# Применение спектральных вегетационных индексов (NDVI, NDMI и CI) по данным Sentinel-2 для мониторинга разновозрастных залежей на особо охраняемых природных территориях

**Е. М. Илюшкова, М. В. Тихонова**

*Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127434, Россия*
*E-mail: tmv@rgau-msha.ru*

Оценка пространственно-временной динамики растительности на пяти разновозрастных залежных участках Центрально-Лесного заповедника построена на анализе временных рядов по спутниковым снимкам системы Sentinel-2 за 2020–2024 гг. Состояние растительности оценивалось по трём показателям: NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), NDMI (англ. Normalized Difference Moisture Index) и индексу хлорофилла CI (*англ.* Chlorophyll Index). Сравнение многолетних средних с помощью *t*-критерия Стьюдента выявляет спектральную близость ранних этапов лесовосстановления. Луговая залежь и молодые березняки 20–70 лет образуют статистически однородную группу с концентрацией хлорофилла CI 17,36–21,96 мг/г ($p > 0{,}05$). Старовозрастный ельник ожидаемо отделяется от этих сообществ достоверно меньшим содержанием пигмента ($p < 0{,}001$), что отражает специфику сомкнутого темнохвойного древостоя. Показатели NDMI приближаются к максимуму уже в мае, реагируя на обилие весенней влаги в таёжных экосистемах после снеготаяния. Накопление зелёной биомассы требует больше времени, поэтому пик NDVI смещён на июнь, после чего значения NDVI плавно уменьшаются к началу осени. Тесная связь NDMI с почвенной влажностью и хлорофиллом CI ($R^2$ до 0,75) подтверждает чувствительность этого индикатора. Использование предложенной комбинации показателей обеспечивает надёжную дифференциацию сукцессионных стадий и возможность их количественной оценки в рамках многолетнего спутникового мониторинга сукцессионных процессов в южнотаёжной подзоне.

**Ключевые слова:** Sentinel-2, дистанционное зондирование Земли, вегетационные индексы, NDVI, NDMI, CI, разновозрастные залежи, лесные экосистемы, Центрально-Лесной заповедник

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-312-323

## Введение

Устойчивость лесных экосистем в условиях меняющегося климата всё чаще оказывается под вопросом. Климат изменяется ощутимо: температура растёт, осадки перераспределяются — и лесные экосистемы реагируют усыханием древостоев, сдвигами вегетационного периода и падением продуктивности (Prăvălie et al., 2022). На этом фоне регулярный мониторинг лесных территорий перестаёт быть факультативной задачей. Россия здесь стоит особняком: её лесной фонд не имеет аналогов по масштабу, и потенциальные потери при деградации лесов приобретают глобальные изменения (Khunrattanasiri, 2023). Организация ФАО (*англ.* Food and Agriculture Organization) относит к лесам участки от 0,5 га (Global..., 2020), где деревья дорастают до 5 м, а кроны закрывают больше десятой части неба (Spadoni et al., 2020). Особого внимания заслуживают особо охраняемые природные территории: минимальное антропогенное воздействие позволяет наблюдать сукцессионную динамику в относительно ненарушенном виде и получать фоновые параметры для сравнения с нарушенными территориями.

Дистанционное зондирование Земли — действительно незаменимый инструмент для наблюдения за растительным покровом, особенно на обширных и труднодоступных территориях, где проведение регулярных полевых исследований сопряжено со значительными временными и материальными затратами (Лупян и др., 2014). Анализ многолетних времен-

ных рядов спутниковых данных, например вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), позволяет не только фиксировать текущее состояние, но и выявлять тренды и направленность сукцессионных процессов, таких как восстановление лесов на залежных землях или динамика растительности в заповедных зонах (Терехин, 2017). Широкое применение вегетационных индексов делает дистанционное зондирование Земли объективным методом для долговременного мониторинга и сравнительной оценки состояния экосистем на разных стадиях их развития (Романов и др., 2024а; Чернышенко, Рукосуев, 2024).

Среди доступных спутниковых платформ Sentinel-2 обеспечивает оптимальное сочетание характеристик для задач растительного мониторинга: 10-метровое разрешение в видимом и ближнем инфракрасном (*англ.* near-infrared — NIR) диапазонах, 13 спектральных каналов и цикл повторной съёмки порядка 5 сут. (Spadoni et al., 2020). Для оценки состояния растительного покрова использовались три индекса. NDVI — отношение NIR (842 нм) и красного (RED, 665 нм) каналов — отражает интенсивность фотосинтетической активности (Tucker, 1979). Индекс NDMI (*англ.* Normalized Difference Moisture Index) строится на соотношении NIR (842 нм) и коротковолнового инфракрасного (*англ.* short wave infrared — SWIR) (1610 нм) каналов и характеризует влагосодержание растительных тканей. Индекс хлорофилла CI (*англ.* Chlorophyll Index) получают алгебраическим преобразованием NDVI, данный показатель позволяет судить о концентрации хлорофилла в листьях без отбора проб (Gitelson et al., 2003).

Все три рассматриваемых индекса функционируют не изолированно, а во взаимосвязи. Показатель CI рассчитывается на основе NDVI и характеризует фотосинтетическую активность, тогда как NDMI вводит поправку на водный статус тканей в расчёт хлорофилла. В условиях водного стресса значение NDMI снижается, что влечёт за собой пропорциональное уменьшение скорректированного показателя хлорофилла даже при сохранении NDVI на прежнем уровне (Романов и др., 2023, 2024б). Таким образом, комплексный анализ всех трёх индексов обеспечивает более полную характеристику состояния древостоя по сравнению с использованием каждого из них в отдельности (Huang et al., 2021).

