Water Index — NDWI) установлено, что наилучшим образом повреждения определяются индексом NDWI по данным спутника Sentinel-2. Заказник «Озеро Щучье» представляет собой уникальный природный объект в пределах Санкт-Петербурга, организованный для сохранения массива типичных для Карельского перешейка таёжных лесов, комплекса водно-ледниковых форм рельефа. Актуальность исследования определяется высокой рекреационной ценностью объекта и происходящих в нём быстрых изменений в растительных сообществах. Цель исследования заключается в анализе динамики состояния лесов заказника, в первую очередь еловых древостоев. В качестве метода исследования была применена многоспектральная космическая съёмка со спутников Landsat-7 и Sentinel-2. Обработка данных заключалась в построении вегетационных индексов, характеризующих состояние растительности. На следующем этапе были построены временные ряды индексов на различные участки леса, рассчитывались площади поражённых ельников. Ежегодно проводились осмотры состояния леса заказника. В результате исследований было обнаружено резкое изменение состояния еловых лесов на территории заказника. С 2022 г. наблюдается существенное снижение вегетационных индексов еловых лесов. В настоящее время на многих участках леса взрослые ели полностью погибли. На 2024 г. объёмы повреждения леса в заказнике оцениваются в 124 га по сравнению с 2018 г., что составляет около 12 % от общей площади лесов. Объёмы повреждений ельников достигают 74 га, что соответствует приблизительно 55 % от площади ельников, есть поражение и елово-сосновых лесов. Предполагаемая причина усыхания ельников — массовая вспышка численности короеда-типографа. Состояние других лесов заказника, в первую очередь сосновых, не вызывает опасений, кроме высокой рекреационной нагрузки. В заключение можно сделать следующие выводы: спутниковые данные среднего разрешения эффективны для оценки состояния лесов и позволяют обнаружить резкие изменения растительности, также необходимо проведение совместных мероприятий органов власти Санкт-Петербурга и Ленинградской области по предотвращению дальнейшего ущерба лесам.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, спутник, здоровье экосистем, Карельский перешеек, короед-типограф, деградация ельников

Одобрена к печати: 14.03.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-173-185

## Введение

Заказник «Озеро Щучье» представляет собой уникальный природный объект в пределах Санкт-Петербурга, созданный для сохранения массива типичных для Карельского перешейка таёжных лесов и комплекса водно-ледниковых форм рельефа. В состав заказника, площадь которого составляет 1157 га, входит крупнейший елово-сосновый таёжный массив в пределах Санкт-Петербурга, в котором особую ценность представляют участки старовозрастных еловых лесов. Возраст некоторых деревьев достигает 150–160 лет. Несмотря на хозяйственное освоение местности и близость Санкт-Петербурга, уникальные природные

комплексы заказника не претерпели значительных изменений: его хвойные леса и болота остаются малонарушенными. В настоящее время заказник испытывает высокую рекреационную нагрузку.

Территория заказника хорошо изучена, в 2017 г. была опубликована монография «Природа заказника «Озеро Щучье» (Природа..., 2017), которая обобщила и систематизировала большое количество информации о современном состоянии экосистем и их прошлом. В заказнике заложено несколько пробных площадей для многолетнего мониторинга древесной растительности, в первую очередь хвойных лесов, что делает эту территорию привлекательной для валидации данных дистанционного зондирования. Для картирования хвойных лесов и повреждения деревьев широко используются дистанционные методы исследований (Катковский и др., 2022; Einzmann et al., 2021; Rautiainen et al., 2018). В последние годы отмечены случаи массового усыхания ельников в Ленинградской области и Санкт-Петербурге (*рис. 1*). Цель настоящей работы заключается в исследовании возможности применения данных спутникового дистанционного зондирования для практической оценки повреждения еловых лесов.



*Рис. 1.* Фотография усыхающего ельника. Заказник «Озеро Щучье», пробная площадь ОЩ-1, 21 августа 2024 г.

## Данные и методы

### *Наземные данные и методы исследований*

В современном растительном покрове территории заказника, характеризующейся довольно расчленённым рельефом, преобладают сосновые и еловые леса, чередующиеся достаточно закономерно по элементам рельефа. Сосновые леса занимают наиболее высокие верхние части камовых холмов, еловые леса распространены на более выположенных холмах, на склонах и в понижениях. Сосновые леса со значительной примесью берёзы характерны и для плоских равнинных участков (террас) с бедными песчаными почвами, заболоченные сосняки встречаются по окраинам болот (Природа..., 2017).

Площадь, занимаемая чисто еловыми древостоями в заказнике, составляет 12,4 %, а вместе с елово-сосновыми и сосново-еловыми — 44,5 %, тогда как чисто сосновые леса составляют 44,2 % (*табл. 1*).

Еловые леса на территории заказника представлены зеленомошными лесами на дренированных местообитаниях и сфагновыми — на участках с избыточным увлажнением, последние значительно меньше других подвергались пожарам. Наибольшие площади заняты елово-

сосновыми и сосново-еловыми лесами, в которых активно идёт процесс восстановления ели. Среди еловых и сосново-еловых лесов преобладают среднетаёжные типы. В южной части заказника на склонах холмов произрастают ельники зеленомошные и мелкотравно-зеленомошные. Они характеризуются довольно сомкнутыми (0,7) древостоями, в которых высота елей достигает 28–30 м, диаметр стволов — 35–40 см. В подлеске единично встречаются рябина и крушина, подрост ели малочисленный (Природа..., 2017).

