

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ ТИПОВ ГЕОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНДЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

И.С. Пьянзин, С.А. Ямашкин, А.А. Ямашкин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты геоинформационного анализа лесных геосистем смешанных лесов Zubovo-Polyansky District Республики Мордовия на водно-ледниковых равнинах с использованием спектральных индексов, рассчитанных по данным спутниковых снимков Sentinel-2 за 2020–2025 гг. Цель исследования заключалась в выявлении динамики состояния растительного, почвенного и водного покрова, а также урбанизированных территорий для оценки влияния природных и антропогенных факторов. Методологическая схема включала выбор исходных данных ДЗЗ, их предобработку, расчет индексов для основных компонентов геосистем, классификацию и верификацию результатов по картографическим материалам и натурным наблюдениям. Для растительности использовались индексы EVI2, CCCI и PSRI, позволившие оценить общее количество биомассы, содержание хлорофилла и процессы старения. Установлено, что за пятилетний период произошло снижение площади участков с максимальными значениями вегетационных индексов и рост доли зон со средними показателями, что связано с вырубками, расширением карьеров и развитием дорожной сети, при одновременном зарастании заброшенных сельхозугодий. Для почвенного покрова применялись индексы BSI, SCI и NDSI, выявившие рост площади оголённых поверхностей в пределах лесных массивов и тенденцию к снижению гумусированности при увеличении засоленности. Для водных объектов использовались индексы AWEI и NDTI, показавшие стабильность контуров и неизменность мутности. Урбанизированные территории оценивались по индексу BAEI, что подтвердило локальные изменения и строительство новой транспортной магистрали.

Ключевые слова: геоинформационный анализ, дистанционное зондирование Земли, деградация почв, растительный покров, гидрологический мониторинг, урбанизированные территории, природопользование

Original article

GEOINFORMATION ANALYSIS OF FOREST TYPES OF GEOSYSTEMS USING SPECTRAL INDEX ESTIMATION

I.S. Pyanzin, S.A. Yamashkin, A.A. Yamashkin

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Abstract. This article presents the results of a geoinformation analysis of forest geosystems of mixed forests in the Zubovo-Polyansky District of the Republic of Mordovia on aquiglacial plains using spectral indices calculated from Sentinel-2 satellite imagery for 2020–2025. The aim of the study was to identify the dynamics of vegetation, soil, and water cover, as well as urbanized areas, to assess the impact of natural and anthropogenic factors. The methodological framework included the selection of initial remote sensing data, its preprocessing, the calculation of indices for the main components of the geosystems, and the classification and verification of the results using cartographic materials and in situ observations. For vegetation, the EVI2, CCCI, and PSRI indices were used to estimate the total biomass, chlorophyll content, and aging processes. It was established that over a five-year period, the area of areas with maximum vegetation indices decreased and the proportion of zones with average values increased. This is associated with clear-cutting, quarry expansion, and road network development, while abandoned agricultural lands were being reforested. For soil cover, the BSI, SCI, and NDSI indices were used, revealing an increase in the area of bare surfaces within forested areas and a trend toward decreasing humus content with increasing salinity. For water bodies, the AWEI and NDTI indices were used, demonstrating the stability of contours and constant turbidity. Urbanized areas were assessed using the BAEI index, confirming local changes and the construction of a new highway. A conclusion was reached regarding the declining bioproductivity of forest geosystems and partial degradation of soil cover while maintaining the stability of water bodies.

Keywords: geoinformation analysis, remote sensing of the Earth, soil degradation, vegetation cover, hydrological monitoring, urban areas, nature management

Введение. Современные лесные геосистемы представляют определенные типы взаимосвязей между природными, социальными и производственными системами, выполняющие средообразующие, защитные, ресурсные и многие другие функции [1]. Одним из перспективных направлений для оценки состояния лесных геосистем является использование методов многоканальных изображений (в том числе снимков полученных БПЛА) с последующим расчетом спектральных индексов, где спутниковые снимки разных каналов, посредством математических операций, дают итоговое отображение спектральной характеристики [2, 3]. Следует подчеркнуть, что применение индексного подхода не лишено определённых ограничений [4].

Цель исследования, описанного в статье — обоснование подхода по применению комплексного индексного подхода анализа земель. Новизна исследования, представленного

в статье, заключается в системном использовании спектральных индексов для анализа лесных геосистем водно-ледниковых равнин, а также в разработке методологического подхода, предполагающего их комплексное сочетание.