На особо охраняемых природных территориях мониторинг растительного покрова приобретает особое значение, поскольку большинство из них служат эталонами для оценки динамики экосистем (Pettorelli et al., 2014). Использование данных дистанционного зондирования даёт возможность осуществлять регулярные многолетние наблюдения (Duan et al., 2020). Анализ временных рядов вегетационных индексов позволяет зафиксировать изменения растительных сообществ в связи с климатическими изменениями, определить фенологические сдвиги, а также сравнить скорость восстановления растительного покрова на разных этапах зарастания (Тарасенко, Раевский, 2023).

Цель настоящей работы — оценка пространственно-временной динамики вегетационной активности, водного режима и содержания хлорофилла в растительном покрове на пяти разновозрастных участках залежей Центрально-Лесного заповедника по данным спутника Sentinel-2 за период 2020–2024 гг.

## Объект исследования

Исследования проводились на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, расположенного в Тверской области (Россия). Природный комплекс заповедника считается типичным для южно-таёжной подзоны и выступает эталоном коренных биогеоценозов центральной части Русской равнины.

Климат умеренно континентальный с выраженными сезонными колебаниями температуры и осадков. По данным летописи природы за 2024 г. среднегодовая температура воздуха составляла 6,5 °C, значения самого жаркого месяца (июля) +18,7 °C, а самого холодного января −10,2 °C. Общая годовая сумма осадков 820 мм, что выше на 39 мм среднемноголетнего показателя (781 мм) (Динамика..., 2025; Шуйская, 2025). Согласно ботанико-географическому районированию, территория исследований относится к зоне хвойно-широколи-

ственных лесов (Шуйская, 2025). Среднемноголетняя сумма активной температуры воздуха ($\sum t° > 10$ °C) составляет здесь около 1900 °C. В 2024 г. этот показатель достиг 2244 °C, что превышает климатическую норму и согласуется с глобальной тенденцией повышения температуры воздуха, проявляющейся также и на региональном уровне.

Продолжительность вегетационного периода (устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха более +5 °C) для 2020 г. составляет 229 дней; 2021 г. — 183 дня; 2022 г. — 174 дня; 2023 г. — 185 дней и 2024 г. — 191 день, при среднем значении для данной территории 180 дней (Динамика..., 2025). Аномально длительный вегетационный период 2020 г. (229 дней) обусловлен ранним установлением устойчивой положительной температуры весной и затяжным тёплым осенним периодом, что согласуется с наблюдаемой в последнее десятилетие тенденцией к потеплению климата в районе исследования.

Ключевые участки изучения расположены в 4 км от посёлка Заповедный, на территории урочища Красное (ныне кварталы 81 и 82), в границах бывшей деревни Староселье, существовавшей здесь с 1870-х гг. Исследуемая территория включает пять разновозрастных залежных участков, каждый из которых представляет собой квадрат размером 50×50 м (*рис. 1*):

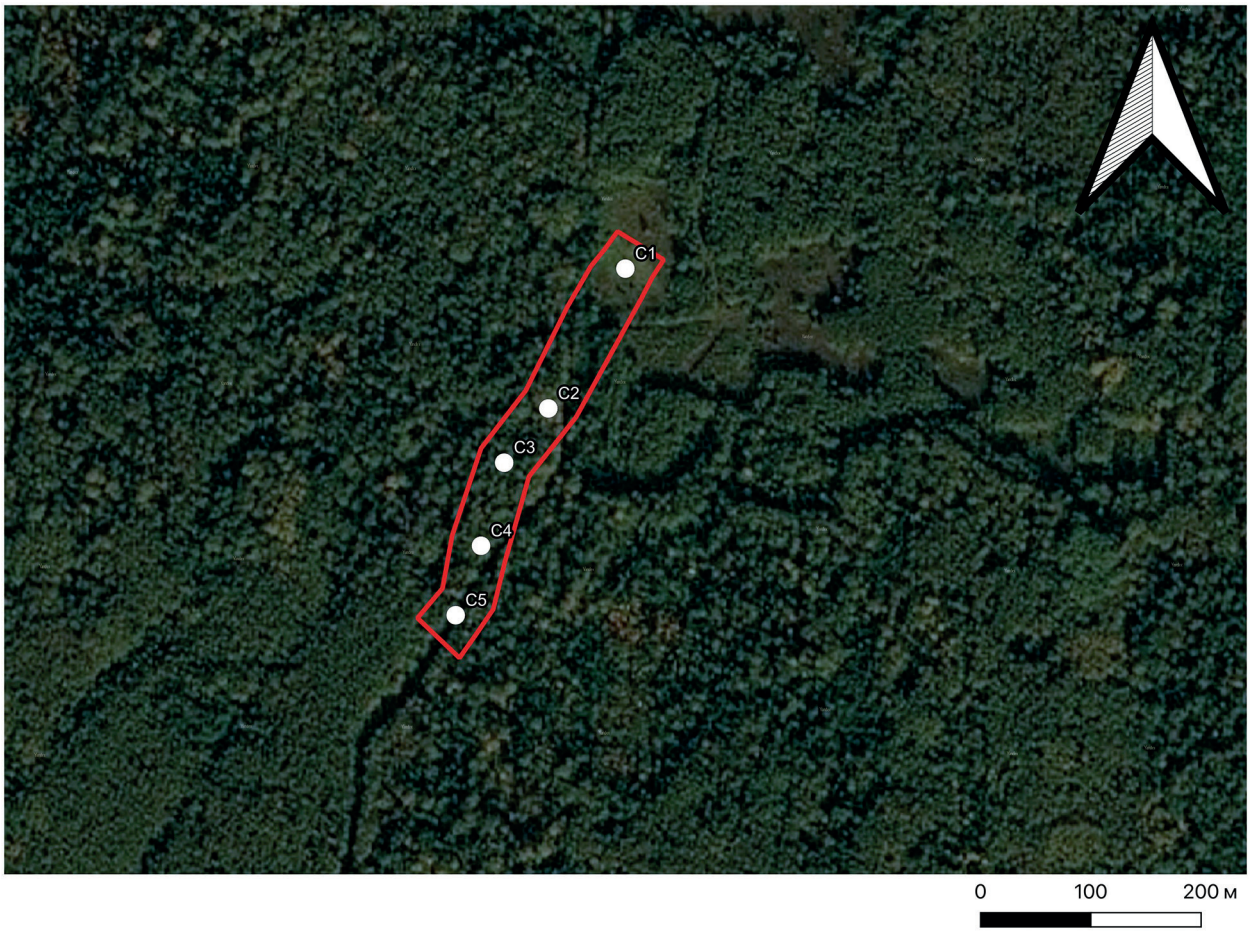



*Рис. 1.* Расположение объектов исследования (QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems), плагины NextGIS QuickMapServices, Yandex Satellite)