*Таблица 1.* Площадь, занимаемая различными типами растительных сообществ в заказнике «Озеро Щучье» (Природа..., 2017)

| Типы растительных сообществ | Площадь | |
|---|---|---|
| | га | % |
| ЛЕСА | 1066,5 | 97,4 |
| Хвойные | 970,1 | 88,7 |
| Еловые | 135,5 | 12,4 |
| • зеленомошные | 70,9 | 6,5 |
| • папоротниковые | 3,3 | 0,3 |
| • сфагновые | 61,3 | 5,6 |
| Елово-сосновые и сосново-еловые | 351,0 | 32,1 |
| • кисличные | 1,5 | 0,1 |
| • зеленомошные | 248,6 | 22,7 |
| • травяные | 22,8 | 2,1 |
| • сфагновые | 78,1 | 7,1 |
| Сосновые | 483,6 | 44,2 |
| • зеленомошные | 306,0 | 27,9 |
| • травяные | 65,1 | 5,9 |
| • сфагновые | 112,5 | 10,3 |
| Мелколиственные | 96,4 | 8,8 |
| Берёзовые | 96,4 | 8,8 |
| • травяные и черничные | 45,1 | 4,1 |
| • сфагновые | 51,3 | 4,7 |
| БОЛОТНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ | 19,4 | 1,8 |
| Олиготрофные и мезоолиготрофные сообщества | 11,8 | 1,1 |
| Мезотрофные сообщества | 6,0 | 0,5 |
| Евтрофные сообщества | 1,6 | 0,1 |
| ЛУГОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ | 2,6 | 0,2 |
| Территории с застройкой и культурной растительностью | 6,5 | 0,6 |
| ВСЕГО | 1095,0 | 100,0 |

На территории было заложено несколько пробных площадей, на которых один раз в несколько лет проводится полный комплекс наблюдений, включающий таксацию древостоя подроста и подлеска, оценку состояния деревьев, учёт редких видов, фотофиксацию и многое другое.

Одна из площадей располагается в чисто еловом лесу, в восточной части заказника. Пробная площадь ОЩ-1 заложена в 2011 г. на плоской заболоченной равнине на безвалунных песках и супесях с маломощным торфом (20–50 см). Имеет форму квадрата размером 50×50 м; стороны ориентированы по сторонам света. Микрорельеф представлен приствольными повышениями, буграми на месте бывших выворотов высотой до 0,9 м и диаметром

до 2 м, занимающими около 15 % площади. Явные признаки антропогенного воздействия отсутствуют. Почва торфянисто-слабоподзолистая иллювиально-железистая. Растительное сообщество: ельник чернично-сфагновый. Средний возраст древостоя — 148 лет, он варьирует от 45 до 165 лет. Насаждение условно одновозрастное, с преобладанием одного поколения ели 125–165 лет. На ОЩ-1 представлены наиболее старые еловые леса в пределах территории заказника «Озеро Щучье». Класс бонитета — IV. Среди елей преобладают деревья с диаметром 24–28 см; сосны имеют диаметр 33–46 см.

Для сравнения состояния еловых лесов с сосновыми по вегетационным индексам также использовалась информация по пробной площади ОЩ-2, представляющей собой кустарничково-зеленомошный сосняк.

### *Спутниковые данные и методы исследований*

Для мониторинга состояния лесов использовались спутниковые данные двух систем дистанционного зондирования: Landsat и Sentinel-2. Система спутников Landsat обеспечивает разрешение на местности 30 м и период наблюдений с 1980-х гг. по настоящее время, тогда как спутник Sentinel-2 позволяет получить разрешение в 10–20 м, но наблюдения ведутся с 2017 г. по настоящее время. Сравнение спектральных характеристик приборов дистанционного зондирования спутников представлено на *рис. 2.* Использованные для анализа состояния лесов спутниковые данные приведены в *табл. 2.* Не все спутниковые данные применены для анализа, многие сцены были забракованы из-за облачности на исследуемом участке или из-за брака в наблюдениях.

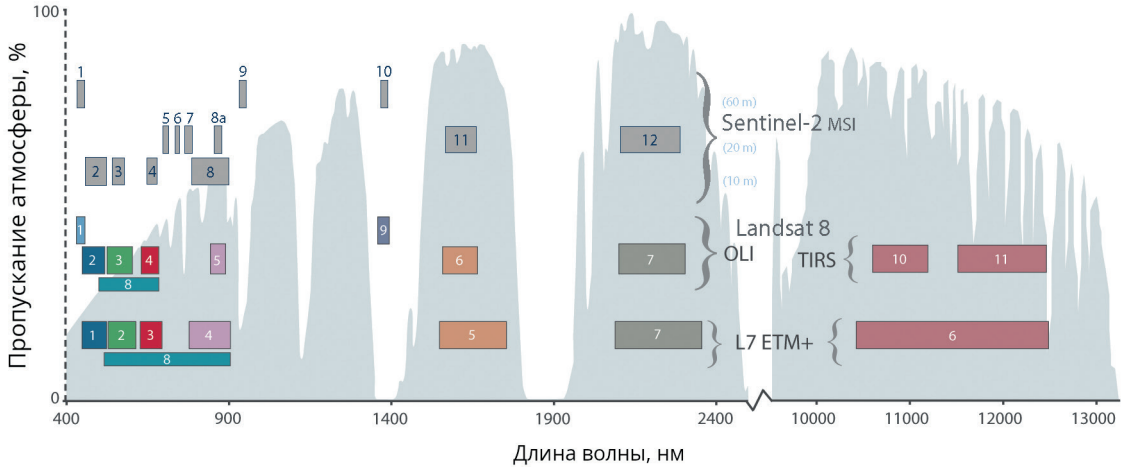



*Рис. 2.* Сравнение спектральных каналов (цифры в прямоугольниках) приборов дистанционного зондирования спутников Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2 (https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2-comparison-sentinel-2-and-landsat)

*Таблица 2.* Данные спутников Landsat-7, Sentinel-2, использованные в работе

| Спутник | Временной интервал | Количество сцен |
|---|---|---|
| Landsat-7 | 11.07.2002–15.08.2023 | 19 |
| Sentinel-2 | 01.06.2018–19.09.2024 | 48 |

Для мониторинга состояния лесов широкое распространение получили спектральные методы дистанционного зондирования, основанные на различиях спектральных свойств здоровых и повреждённых деревьев. Анализ полученных спектров в зависимости от степени повреждения растений показал возможность использования различных спектральных индексов для выявления процессов усыхания. Для детектирования процессов усыхания ели евро-

пейской спутниковыми средствами дистанционного зондирования были предложены различные варианты нормированных индексов в диапазоне 400–900 нм (Катковский и др., 2022).