Материалы и методы. Методологическая схема исследования включает несколько последовательных этапов, обеспечивающих воспроизводимость и комплексность анализа.

1) Выбор исходных данных дистанционного зондирования. В качестве базовых использовались спутниковые снимки Sentinel-2, прошедшие предварительную радиометрическую и атмосферную коррекцию.

2) Предобработка материалов, направленная на устранение шумов, облачности и иных искажений, а также привязку данных к единой географической системе координат.

3) Расчёт спектральных индексов различных типов для получения количественных характе-

ристик растительного покрова, почв, водных объектов и урбанизированных территорий.

4) Классификация полученных данных, при которой значения индексов структурировались по диапазонам, соответствующим различным состояниям природных объектов.

5) Верификация результатов на основе сопоставления с данными картографических материалов и натурных наблюдений для выявления пространственно-временных закономерностей.

Критерии выбора индексов формировались на основе необходимости комплексного охвата основных компонентов лесных геосистем и целесообразности учёта специфики их спектральных характеристик. Для растительного покрова ключевыми критериями выступали чувствительность индекса к фотосинтетически активной биомассе, содержание пигментов (прежде всего хлорофилла) и возможность выявления возрастных и стрессовых изменений [5]. При анализе



почвенного покрова основное внимание уделялось индексам, позволяющим выделять открытые участки почвы, а также оценивать её физико-химические свойства: влажность, органическое содержание, степень гумусированности и засоления. В случае исследования водных объектов предпочтение отдавалось индексам, обеспечивающим устойчивое выделение водной поверхности на фоне иных элементов ландшафта и минимизацию ложных срабатываний, связанных с переувлажнёнными почвами или тенями [6]. Для мониторинга урбанизированных территорий критерием выбора являлась специфичность индексов, обеспечивающих надёжное отделение застроенных площадей от природных элементов [7]. Методологическая схема исследования, представленная на рисунке 1, отражает последовательность основных этапов анализа и особенности выбора спектральных индексов для ключевых компонентов лесных геосистем. Спектральные индексы в рамках геоинформационного моделирования были классифицированы на четыре основные группы: индексы для оценки геоэкологического состояния растительного покрова, почв, поверхностных вод и элементов хозяйственного каркаса [8].

Индекс EVI2 или же «улучшенный/расширенный индекс растительности» представляет собой вариант классического NDVI (вегетационный индекс), отличаясь от последнего более высокой чувствительностью к количеству фотосинтезирующей биомассы, а также повышенной толерантностью к почвенным и атмосферным искажениям.

$$EVI2 = 2.5 \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + 2.4 \cdot RED + 1)} \quad (1)$$

Где: NIR — отражение в ближнем инфракрасном диапазоне (~800 нм), RED — отражение в красном (~600 нм). Индекс обычно принимает значения от -1 до 1, для растительности, как правило, значения не опускаются ниже 0 и чем выше плотность и количество биомассы, тем выше показатель вплоть до 1.

Canopy Chlorophyll Content Index ориентирован на количественную оценку содержания хлорофилла в листовой поверхности растений.

$$CCCI = \frac{NDVI_{705}}{NDVI} \quad (2)$$

Где NDVI — нормализованный вегетационный индекс: $(NIR - RED) / (NIR + RED)$, NIR и RED, то же что и в формуле 1; $NDVI_{705}$ — тот же индекс NDVI, но вместо инфракрасного диапазона используется более узкий канал, т.е. «красный край» — RED-EDGE. В целом, у CCCI нет фиксированного диапазона значений как в случае с EVI или другими «зелеными» индексами.

Plant Senescence Reflectance Index («индекс старения») предназначен для оценки процессов сенесценции, при которых ключевым показателем состояния служит изменение соотношения хлорофилла и каротиноидов в листовой поверхности растений [9].

$$PSRI = \frac{RED - GREEN}{R_{750}} \quad (3)$$

Где GREEN — то же что и в формуле 2, R_{750} — отражение в красном крае (так как красный край: 700-750 нм), RED — то же что и в формуле 1. Показатели менее 0 свидетельствуют о молодой и здоровой растительности, значения более 0 говорят о старении, деградации и некоторых других процессах в растительных сообществах.