1. Залежь с луговым разнотравьем (C1).
2. Залежь, заросшая березняком возрастом 20–25 лет (C2).
3. Залежь, заросшая березняком возрастом 30–40 лет (C3).
4. Залежь, заросшая березняком возрастом 60–70 лет (C4).
5. Залежь, заросшая ельником неморальным возрастом старше 110 лет (C5).

Объекты исследования находятся в южной части заповедника, в условиях слабоволнистого рельефа с незначительными перепадами высот от 5 до 10 м. Протяжённость исследуемой трансекты составляет около 350 м; точки наблюдений расположены квазилинейно, что обусловливает вытянутую форму области корректной двумерной интерполяции. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами с различным гранулометрическим составом и почвообразующей породой.

*Доминирующие* древесные и травянистые виды на объекте исследования

| | Залежь с луговым разнотравьем | Залежь, заросшая березняком возрастом 20–25 лет | Залежь, заросшая березняком возрастом 30–40 лет | Залежь, заросшая березняком возрастом 60–70 лет | Залежь, заросшая ельником неморальным возрастом старше 110 лет |
|---|---|---|---|---|---|
| Древесная растительность | – | Берёза повислая (*Betula pendula*) | | | Ель обыкновенная (*Picea abies*) |
| Формула древостоя | – | 5Б2Ос2Е1С | 4Б3Ос2Е1В | 4Б4Ос1Е1В | 7Е2Б1В |
| Травянистая растительность | Овсяница гигантская (*Festuca gigantea* (L.) Vill.) | Марьяник дубравный (*Melampyrum nemorosum* L.) | | Щитовник распростёртый (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy) | Хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.) |
| Название ассоциации | Разнотравно-злаковый луг | Березняк марьянниковый | Березняк марьянниковый | Березово-осиново-щитовниковый | Ельник хвощово-щитовниковый |

Примечание: Б — берёза повислая, Ос — осина обыкновенная, Е — ель обыкновенная, С — сосна обыкновенная, В — вяз шершавый.

Древесный и травянистый ярусы характеризуются значительной неоднородностью между ключевыми участками. В составе древостоя доминируют следующие породы: берёза повислая (*Betula pendula* Roth), ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H. Karst.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (*таблица*). Травяной покров также демонстрирует межучастковые различия и включает такие виды, как овсяница гигантская (*Festuca gigantea* (L.) Vill.), мятлик обыкновенный (*Poa trivialis* L.), вероника лекарственная (*Veronica officinalis* L.), кукушкин цвет обыкновенный (*Coccyganthe flos-cuculi* (L.) Fourr.), осока бледноватая (*Carex pallescens* L.), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.), марьяник дубравный (*Melampyrum nemorosum* L.), лютик ползучий (*Ranunculus repens* L.), щитовник распростёртый (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy) и кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.).

## Материалы и методика работ

В качестве исходных данных использовались мультиспектральные космические снимки спутниковой системы Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м за период 2020–2024 гг. Для анализа отбирались снимки за период с мая по сентябрь, в том числе для учёта активной вегетации с облачностью не более 10 %. Обработка снимков и расчёт вегетационных индексов производится в программе QGIS версии 3.40.5 с применением калькулятора растра и плагина Yandex Satellite.

Для оценки динамики растительного покрова во времени использовался вегетационный индекс NDVI:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{p\mathrm{NIR} - p\mathrm{RED}}{p\mathrm{NIR} + p\mathrm{RED}},$$

где *p*NIR — коэффициент отражения в ближнем инфракрасном диапазоне (~0,7–1,1 мкм); *p*RED — коэффициент отражения в красном диапазоне (~0,6–0,7 мкм) (Tucker, 1979).

Для оценки влагосодержания растительного покрова рассчитывался индекс NDMI (Gao, 1996):

$$\mathrm{NDMI} = \frac{p\mathrm{NIR} - p\mathrm{SWIR}}{p\mathrm{NIR} + p\mathrm{SWIR}},$$

где *p*NIR — коэффициент отражения в ближнем инфракрасном диапазоне (~0,86 мкм); *p*SWIR — коэффициент отражения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (~1,24–1,64 мкм).

По аналогии с хлорофилльными индексами CIgreen и CIred-edge, предложенными для оценки содержания хлорофилла и азота по данным красного и красно-краевого диапазонов (Clevers, Gitelson, 2013), дополнительно рассчитывали индекс хлорофилла Cl как нелинейное преобразование NDVI по следующей формуле:

$$\mathrm{CI} = \frac{2\mathrm{NDVI}}{1 - \mathrm{NDVI}}, \quad (1)$$

где CI — хлорофилльный индекс, основанный на NDVI; NDVI — нормализованный разностный вегетационный индекс.