Исследования, использующие более широкий спектральный диапазон — от 400 до 2500 нм — для обнаружения признаков усыхания ели, пришли к сходным результатам (Brovkina et al., 2017; Einzmann et al., 2021). Точность определения степени повреждения леса незначительно варьирует от применённого индекса и сильно зависит от местных условий, поэтому использование сложных индексов или создание новых, по-видимому, нецелесообразно.

Резюмируя анализ исследований по выбору оптимальных индикаторов процессов усыхания еловых лесов, можно заключить, что для условий на северо-западе России целесообразно использовать два типа индексов: индексы листовых пигментов и плотности растительности и индексы водного стресса. Исходя из практических целей локализации очагов поражения ельников следует использовать простые индексы — нормированный дифференцированный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и нормированный дифференцированный водный индекс NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996), рассчитанные по данным спутников Landsat и Sentinel.

Для анализа состояния растительности в районе заказника нами использовались индексы NDVI и NDWI, вычисленные по формулам, приведённым в *табл. 3*.

*Таблица 3.* Формулы расчёта индексов NDVI и NDWI

| Индекс | Формула | Спутник | Номер канала | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Red | NIR | Mid-IR |
| NDVI | (NIR – Red)/(NIR + Red) | Landsat-7 | B3 | B4 | – |
| | | Sentinel-2 | B4 | B8 | – |
| NDWI | (NIR – Mid-IR)/(NIR + Mid-IR) | Landsat-7 | – | B4 | B5 |
| | | Sentinel-2 | – | B8 | B12 |

Примечание: NIR (*англ.* Near InfraRed) — отражение в ближней инфракрасной области спектра, Red — отражение в красной области спектра, Mid-IR (*англ.* Mid-InfraRed) — отражение в средней инфракрасной области спектра.

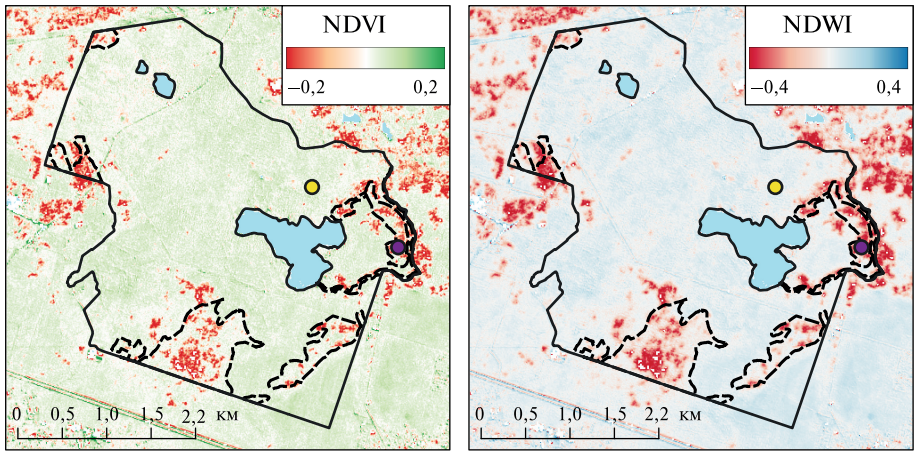
Используя спутниковые данные Landsat-7 и Sentinel-2, были построены индексы NDVI и NDWI на территорию заказника. По полученным индексам и координатам пробных площадей были сняты значения индексов в этих точках.

## Результаты

На первом этапе были составлены карты индексов NDVI и NDWI на территорию заказника и его окружение по данным спутников Landsat-7 и Sentinel-2. Затем были построены временные ряды индексов NDVI и NDWI и рассчитана разница между индексами, полученными в разные годы. На *рис. 3* (см. с. 178) приведена разница индексов NDVI и NDWI, вычисленная по съёмкам спутника Sentinel-2 от 21.08.2020 и 21.08.2023.

Территория заказника и окружающие его земли подвержены высокой антропогенной нагрузке. Значительные изменения вегетационных индексов за пределами заказника часто связаны со строительством коттеджных комплексов, с дорожным строительством и другими видами хозяйственной деятельности, что находит отражение в падении индексов в восточной и северной частях снимков. На территории заказника и его ближайшего окружения не ведётся активного строительства, и появление областей значительного падения индексов связано с процессами повреждения еловых лесов. Выполненные в течение 2022–2024 гг. наземные наблюдения полностью подтвердили данные спутниковых наблюдений (см. *рис. 1*).

На втором этапе были рассчитаны значения индексов NDVI и NDWI по данным спутников Landsat-7 и Sentinel-2 для пробных площадей ОЩ-1 и ОЩ-2 (*рис. 4* и *5*, см. с. 178).