Рисунок 1. Методологическая схема исследования
Figure 1. Methodological design of the study

Оценка почвенного покрова при помощи спектральных индексов, в целом, задача весьма трудоемкая и сопряжена с определенными допущениями [10]. Для анализа состояния почв лесной геосистемы применялись следующие индексы: BSI (Bare Soil Index), SCI (Soil Composition Index), NDSI (Normalized Difference Salt Index).

Bare Soil Index («индекс непокрытой почвы») используется для выделения на спутниковом снимке открытых почвенных поверхностей, в том числе, разделение этих поверхностей от других элементов снимка: растительности, воды, теней и т.д. В классическом виде рассчитывается по формуле (4):

$$BSI = \frac{(SWIR + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR + RED) + (NIR + BLUE)} \quad (4)$$

Где SWIR — отражательная способность в коротковолновом инфракрасном диапазоне, BLUE — отражение в синем диапазоне (~470 нм), NIR, RED, — то же что и в формуле 1.

Soil Composition Index применяется для оценки состава и состояния почвы на основе отражательных свойств ее поверхности в зависимости от влажности, органических элементов и текстуры. Рассчитывается по следующей формуле (наиболее распространённая формула по Karnieli, 1997; Chabrilat et al., 2019) (5):

$$SCI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (5)$$

Где SWIR и NIR — то же что и в формуле 4. Диапазон значений индекса все так же располагается в пределах от -1 до 1, где в целом, показатели меньше 0 свидетельствуют о почвах с высоким содержанием органических веществ, повышенной влажности почвенного покрова.

Normalized Difference Salt Index («нормализованный разностный солевой индекс») применяется для определения и анализа, как солонцеватых, так и солончаковых типов почв, в том числе, для мониторинга процессов засоления земель и выявления динамики содержания нормального количества солей в почвенном покрове. Наиболее распространённая формула расчёта имеет вид (6):

$$NDSI = \frac{SWIR - Green}{SWIR + Green} \quad (6)$$

Где SWIR и GREEN — то же что и в формулах 3, 4. Относясь к группе нормализованных индексов, NDSI так же принимает значения в диапазоне от -1 до 1, положительные значения (в пределах от 0,2 до 0,6) свидетельствуют о сильно засоленных почвах, в свою очередь, показатели менее -0,3 как правило характерны для растительности и иных объектов.

Спектральные индексы для анализа и мониторинга водных поверхностей представлены довольно обширной группой расчетных показателей. На наш взгляд, для выделения водных поверхностей наиболее предпочтительно применение индекса AWEI (Automated Water Extraction Index), так как, в отличие от, например, индексов NDWI (Normalized Difference Water Index, «нормализованный разностный водный индекс») и MNDWI («модифицированный нормализованный разностный водный индекс») AWEI не только хорошо работает на открытых, равнинных участках, но и позволяет точно выделить водные поверхности в пределах горных, селевых ландшафтов, а так же минимизировать «ложные срабатывания» из-за наличия переувлажненной почвы, теней и других объектов. Рассчитывается



по следующим формулам (7) — для территорий без выраженных теней, (8) — для зон с выраженными тенями:

$$AWEI_{nsh} = 4 \cdot (Green - SWIR1) - (0,25 \cdot NIR + 2,75 \cdot SWIR2) \quad (7)$$

$$AWEI_{sh} = Blue + 2,5 \cdot Green - 1,5 \cdot (NIR + SWIR1) - 0,25 \cdot SWIR2 \quad (8)$$

Значения более 0 свидетельствуют о водных поверхностях, менее 0 — об иных объектах на спутниковом снимке. Учитывая достаточно низкое пространственное разрешение спутниковых снимков, для комплексной оценки состояния воды следует использовать индекс NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) — «индекс мутности», позволяющий, как проводить мониторинг состояния воды в реках или иных водных объектах, так и оценивать влияние промышленных и сельхоз стоков, в том числе, отслеживать последствия наводнений, рубок леса, почвенной эрозии, которые повышают содержание взвесей в воде (9).

$$NDTI = \frac{Red - Green}{Red + Green} \quad (9)$$

Индекс чувствителен к темным поверхностям (теням, темным грунтам), вследствие чего, выделение водных поверхностей стоит считать важным этапом при последующей оценке мутности.