Количественную оценку содержания хлорофилла получали на основе линейной регрессии с учётом типа растительности (Clevers, Gitelson, 2013):

$$\mathrm{ChL} = \left(a + b + \mathrm{CI}\right) \cdot \left(1 + k\mathrm{NDMI}\right),$$

где ChL — содержание хлорофилла; *a* — 7 (хвойные породы), 10 (широколиственные), 6 (луг/разнотравье); *b* — 6 (хвойные породы), 8 (широколиственные), 10 (луг/разнотравье); CI — хлорофилльный индекс, основанный на NDVI (рассчитанный по формуле (1)); *k* — эмпирический параметр для хвойных 0,3, широколиственных 0,4, для луг/разнотравье 0,1; NDMI — нормализованный разностный индекс влажности (Clevers, Gitelson, 2013; Mishra, Mishra, 2012). Значения коэффициентов *a*, *b* и *k* учитывали на основе проведённых полевых исследований.

Карты пространственного распределения содержания хлорофилла строили на основе интерполяции полевых точечных измерений в программе RStudio версия 2026.01.2+418 с использованием пакетов dplyr для обработки данных и ggplot2 для визуализации. Координаты точек в системе WGS-84 (*англ.* World Geodetic System 1984) предварительно преобразовывали в метрическую проекцию, после чего по ним формировали регулярную растровую сетку и оценивали значения хлорофилла в её ячейках методом взвешивания по обратному расстоянию IDW (*англ.* Inverse Distance Weighting). Полученные растровые поля визуализировали в виде тематических карт, дополнительно строя аналогичные карты для показателей NDVI, NDMI и производных показателей хлорофилла CI.

Метеорологические параметры (температура воздуха), полученные по данным метеостанции «Сокол», расположенной в непосредственной близости от участков исследования, приводились к средним значениям за месяц на основе ежедневных показателей температуры воздуха. Для дистанционной оценки влажности почвы использовались данные продукта Level-2 Soil Moisture европейской миссии SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity), предоставленные лабораторией физики атмосферно-гидросферных процессов Института водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН). Обработку результатов производили в программе RStudio.

## Результаты и обсуждение

Анализ распределения содержания хлорофилла продемонстрировал пространственно-временное варьирование на исследуемых участках в период с 2020 по 2024 г. Среднемноголетние значения CI за период с мая по сентябрь не выявили статистически значимых различий

между луговой залежью и залежами с березняками возрастом 20–70 лет (21,82–21,96 мг/г; вероятность $p > 0{,}05$), тогда как все эти участки достоверно отличаются от старовозрастного ельника по содержанию хлорофилла (15,38 мг/г; $p < 0{,}001$). Построенные карты IDW-интерполяции демонстрируют выраженную пространственную дифференциацию между участками в период с мая по сентябрь 2020–2024 гг. (*рис. 2*). В мае и июне отмечается увеличение содержания хлорофилла на луговой залежи (17,45±0,17 мг/г) и на участках с березняками 20–70 лет (17,45±0,17 мг/г), тогда как в старовозрастном ельнике значения заметно ниже (15,71±0,73 мг/г). К августу – сентябрю значения CI на всех участках близки и не отражают пространственных различий, что показывает близкий уровень фотосинтетической активности луговой и берёзовой растительности.