*а* *б*

*Рис. 3.* Разница вегетационных индексов NDVI (*а*) и NDWI (*б*) для заказника «Озеро Щучье», вычисленная по съёмкам спутника Sentinel-2 от 21.08.2023 и 21.08.2020

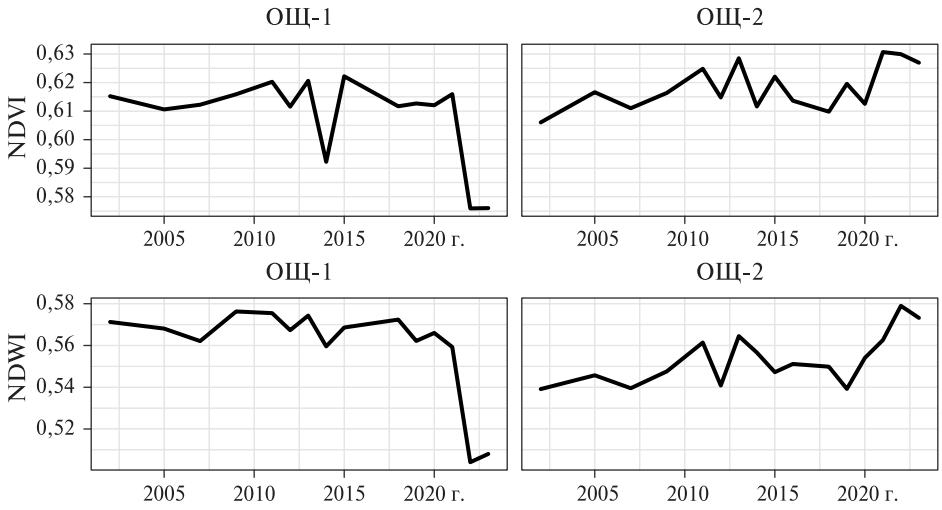



*Рис. 4.* Индексы NDVI и NDWI по данным спутника Landsat-7 для площадей ОЩ-1 — ель и ОЩ-2 — сосна

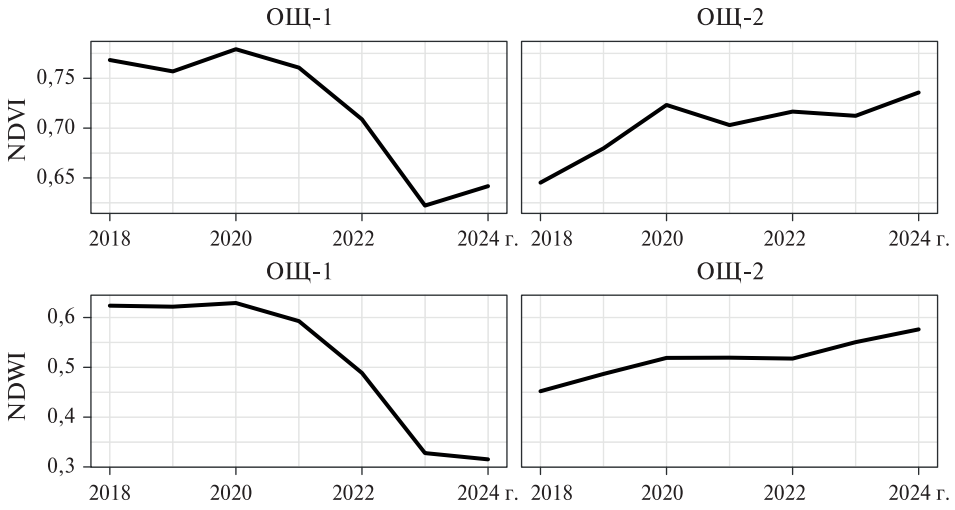



*Рис. 5.* Индексы NDVI и NDWI по данным спутника Sentinel-2 для площадей ОЩ-1 — ель и ОЩ-2 — сосна

Анализ показывает значительное расхождение NDVI на обеих площадях. Индекс NDVI по данным Sentinel-2 выше, чем у Landsat-7 за весь период наблюдений. Среднее отклонение по сосне было равно 16 %, а для ели — 20 % для здоровых растений. В период интенсивного повреждения растений в 2022 и 2023 гг. отклонение составило 9 и 12 % соответственно. Значения индекса NDWI по данным Sentinel-2 и Landsat-7 значительно ближе друг к другу. Для сосны индекс NDWI в среднем на 3 % меньше по данным Sentinel-2, чем по данным Landsat-7. Для ели NDWI на 8 % выше по данным Sentinel-2, чем по данным Landsat-7 для здоровых растений. Для периода усыхания ели в 2022 и 2023 гг. значения NDWI по данным Sentinel-2 стали значительно ниже значений по Landsat-7 и различия составили в 2023 г. 26 %. Подобного рода расхождения вегетационных индексов по данным Landsat-7 и Sentinel-2 отмечались и ранее (Perez, Vitale, 2023).

Реакция на повреждение ельников на площади ОЩ-1 по данным Landsat-7 и Sentinel-2 одинаково проявляется в индексах NDVI и NDWI, но с большими различиями в амплитуде, результаты показаны в *табл. 4* и *5*.

Результаты наземного мониторинга площади ОЩ-1 (ельник) и спутниковые данные приведены на *рис. 6*.

*Таблица 4.* Индексы NDVI и NDWI для пробной площади ОЩ-1 по данным Landsat-7

| | NDVI | NDWI |
|---|---|---|
| Среднее за период 2002–2021 гг. (здоровые ели) | 0,613 | 0,568 |
| Стандартное отклонение за период 2002–2021 гг. (здоровые ели) | 0,008 | 0,006 |
| Среднее за период 2022–2023 гг. (повреждённые ели) | 0,576 | 0,506 |
| Разница значений индекса здоровых и повреждённых растений | 0,037 (6 %) | 0,062 (11 %) |

*Таблица 5.* Индексы NDVI и NDWI для пробной площади ОЩ-1 по данным Sentinel-2

| | NDVI | NDWI |
|---|---|---|
| Среднее за период 2018–2021 гг. (здоровые ели) | 0,765 | 0,618 |
| Стандартное отклонение за период 2018–2021 гг. (здоровые ели) | 0,029 | 0,032 |
| Среднее за период 2022–2024 гг. (повреждённые ели) | 0,656 | 0,375 |
| Стандартное отклонение за период 2022–2024 гг. (повреждённые ели) | 0,066 | 0,101 |
| Разница значений индекса здоровых и повреждённых растений | 0,109 (14 %) | 0,243 (39 %) |
| Коэффициент вариации за период 2018–2021 гг. (здоровые ели) | 0,038 | 0,052 |
| Коэффициент вариации за период 2022–2024 гг. (повреждённые ели) | 0,101 | 0,296 |