Оценку и анализ урбанизированных территорий возможно проводить с использованием индексов не целевой группы. Все индексы «Built-up Area» группы являются уникальными и неприменимы для других целей помимо определения зон урбанизации. Среди них, на наш взгляд, с учетом выбранного участка исследования наиболее предпочтителен индекс BAEI (Built-up Area Extraction Index — индекс выделения застроенных территорий) (10).

$$BAEI = \frac{RED + 0,3}{GREEN + SWIR1} \quad (10)$$

Среди его преимуществ, по отношению к другим расчётным показателям стоит выделить как относительную простоту расчёта, не требующую вычисления других индексов, так и лучшую изоляцию застроенных территорий от растительности и воды. Для геоинформационного моделирования применялись снимки со спутников Sentinel-2 с проведенной атмосферной и радиометрической коррекцией. Таким образом, для комплексного анализа состояния геосистем были задействованы индексы разных групп, при этом, выбор определялся главным образом точностью, специфичностью и возможностью их эффективного сочетания друг с другом при исследовании столь сложных структур, как лесные геосистемы.

Результаты и их обсуждение. Тестовый полигон расположен в Зубово-Полянском районе Республики Мордовия, в бассейне реки Парца, в геосистемах смешанных лесов на песчаных водно-ледниковых и древнеаллювиальных равнинах краевой части лесной провинции Окско-Донской низменности. Временной интервал исследования охватывает 2020–2025 годы.

EVI2. На рисунке 2 приведены данные по общему количеству биомассы на основе индекса EVI2 за 10 июля 2020 года (пик вегетационной активности). По состоянию на 2020 год существенная часть территории имеет показатели выше, чем 0,6 (пороговое значение), причем, наивысшие значения (более 0,8) встречаются как в пределах лесной растительности, так и на

участках, занятых кустарниковой и травянистой растительностью.

Данные за 12 июля 2025 года отличаются от предшествующих общим снижением площади зон пиковых значений (более 0,8) на всей территории исследования (рис.3), что указывает на уменьшение объема зеленой биомассы, а именно, плотности листового покрова растений, при возможном неизменном количестве отдельно взятых стволов в целом (тоже актуально и для зон кустарниковой и травянистой растительности).

При уменьшении площади зон наивысших показателей естественного растущих зон как нормальных значений (например, доля участков интервала «от 0,6 до 0,8» существенно возросла в сравнении с 2020 годом), так и низ-

ких, соответствующих нарушенным участкам растительности или же не растительным формациям в целом. При этом достаточное количество зон (в основном в пределах лесных участков), где значения ниже предшествующих, изменились непосредственно под влиянием человеческой деятельности. Снижение максимальных значений вегетационного индекса в 2025 году обусловлено совокупностью факторов, среди которых значительная роль принадлежит внешним антропогенным воздействиям.

ССС. Объем растительной биомассы, оцениваемый через вегетационные индексы, может скрывать фактические изменения состояния растений, особенно в разреженной растительности, где показатели индекса оказываются