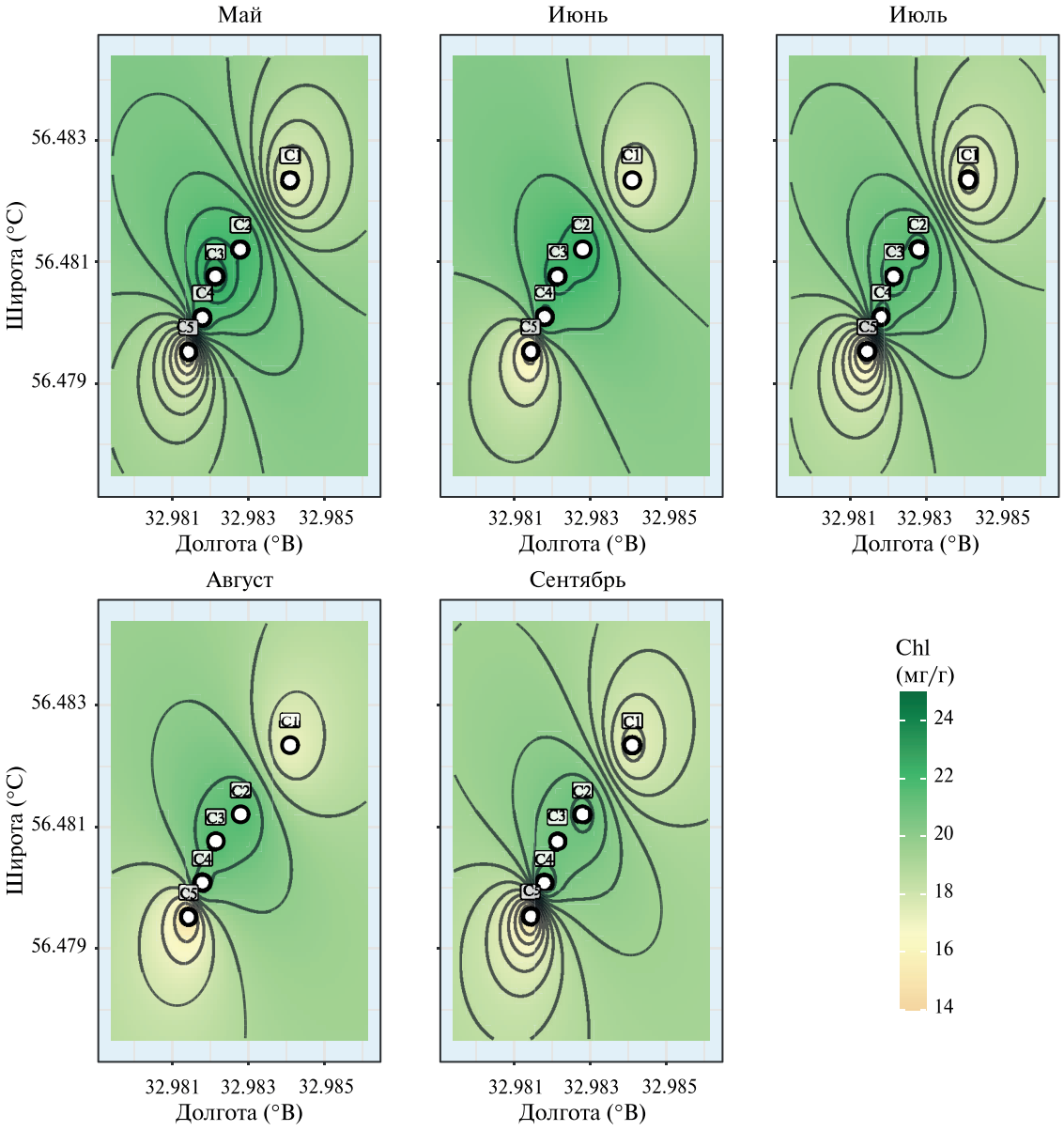



*Рис. 2.* Пространственное распределение содержания хлорофилла (CI, в мг/г) по данным IDW-интерполяции на пяти пробных участках: средние значения по месяцам май – сентябрь 2020–2024 гг.

По результатам проведённых исследований нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI отражает сезонную межгодовую вариабельность в течение вегетационного периода (май – сентябрь). Минимальное среднегодовое значение индекса было получено

в мае — 0,46±0,11, а максимальное в июне — 0,63±0,16. Пространственное распределение NDVI воспроизводит устойчивый сезонный рисунок: индекс набирает силу к июню, удерживает максимум в июле–августе и идёт на убыль в сентябре (*рис. 3*). Различий между участками по этому показателю обнаружить не удалось — залежи разного возраста в летний период ведут себя статистически одинаково. Температура воздуха за вегетационный период при этом объясняет более 80 % дисперсии NDVI (коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}81$; $p < 0{,}001$) — тепловой режим оказывается главным фактором, задающим динамику индекса, что хорошо согласуется с имеющимися данными для таёжной зоны (Зуев и др., 2020).

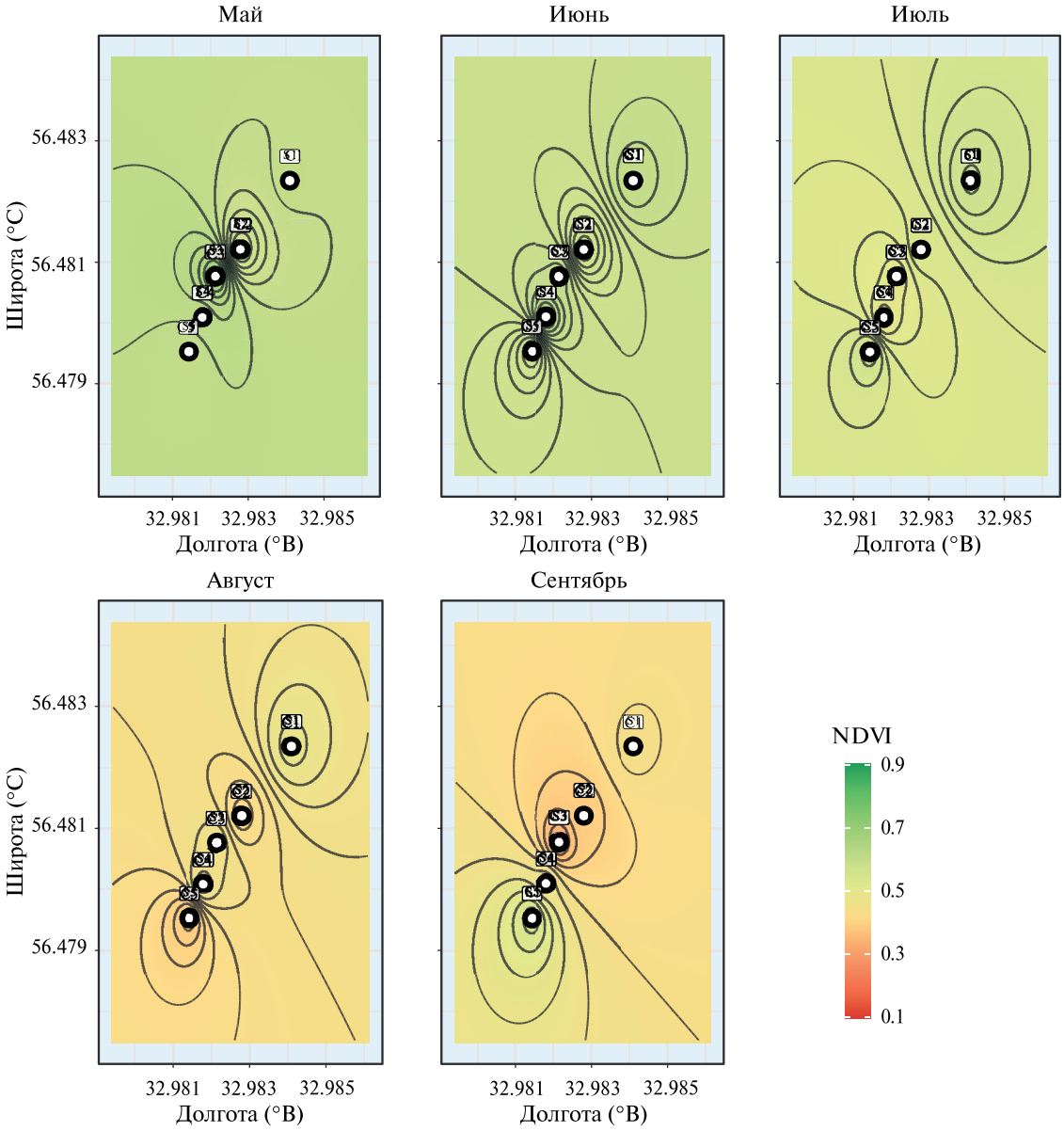



*Рис. 3.* Пространственное распределение индекса NDVI по данным IDW-интерполяции на пяти пробных участках: средние значения по месяцам май – сентябрь 2020–2024 гг.