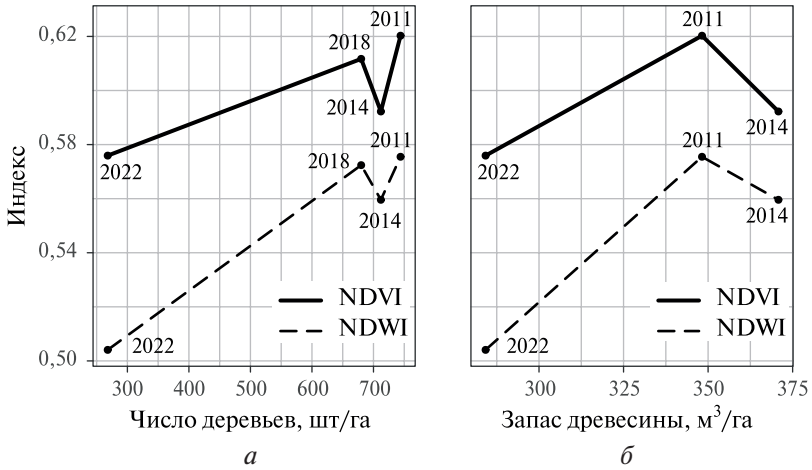



*Рис. 6.* Индексы NDVI и NDWI по данным Landsat-7 для площади ОЩ-1 в зависимости от числа живых деревьев (*а*) и запасов древесины (*б*)

Характер поведения индексов на повреждённых площадях даёт возможность выделить универсальный для всего заказника критерий нахождения момента повреждения. Повреждённые участки характеризуются высоким коэффициентом вариации индекса, который вычисляется как отношение стандартного отклонения к среднему за период (см. *табл. 5*). Построим в каждой точке региона временной ряд коэффициента вариации индексов NDVI и NDWI, т. е. значение коэффициента вариации на дату каждой съёмки с учётом только предшествующих измерений. Примеры таких рядов для контрольных площадей ОЩ-1 и ОЩ-2 приведены на *рис. 7*. Момент начала повреждения растительности определим в точке начала резкого изменения коэффициента вариации.

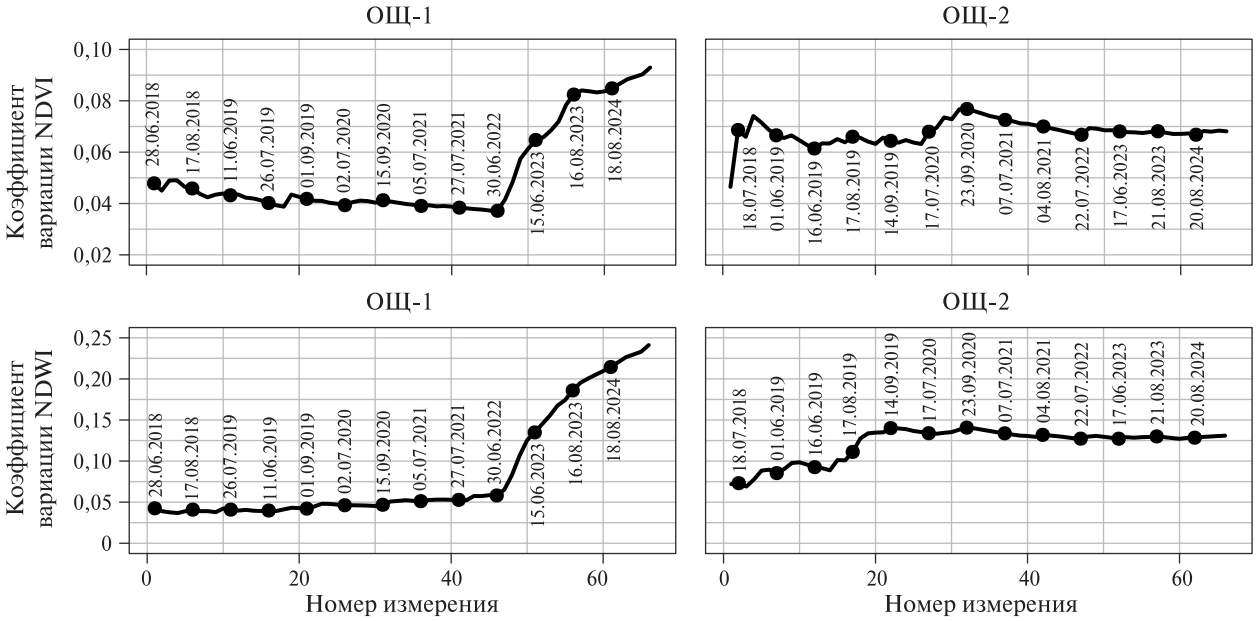



*Рис. 7.* Коэффициенты вариации индексов NDVI и NDWI по данным спутника Sentinel-2 для площадей ОЩ-1 — ель и ОЩ-2 — сосна (датами на графиках помечена каждая пятая точка)