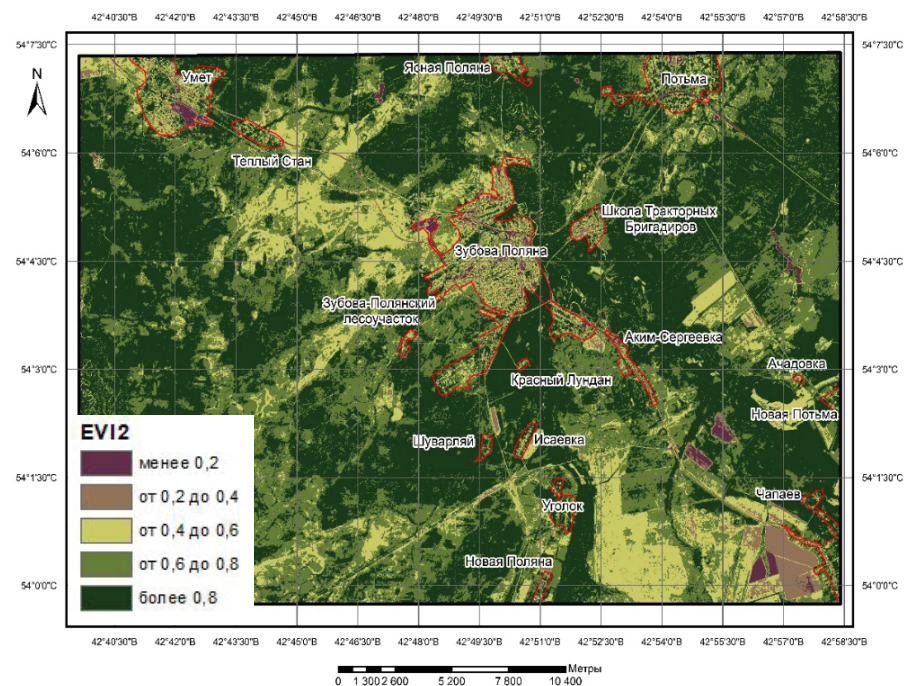


Рисунок 2. Состояние растительности по индексу EVI2 (2020 г.)
Figure 2. Vegetation status according to the EVI2 index (2020)

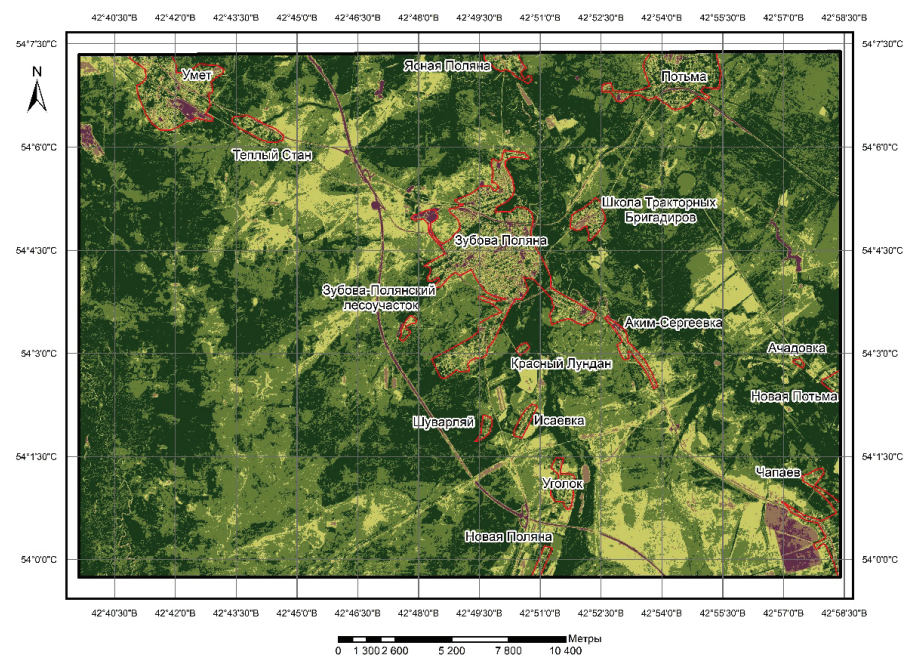


Рисунок 3. Состояние растительности по индексу EVI2 (2025 г.)
Figure 3. Vegetation status according to the EVI2 index (2025)



ниже реального уровня. Количественная оценка хлорофилла помогает разделить действительно деградированные участки от зон редкой, но при этом здоровой растительности, уменьшить влияние «общей массы» на итоговые результаты. Индекс CCCI так же позволяет более четко дифференцировать вырубки, в том числе частично заросшие, где значения вегетационных индексов часто бывают завышены, не позволяя определить характерный контур лесосеки. На момент 2025 года можно выделить, что и без того достаточно умеренные показатели по индексу вегетации, обоснованы в большинстве случаев плотностью растительной массы, где значения хлорофилла на большей территории соответствует диапазону от 0,2 до 0,4, что расценивается как средне-низкое содержание вещества и подтверждает ранее обозначенную мысль об ухудшении состояния лесной растительности в целом.

PSRI. Данные по содержанию каротиноидов (индекс не оценивает количество вещества, а ограничивается оценкой соотношения каротиноидов и хлорофилла) в целом подтверждают приведенные выше выводы и по состоянию на 2020 год согласуются со значениями, рассчитанными по индексам EVI2 и CCCI. Показатели PSRI за 2025 год сохраняют общую тенденцию, аналогичную ранее рассмотренным индексам других типов, характеризуясь снижением пороговых значений. Показатели по PSRI 2025 года (для зон растительности) слабо сочетаются со значениями индексов CCCI и EVI2. Совпадение распределений EVI2 и CCCI указывает на согласованное изменение плотности и хлорофилльного состава растительности по участку, тогда как

однородные значения PSRI за 2025 год (в пределах «от -0,1 до 0») отражают относительно стабильное физиологическое состояние лесной растительности в период активной вегетации.