Индекс NDMI ведёт себя иначе, чем NDVI и CI. Майский максимум (0,52±0,07) объясняется просто: после снеготаяния растительность насыщена влагой, и индекс это фиксирует. К сентябрю значения закономерно падают до 0,39±0,12 — вегетационный сезон подходит к концу, влагообеспеченность снижается.

Карты IDW-интерполяции отражают ту же картину: в мае значения по территории выровнены, к сентябрю контраст усиливается (*рис. 4*). Особенно заметно это на участках с луговым разнотравьем и на участках с березняком 20–70 лет. На залежах со старовозрастными ельниками NDMI удерживает высокие значения на протяжении всего периода наблюдений — плотный хвойный полог эффективно сохраняет влагу (см. *рис. 4*). Статистически значимых различий между участками по NDMI выявить не удалось.

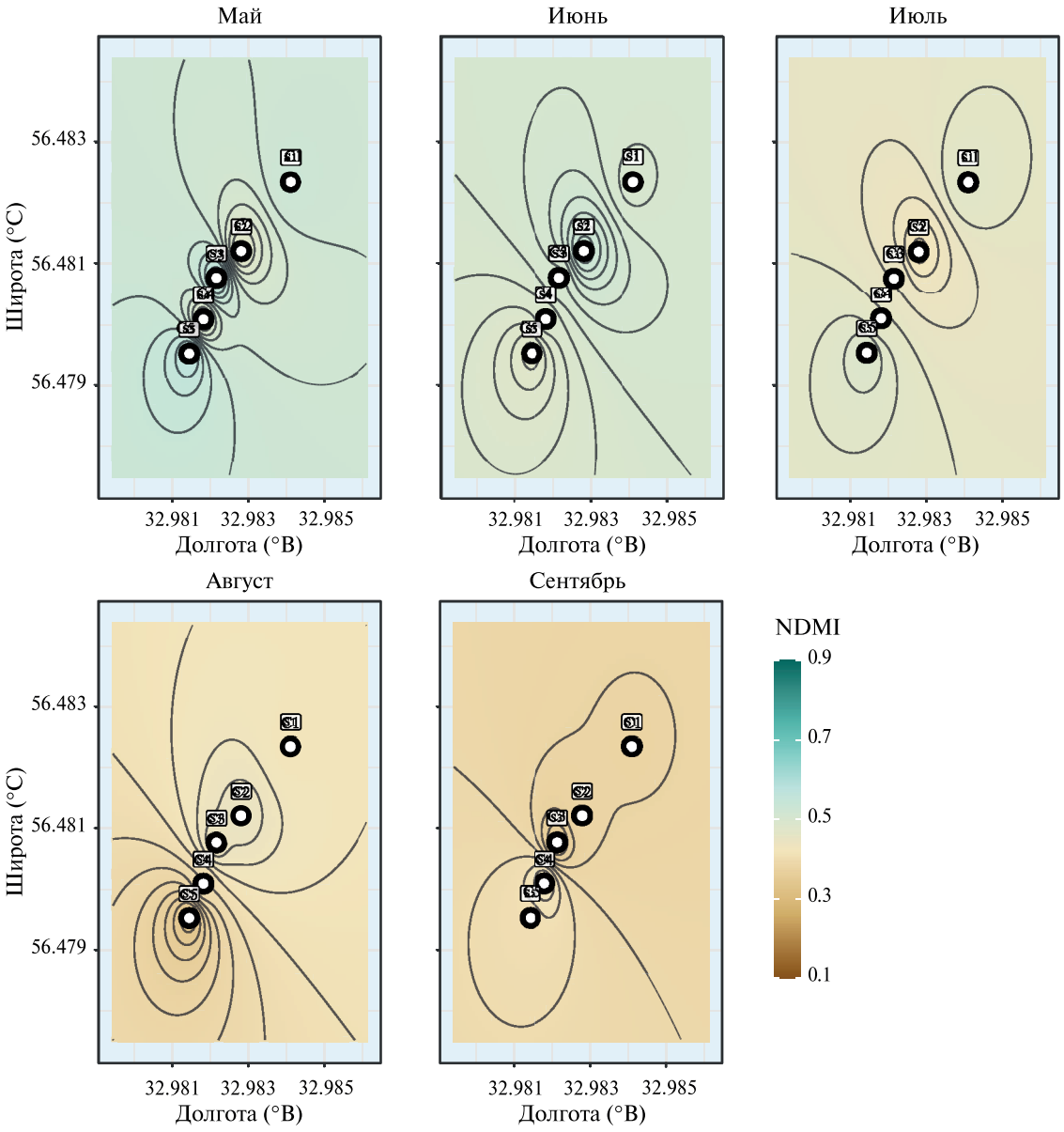



*Рис. 4.* Пространственное распределение индекса NDMI по данным IDW-интерполяции на пяти пробных участках: средние значения по месяцам май – сентябрь 2020–2024 гг.

Индекс NDMI тесно связан с влажностью почвы (коэффициент корреляции $r = 0{,}82$; $R^2 = 0{,}65$; $p < 0{,}001$) — результат, подтверждающий его пригодность как спутникового индикатора водного режима и согласующийся с данными работы (Sun et al., 2023).

Сравнительный анализ показал, что исследуемые индексы по-разному реагируют на факторы окружающей среды. Показатель NDVI сильно зависит от температуры воздуха ($R^2 = 0{,}81$), тогда как его связь с содержанием хлорофилла отсутствует ($r = –0{,}08$; $p = 0{,}70$).

Индекс NDMI, в свою очередь, чётко отражает водный режим ($R^2 = 0{,}65$) и служит значимым предиктором концентрации хлорофилла ($R^2 = 0{,}75$).