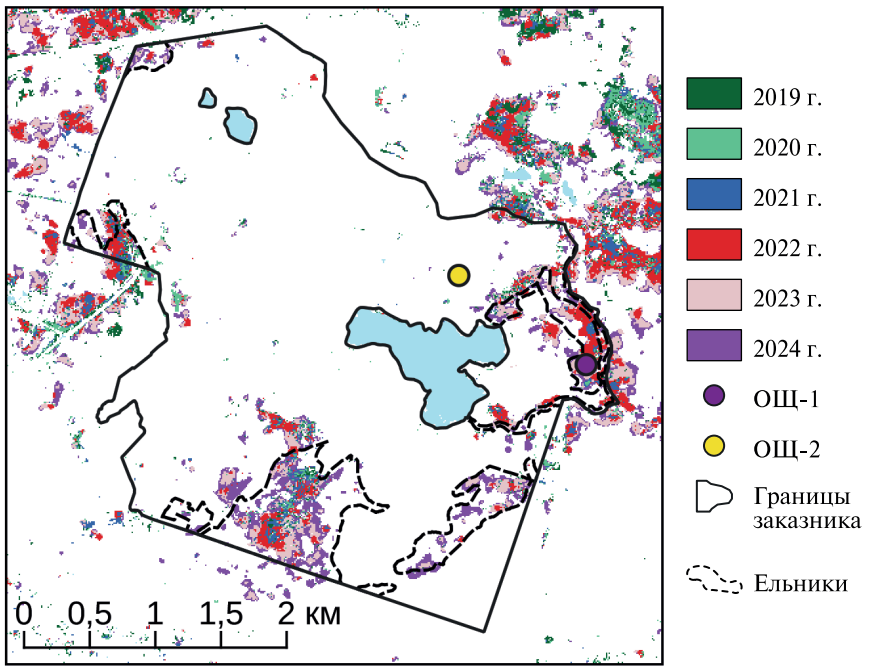



*Рис. 8.* Карта повреждённых участков заказника «Озеро Щучье» по результатам анализа изменений индекса NDWI спутника Sentinel-2

После определения дат (с точностью до года) моментов возникновения повреждений для территории заказника можно построить карту повреждённых участков (*рис. 8*, см. с. 180).

Результаты количественной оценки площади повреждений приведены на *рис. 9*.




*Рис. 9.* Накопленные повреждения леса заказника «Озеро Щучье» относительно 2018 г. по результатам анализа изменений индекса NDWI спутника Sentinel-2

## Обсуждение результатов

Картирование повреждённых участков леса с использованием коэффициента вариации простых индексов (водного и вегетационного) даёт хорошие результаты для такого объекта как лесной заказник. Любые изменения в лесном покрове быстро и контрастно отражаются в значениях индексов, что, при наличии большого массива данных спутника Sentinel-2, имеющего 10-метровое разрешение и до 10 безоблачных сцен в летний сезон, позволяет построить детальные карты деградации растительности и количественно оценить объём повреждений.

На карте (см. *рис. 8*) хорошо видно, что «ядра» повреждённых участков, появившиеся главным образом в 2022 г. (красный цвет в легенде), быстро расширились в последующие два года и заняли уже большую часть всех ельников. Также можно заметить, что первые потери произошли ещё в 2021 г. (тёмно-синий цвет в легенде).

Причина повреждения и усыхания еловых лесов на территории заказника «Озеро Щучье», по-видимому, кроется в массовом размножении особо опасного вредителя леса — короеда-типографа (*Ips typographus* L.). На это указывают характерные ходы короеда-типографа, наблюдаемые на стволах высохших деревьев. Эта информация подтверждается исследованиями Центра защиты леса Ленинградской области. В приспевающих, спелых и перестойных ельниках Ленинградской области и Республики Карелия основной вред насаждениям, вплоть до их гибели, нанесли два фактора: распространение стволовых вредителей, а именно короеда-типографа, и последствия ураганных ветров прошлых лет, а также переувлажнение почвы по причине изменения уровня грунтовых вод. По итогам 2023 г. общая площадь повреждённых и погибших лесов в Ленинградской области составила 12,3 тыс. га. По мнению лесопатологов, улучшению состояния лесного фонда на территории этих субъектов будет способствовать своевременное проведение санитарных рубок. В противном случае увеличение общего отпада только усугубит санитарное состояние лесов*.

В Рощинском лесничестве Ленинградской области, т. е. в непосредственной близости от заказника, в 2021 г. началась новая и потенциально сильная вспышка массового размножения короеда-типографа (Селиховкин и др., 2022): «Перманентное присутствие значительного количества короеда-типографа в ельниках этого региона создало предпосылки для быстрого увеличения численности этого вида. Спровоцировало развитие вспышки размножения резкое повышение температуры в июне – июле 2021 г., благодаря которому успешно

* Пресс-релиз ФБУ «Рослесозащита»: https://rcfh.ru/presscenter/novosti/tsentr-zashchity-lesa-leningradskoy-oblasti-proanaliziroval-osnovnye-prichiny-izmeneniya-sanitarnogo/.

развились два сестринских и два основных поколения. Массовое размножение двух генераций короеда-типографа в ельниках Карельского перешейка отмечено впервые». Все очаги в Рощинском лесничестве находились в спелых и перестойных ельниках, чистых или с небольшой примесью сосны. Преобладающий тип леса — ельник-черничник. По мнению авторов, резкое увеличение температуры в июне – июле 2021 г. обеспечило возможность быстрого развития первой генерации, сестринского поколения и появления второго поколения (Селиховкин и др., 2022).

Короед-типограф широко распространён в хвойных, преимущественно еловых лесах России. При определённых метеорологических условиях, таких как тёплая и сухая погода, он может резко увеличивать численность, приводя к гибели лесных насаждений на значительных площадях. Одна из последних массовых вспышек численности короеда-типографа произошла в 2011–2014 гг. в Центральной России, где особенно пострадала Московская область. Отмечалось, что вспышка была вызвана аномальной жарой 2010 г. (Гниненко, Хегай, 2018).

В 2014 г. на пробной площади ОЩ-1 насчитывалось 18 сухостойных деревьев (17 елей и 1 сосна), что составляло около 10 % от числа живых деревьев. Деревья погибли от поражения стволовыми насекомыми. В 2018 г. было отмечено 23 ели, 2 сосны и 1 берёза 5, 6, 7-й категории жизненного состояния. Интегральный показатель жизненности составил 2,7, что соответствует сильно ослабленному состоянию древостоя.