BSI. Выделение почвенных поверхностей на спутниковом снимке стоит считать одним из основных этапов анализа состояния почвы лесных геосистем. При этом, сам процесс поиска оголенных участков, задача, требующая комплексного подхода, где наряду с индексом BSI стоит использовать и все ранее перечисленные индексы «зеленой группы».

По данным на 2020 год, в пределах территории исследования выявлено 25 полностью оголенных участков почвы (за исключением территорий населенных пунктов) общей площадью 12244343,06 м². Открытые зоны вне леса являются сельскохозяйственными полями (11757680,92 м²), либо забрасываемыми, либо в состоянии «пар». По состоянию на 2025 год общее количество оголенных участков практически не изменилось и составило 24 единицы, при этом, их суммарная площадь 7939822,51 м² практически в 2 раза меньше, чем в 2020 году.

SCI. По данным 2020 года большая часть выделенных почвенных зон (20 участков) имеют показатели по индексу SCI «более 0», со средними значениями примерно 0,23, причем, независимо от местоположения почвенного участка. Положительные показатели индекса, а именно выделенное среднее значение, соответствуют почвам с достаточным содержанием гумуса, умеренно увлажненным, например, темно/светло серые лесные, дерново-подзолистые и некоторые другие типы почв. Остальные участки (5 единиц, территория сельхоз полей) имеют

среднее значение примерно равное -1, соответствующее почвам с выраженным гумусовым горизонтом, достаточно хорошо увлажненным, однако, при отсутствии черноземов на территории исследования данные зоны могут соответствовать все тем же темно-серым лесным почвам, при этом, состояние которых все же лучше, чем ранее рассмотренных.

На момент 2025 года, даже при условии, что в большинстве случаев оголенные участки представлены другими зонами, нежели чем в 2020 году, показатели индекса SCI находятся в том же диапазоне «более 0», со средними значениями 0,15, где более «высокие» показатели связаны как с севооборотом земель, так и с относительно недавним использованием некоторых участков.

NDSI. 2020 год обращает на себя внимание отсутствием участков в пределах оголенных почв со значениями индекса «менее 0», которые соответствуют почвам с нормальным содержанием солей. При этом, как и в случае с индексом SCI нет существенного различия в значениях зон вырубок, карьера и сельскохозяйственных полей, где средние показатели засоленности соответствуют значению 0,35 — умеренно засоленные почвы, с характерным присутствием карбонатов, сульфатов и хлоридов. На основе показателей выделенных зон можно предположить, что характерная засоленность присутствует и на участках тех же типов, но частично/покрытых растительностью, причем, в меньшем, как раз-таки благодаря наличию определенного количества биомассы, объеме, что подтверждается и значениями индекса в данных зонах, при условии учета искажений из-за растительности.

Отметим, что ранее выделенные участки (5 единиц), имевшие по индексу SCI более лучшие значения, при рассмотрении индексом NDSI относятся к зонам низкой засоленности, что так же подтверждает, как достаточную связь двух индексов, так и более здоровое состояние почв выделенных зон (рис. 4).

NDSI 2025 года (по аналогии с SCI 2025 года) практически неотличим от значений 2020 года, со средними показателями 0,31, причем, практически по всем участкам вне зависимости от их положения. Здесь, все так же прослеживается связь между NDSI и SCI, где показатели обоих индексов в среднем ниже, чем в 2020 году, причем, значения по SCI, по сравнению с предшествующими уменьшаются больше, чем значения по NDSI.

AWEI / NDTI. Выделение водных поверхностей на спутниковом снимке, по аналогии с почвенными, стоит проводить с использованием как специализированных индексов, например, AWEI, так и индексов других групп, преимущественно вегетационных (так как из всех типов неспецифичных индексов, они наиболее ярко отображают водные поверхности), для большей точности обнаружения объектов и определения точных их границ.