Таким образом, выявляется двухуровневая система лимитирующих факторов: фотосинтетическая активность на залежных участках Центрально-Лесного заповедника обусловлена температурным режимом, тогда как пигментный статус древостоя определяется влагообеспеченностью.

## Заключение

Регулярный спутниковый мониторинг пяти разновозрастных залежных участков Центрально-Лесного заповедника, основанный на совместном анализе данных Sentinel-2 и наземных измерений, позволил проследить многолетнюю динамику (2020–2024) хлорофиллного индекса CI, NDVI и NDMI.

Сукцессионный градиент наиболее чётко проявился в значениях CI. Согласно *t*-критерию Стьюдента, статистически значимых различий между луговой залежью и березняками в возрасте 20–70 лет не выявлено, тогда как старовозрастный ельник достоверно отличался от всех перечисленных сообществ. Таким образом, переход от травянистых и мелколиственных фитоценозов к хвойным насаждениям надёжно фиксируется по спектральным характеристикам.

Вегетационный индекс NDVI достигал максимальных значений в июне и последовательно снижался к сентябрю, при этом достоверных межучастковых различий не обнаружено. Напротив, динамика NDMI характеризовалась пиком в мае с последующим монотонным спадом до сентября. Высокая степень корреляции NDMI с влажностью почвы и содержанием хлорофилла ($R^2 \leqslant 0{,}75$) подтверждает, что данный индекс адекватно отражает как водный режим, так и пигментный статус растительности.

## Литература

1. Динамика явлений и процессов в природном комплексе заповедника. Летопись природы Центрально-Лесного заповедника. Кн. 64 (2024). Пос. Заповедный: ФГБУ «Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник», 2025. 378 с.
2. *Зуев В. В.*, *Короткова Е. М.*, *Павлинский А. В.* Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76. DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.
3. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Жарко В. О.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Оксюкевич А. Ю.* Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
4. *Романов А. Н.*, *Хвостов И. В.*, *Трошкин Д. Н.*, *Рябинин И. В.*, *Романов Д. А.* Некоторые аспекты дистанционного микроволнового мониторинга леса // Регион. проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы 10-й Международ. науч. конф. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2023. С. 285–288.
5. *Романов А. Н.*, *Хвостов И. В.*, *Рябинин И. В.*, *Романов Д. А.* (2024а) К оценке влагозапаса почвы в метровом слое по данным дистанционного микроволнового зондирования // Регион. проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы 11-й Международ. науч. конф. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2024. С. 124–127.
6. *Романов А. Н.*, *Хвостов И. В.*, *Рябинин И. В. и др.* (2024б) Дистанционные микроволновые индикаторы сухости леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 197–209. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209.
7. *Тарасенко В. В.*, *Раевский Б. В.* Использование псевдоповерхностей для мониторинга наземного покрова на примере Западной Карелии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 97–112. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-97-112.
8. *Терехин Э. А.* Сукцессии на залежных землях юго-запада Среднерусской возвышенности и их изучение с применением спутниковых данных // Геогр. вестн. 2017. № 2 (41). С. 118–126. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-118-126.

9. *Чернышенко В. С.*, *Рукосуев Д. В.* Применение спутниковых данных и вегетационных индексов для анализа динамики лесных территорий на примере национального парка «Угра» // Международ. научно-исслед. журн. 2024. № 6 (144). 5 с. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.94.
10. *Шуйская Е. А.* Кадастровые сведения о Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике за 2021–2024 гг. Пос. Заповедный: ФГБУ «Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник», 2025. 213 с.
11. *Clevers J. G. P. W.*, *Gitelson A. A.* Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3 // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. V. 23. P. 344–351. DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
12. *Duan P.*, *Wang Y.*, *Yin P.* Remote sensing applications in monitoring of protected areas: A bibliometric analysis // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 5. Article 772. DOI: 10.3390/rs12050772.
13. *Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. No. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
14. *Gitelson A. A.*, *Gritz Y.*, *Merzlyak M. N.* Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. Plant Physiology. 2003. V. 160. No. 3. P. 271–282. DOI: 10.1078/0176-1617-00887.
15. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome: FAO, 2020. 184 p. DOI: 10.4060/ca9825en.
16. *Huang S.*, *Tang L.*, *Hupy J. P. et al.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing // J. Forestry Research. 2021. V. 32. No. 1. P. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
17. *Khunrattanasiri W.* Application of remote sensing vegetation indices for forest cover assessments // Concepts and applications of remote sensing in forestry. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 153–166. DOI: 10.1007/978-981-19-4200-6_8.
18. *Mishra S.*, *Mishra D. R.* Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 117. P. 394–406. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
19. *Pettorelli N.*, *Laurance W. F.*, *O'Brien T. G. et al.* Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges // J. Applied Ecology. 2014. V. 51. No. 4. P. 839–848. DOI: 10.1111/1365-2664.12261.
20. *Prăvălie R.*, *Sîrodoev I.*, *Nita I.-A. et al.* NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018 // Ecological Indicators. 2022. V. 136. Article 108629. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
21. *Spadoni G. L.*, *Cavalli A.*, *Congedo L.*, *Munafò M.* Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. V. 20. Article 100419. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100419.
22. *Sun H.*, *Hu Z.*, *Liu H.* An evaluation of the response of vegetation greenness, moisture, fluorescence, and temperature-based remote sensing indicators to drought stress // J. Hydrology. 2023. V. 625. Pt. B. Article 130125. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130125.
23. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. No. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

## Application of spectral vegetation indices (NDVI, NDMI and CI) from Sentinel-2 data in monitoring abandoned lands of different ages in specially protected natural areas

**E. M. Iliushkova, M. V. Tikhonova**

*Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy*
*Moscow 127434, Russia*
*E-mail: tmv@rgau-msha.ru*