Тёплый биоклиматический период способствовал лучшей выживаемости насекомых и позволил им давать плодовитое потомство не один раз в год, а два или даже три раза (Гниненко, Хегай, 2018). По соседству с ОЩ-1 находится такой очаг поражения, краем заходящий на пробную площадь. В результате деятельности насекомых-вредителей уменьшается фитомасса крон, что приводит к ослаблению деревьев. Очаги короедов в условиях Северо-Запада развиваются довольно быстро (Кузьмина, 2006).

Предварительный анализ метеорологических данных на территорию Карельского перешейка показал, что зима 2019/2020 г. была необычно мягкой, что могло способствовать выживанию жуков, а летом 2021 г. наблюдалась жаркая погода с минимальным количеством осадков. Так, в Санкт-Петербурге в июле 2021 г. среднемесячная температура достигла 23,1 °С, что является вторым рекордом после июля 2010 г. Количество осадков в июне 2021 г. составило 22 мм при норме 62 мм, а в июле — 50 мм при норме в 82 мм. Такие условия способствуют лёту жуков, который начинается, когда температура воздуха превысит +18 °С (Маслов, 2010).

## Заключение

Мониторинг состояния лесов заказника «Озеро Щучье» и окружающих территорий, проведённый с помощью спутниковых и наземных методов, обнаружил повреждение и гибель еловых лесов. Детектирование процессов повреждения было выполнено по данным спутников Sentinel-2 и Landsat-7 с помощью вегетационных индексов NDVI и NDWI. Наилучшим образом повреждения определяются индексом NDWI по данным Sentinel-2.

Судя по данным спутниковых и наземных наблюдений, повреждения ельников на территории заказника начали регистрироваться в 2021 г., а значительный прирост площадей произошёл в 2022 г. Предполагаемая причина усыхания ельников — массовая вспышка численности короеда-типографа, на что указывают характерные ходы короеда-типографа под корой. Вспышка численности могла быть инициирована климатическими условиями в регионе: малоснежной и тёплой зимой 2019/2020 г. и засухой лета 2021 г.

По данным дистанционного зондирования повреждённые еловые леса на территории заказника занимают на 2024 г. 74 га, что составляет 55 % от общей площади ельников. Площадь повреждённых лесов оценивается в 49 га (5 % от общей площади лесов) на 2022 г. и 124 га (12 %) на 2024 г. Кроме ельников зафиксировано повреждение елей в елово-сосновых и сосново-еловых лесах. Таким образом, можно утверждать, что есть существенная угроза экологической безопасности лесных, прежде всего еловых, экосистем заказника.

Результаты наземных исследований динамики древостоя на ОЩ-1 за восемь лет (2014–2022) приводят к выводу о прогрессирующей деградации древостоя. Число живых деревьев за счёт усыхания и вывала уменьшилось на две трети. Берёза выпала из древостоя полностью. Преобладание ослабленных и сильно ослабленных деревьев у доминантной породы — ели, при наличии обширных окон вывала, позволяет с высокой вероятностью предположить почти полную гибель древостоя в течение ближайшего времени. Отсутствие благонадёжного подроста ели при его общей небольшой численности не позволяет сделать вывод о развитии процесса активного восстановления елового древостоя в ближайшие десятилетия. Следует отметить, что в 2014 г. отмечались активный прирост запаса древостоя и возможная связь с понижением уровня грунтовых вод. Засушливые годы могли привести к последующему осушению территории и ускорить выпад ели из древостоя, хотя на травяно-кустарничковом и моховом ярусе эти изменения практически не отразились. С распадом древостоя связано появление новых видов сосудистых растений и начавшееся изменение состава микрогруппировок.

В настоящее время за границами заказника проводятся ограниченные рубки усохших ельников и высаживается сосна. На территории заказника площадных рубок сухих ельников на конец 2024 г. не зафиксировано.

Для сохранения лесов заказника «Озеро Щучье» необходимо провести лесопатологическое обследование, составить карты повреждённых ельников, провести рубки усохших ельников вдоль дорог. По-видимому, возрождение чистых ельников на территории заказника нецелесообразно и следует рассмотреть перспективу посадок ели в сочетании с сосной и берёзой.

Исследования выполнены в рамках государственного задания по тематике «Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России» (FFZF-2025-0018).

## Литература

1. *Гниненко Ю. И.*, *Хегай И. В.* Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесохоз. информация. 2018. № 2. С. 65–74. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07.
2. *Катковский Л. В.*, *Силюк О. О.*, *Беляев Б. И. и др.* Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 88–102. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
3. *Кузьмина Д. А.* Анализ динамики вспышек массового размножения насекомых — вредителей леса на северо-западе России и оценка их хозяйственной значимости: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2006. 20 с.
4. *Маслов А. Д.* Короед-типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.
5. Природа заказника «Озеро Щучье» / ред. Волкова Е. А., Исаченко Г. А., Храмцов В. Н. СПб., 2017. 188 с. https://www.binran.ru/files/publications/monographs/Nature_of_the_Reserve_Ozero_Shchuchye_2017.pdf.
6. *Селиховкин А. В.*, *Мамаев Н. А.*, *Мартирова М. Б. и др.* Новая вспышка массового размножения короеда-типографа Ips typographus (L.) (Coleoptera, Curculionidae) в Ленинградской области // Энтомолог. обозрение. 2022. Т. 101. № 2. С. 239–251. DOI: 10.31857/S0367144522020034.
7. *Brovkina O.*, *Cienciala E.*, *Zemek F. et al.* Composite indicator for monitoring of Norway spruce stand decline // European J. Remote Sensing. 2017. V. 50. Iss. 1. P. 550–563. DOI: 10.1080/22797254.2017.1372697.
8. *Einzmann K.*, *Atzberger C.*, *Pinnel N. et al.* Early detection of spruce vitality loss with hyperspectral data: Results of an experimental study in Bavaria, Germany // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 266. Article 112676. 18 p. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112676.
9. *Gao B.-C.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. Iss. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. *Perez M.*, *Vitale M.* Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI, and Sentinel-2 MSI surface reflectance cross-comparison and harmonization over the Mediterranean basin area // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 16. Article 4008. DOI: 10.3390/rs15164008.
11. *Rautiainen M.*, *Lukeš P.*, *Homolová L. et al.* Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 2. Article 207. DOI: 10.3390/rs10020207.

# Long-term dynamics of spruce forests of Lake Shchuchye Reserve based on satellite data

**A. V. Kiselev [1], A. A. Tronin [1], S. G. Kritsuk [1], V. I. Gornyy [1], V. N. Khramtsov [2]**

[1] *Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS*
*Saint Petersburg 199178, Russia*
*E-mail: kiselev.a@spcras.ru*
[2] *Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia*

The work is devoted to determining the condition of the forests of the regional nature reserve Lake Shchuchye (Saint Petersburg) and adjacent territories using the medium-resolution satellite data. Since 2021, drying of spruce forests has been recorded based on satellite observations. The proportion of damaged spruce forests was determined for the territory of the reserve. As a result of comparison of two spectral indices — Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI) — it was found that the damage is perfectly indicated using the NDWI index computed from Sentinel-2 satellite data. Lake Shchuchye Reserve is a unique natural object within St. Petersburg area established to preserve the taiga forests typical of the Karelian Isthmus and a set of water-glacial landforms. The importance of the study is coming from significant recreational value of the object and rapid changes in plant communities occurring in it. The purpose of the study is to analyze the dynamics of the reserve forests, primarily spruce. The research method used was multispectral space imagery obtained from the Landsat-7 and Sentinel-2 satellites. Data processing consisted in constructing vegetation indices characterizing the state of vegetation. At the next step, time series of indices were constructed for various forest areas, and the zones of affected spruce forests were found. Inspections of the reserve forest condition were carried out annually. As a result of the research, a sharp change in the condition of spruce forests in the reserve was discovered. Since 2022, there has been a significant decrease in the values of vegetation indices of spruce forests. Currently, in many forest areas, adult spruce trees have completely died out. As of 2024, the area of forest damage in the reserve is estimated at 124 hectares compared to 2018, which is approximately 12 % of the total forest area. The area of damaged spruce forests reaches 74 hectares, which is approximately 55 % of the spruce forest area; there is also damage to spruce-pine forests. The presumed cause of the drying out of spruce forest is a mass outbreak of the bark beetle. The condition of other forests in the reserve, pine forests primarily, does not raise concern, except for the high recreational load. In conclusion: medium-resolution satellite data are efficient for assessing the condition of forests and allow detecting abrupt changes in vegetation, and it is also necessary to carry out joint measures by the authorities of St. Petersburg and the Leningrad Region to prevent further damage to the forests.

**Keywords:** remote sensing, satellite, health of ecosystem, Karelian Isthmus, bark beetle, degradation of spruce forests

Accepted: 14.03.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-173-185

## References

1. Gninenko Yu. I., Khegai I. V., Dynamics of shrinking spruce forests in the Moscow Region, *Forestry Information*, 2018, No. 2, pp. 65–74 (in Russian), DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07.
2. Katkovsky L. V., Siliuk V. A., Belyaev B. I. et al., Detection of drying coniferous forests from aerospace data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 88–102 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
3. Kuzmina D. A., *Analiz dinamiki vspyshek massovogo razmnozheniya nasekomykh — vreditelei lesa na severo-zapade Rossii i otsenka ikh khozyaistvennoi znachimosti: avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Analysis of the dynamics of outbreaks of mass reproduction of insects — forest pests in the north-west of Russia and their economical significance, Cand. agric. sci. thesis abstract), Saint Petersburg, 2006, 20 p. (in Russian).
4. Maslov A. D., *Koroed-tipograf i usykhanie elovykh lesov* (The bark beetle and the drying out of spruce forests), Moscow: VNIILM, 2010, 138 p. (in Russian).
5. *Priroda zakaznika "Ozero Shchuch'E"* (Nature of the reserve "Ozero Shchuchye"), Volkova E. A., Isachenko G. A., Khramtsov V. N. (eds.), Saint-Petersburg, 2017, 188 p. (in Russian), https://www.binran.ru/files/publications/monographs/Nature_of_the_Reserve_Ozero_Shchuchye_2017.pdf

6. Selikhovkin A. V., Mamaev N. A., Martirova M. B. et al., A new outbreak of the European spruce bark beetle, Ips typographus (L.) (Coleoptera, Curculionidae) in Leningrad province, *Ehntomologicheskoe Obozrenie*, 2022, V. 101, No. 2, pp. 239–251 (in Russian), DOI: 10.31857/S0367144522020034.
7. Brovkina O., Cienciala E., Zemek F. et al., Composite indicator for monitoring of Norway spruce stand decline, *European J. Remote Sensing*, 2017, V. 50, Iss. 1, pp. 550–563, DOI: 10.1080/22797254.2017.1372697.
8. Einzmann K., Atzberger C., Pinnel N. et al., Early detection of spruce vitality loss with hyperspectral data: Results of an experimental study in Bavaria, Germany, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 266, Article 112676, 18 p., DOI: 10.1016/j.rse.2021.112676.
9. Gao B.-C., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, Iss. 3, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. Perez M., Vitale M., Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI, and Sentinel-2 MSI surface reflectance cross-comparison and harmonization over the Mediterranean basin area, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 16, Article 4008, DOI: 10.3390/rs15164008.
11. Rautiainen M., Lukeš P., Homolová L. et al., Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 2, Article 207, DOI: 10.3390/rs10020207.