The assessment of the spatiotemporal dynamics of vegetation across five fallow plots in the Central Forest Reserve is based on an analysis of time series derived from Sentinel-2 satellite imagery for 2020–2024. Vegetation condition was assessed using three indicators: NDVI (Normalized Difference

Vegetation Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) and CI (Chlorophyll Index). A comparison of long term averages using Student's *t*-test reveals spectral similarity in the early stages of reforestation. Grassland fallow and young birch stands aged 20–70 years form a statistically homogeneous group with a chlorophyll concentration of 17.36–21.96 mg/g ($p > 0.05$). As expected, old-growth spruce stands are distinguished from these communities by a significantly lower pigment content ($p < 0.001$), reflecting the specific characteristics of a closed, dark-coniferous stand. NDMI values approach their maximum as early as May, responding to the abundance of spring moisture in taiga ecosystems following snowmelt. The accumulation of green biomass takes longer, so the NDVI peak is shifted to June, after which the NDVI gradually decrease towards the beginning of autumn. A close correlation of NDMI with soil moisture and chlorophyll CI ($R^2$ up to 0.75) confirms the sensitivity of this indicator. The use of the proposed combination of indicators ensures reliable differentiation of succession stages and the possibility of their quantitative assessment within the framework of long-term satellite monitoring of succession processes in the southern taiga subzone.

**Keywords:** Sentinel-2, Earth remote sensing, vegetation indices, NDVI, NDMI, CI, uneven-aged fallow land, forest ecosystems, Central Forest Nature Reserve

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-312-323

## References

1. *Dinamika yavlenii i protsessov v prirodnom komplekse zapovednika. Letopis' prirody Tsentral'no-Lesnogo zapovednika. Kniga 64* (*2024*) (Dynamics of phenomena and processes in the natural complexes of nature reserves. Chronicle of nature of the Central Forest Nature Reserve. Book 64 (2024)), Poselok Zapovednyi: FGBU "Tsentral'no-Lesnoi gosudarstvennyi prirodnyi biosfernyi zapovednik", 2025, 378 p. (in Russian).
2. Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinsky A.V., Climate-related changes in the vegetation cover of the taiga and tundra of western Siberia in 1982–2015 according to satellite observations, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 6, pp. 66–76 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.
3. Lupyan E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Zharko V.O., Krasheninnikova Yu.S., Oksyukevich A.Yu., VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 3, pp. 215–232 (in Russian).
4. Romanov A.N., Khvostov I.V., Troshkin D.N., Ryabinin I.V., Romanov D.A., Some aspects of remote microwave forest monitoring, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems in Earth Remote Sensing: Proc. 10th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2023, pp. 285–288 (in Russian).
5. Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V., Romanov D.A. (2024a), To the assessment of soil moisture reserve in a meter layer from remote microwave sensing data, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy 11-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems in Earth Remote Sensing: Proc. 11th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2024, pp. 124–127 (in Russian).
6. Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V. et al. (2024b), Remote microwave indicators of forest dryness, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 197–209 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209.
7. Tarasenko V.V., Raevsky B.V., Development of pseudo-surfaces for ground cover monitoring: the case of western Russian Karelia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 97–112 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-97-112.
8. Terekhin E.A., Successions on abandoned agricultural lands in the south-west of the Central Russian Upland and their investigation using remote sensing data, *Geograficheskii vestnik*, 2017, No. 2 (41), pp. 118–126 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-118-126.
9. Chernyshenko V.S., Rukosuev D.V., Application of satellite data and vegetation indices to analyse the dynamics of forest areas on the example of the "Ugra" national park, *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2024, No. 6 (144), 5 p. (in Russian), DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.94.3.
10. Shuiskaya E.A., *Kadastrovye svedeniya o Tsentral'no-Lesnom gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike za 2021–2024 gg.* (Cadastral data on the Central Forest State Nature Biosphere Reserve for 2021–2024), Poselok Zapovednyi: FGBU "Tsentral'no-Lesnoi gosudarstvennyi prirodnyi biosfernyi zapovednik", 2025, 213 p. (in Russian).
11. Clevers J.G.P.W., Gitelson A.A., Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, V. 23, pp. 344–351, DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008.

12. Duan P., Wang Y., Yin P., Remote sensing applications in monitoring of protected areas: A bibliometric analysis, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 5, Article 772, DOI: 10.3390/rs12050772.
13. Gao B., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, No. 3, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
14. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N., Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves, *J. Plant Physiology*, 2003, V. 160, No. 3, pp. 271–282, DOI: 10.1078/0176-1617-00887.
15. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*, Rome: FAO, 2020, 184 p., DOI: 10.4060/ca9825en.
16. Huang S., Tang L., Hupy J.P. et al., A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing, *J. Forestry Research*, 2021, V. 32, No. 1, pp. 1–6, DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
17. Khunrattanasiri W., Application of remote sensing vegetation indices for forest cover assessments, In: *Concepts and applications of remote sensing in forestry*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 153–166, DOI: 10.1007/978-981-19-4200-6_8.
18. Mishra S., Mishra D.R., Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 117, pp. 394–406, DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
19. Pettorelli N., Laurance W.F., O'Brien T.G. et al., Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges, *J. Applied Ecology*, 2014, V. 51, No. 4, pp. 839–848, DOI: 10.1111/1365-2664.12261.
20. Prăvălie R., Sîrodoev I., Nita I.-A. et al., NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018, *Ecological Indicators*, 2022, V. 136, Article 108629, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
21. Spadoni G.L., Cavalli A., Congedo L., Munafò M., Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, V. 20, Article 100419, DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100419.
22. Sun H., Xu Z., Liu H., An evaluation of the response of vegetation greenness, moisture, fluorescence, and temperature-based remote sensing indicators to drought stress, *J. Hydrology*, 2023, V. 625, Pt. B, Article 130125, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130125.
23. Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, No. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.