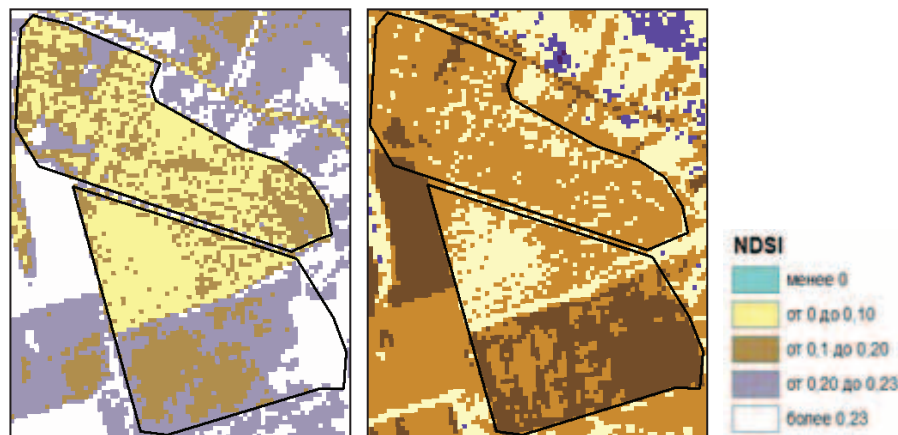


Рисунок 4. Состояние по индексам NDSI (справа) и SCI (слева) за 2020 год
Figure 4. The NDSI (right) and SCI (left) indices for 2020



Рисунок 5. Показатели мутности по индексу NDTI (2020 и 2025 годы)
Figure 5. NDTI Turbidity Index (2020 and 2025)



Показатели мутности, рассчитанные по индексу NDTI для участка реки Вад в 2020 и 2025 годах — практически одинаковы: среднее значение составило около -0,07 (умеренная мутность) в оба периода наблюдений (рис. 5).

BAEI. Анализ застройки на исследуемой территории за 2020 и 2025 годы показал лишь незначительные изменения в структуре населённых пунктов, выражающиеся в появлении новых и разрушении отдельных строений, при этом, границы населённых мест остались прежними. Среди крупных, затрагивающих всю зону исследования событий стоит выделить строительство новой дороги (обходная дорога посёлка Умёт, посёлка Аким-Сергеевки и посёлка Зубова Поляна), причем, ее дифференцировка достаточно хорошо производится посредством индексов других групп. Таким образом, индексы «Built-up Area» группы, очевидно, стоит использовать в динамически развивающихся районах или крупных городских агломерациях с использованием снимком соответствующего пространственного разрешения, при этом, нельзя не отметить точность обозначенного индекса при выделении объектов антропогенного типа застройки.

Использование интегрального подхода к спектральным показателям обеспечивает комплексную оценку состояния природных систем и позволяет учитывать как пространственные, так и временные изменения. Это делает методологию применимой для широкого спектра задач — от анализа динамики лесных экосистем в условиях избыточного увлажнения до мониторинга почвенного покрова в засушливых регионах или диагностики урбанизированных территорий в условиях высокой антропогенной нагрузки.

Выводы. Проведённый анализ состояния растительности на тестовом полигоне «Вад» по данным спутникового мониторинга за 2020 и 2025 годы позволил выявить ряд закономерностей, отражающих как природные, так и антропогенные изменения в структуре лесных геосистем. Рассмотрение индексов в комплексе показало, что за пятилетний период наблюдается общее снижение биомассы и физиологической активности растительности, выражающееся в уменьшении доли зон с наивысшими значениями вегетационных индексов и росте площадей с нормальными, умеренными и низкими показателями.

Значения индекса SCI (за оба года) указывают на некоторое ухудшение показателей гумусированности и влажности почв. Одновременно сохраняющиеся и частично повышающиеся значения индекса NDSI отражают тенденцию к росту содержания солей в почвах, что, в сочетании с уменьшением влажности, свидетельствует

о постепенной деградации почвенного покрова, однако, не столь ярко выраженной.

Стабильность показателей мутности по индексу NDTI свидетельствует об отсутствии значимых изменений в гидрологическом режиме и уровне загрязнения водных объектов. Данный факт, вероятно, связан с особенностями ландшафта, а также с преобладанием природных фильтрующих комплексов — лесных и луговых массивов и отсутствием выраженного тяжелого промышленного воздействия.

Показатели по индексу BAEI определяют следующие: границы населённых пунктов сохраняются, а зафиксированные изменения носят точечный характер (строительство новых зданий, разрушение старых). Значимые преобразования связаны главным образом со строительством дорожной инфраструктуры, что так же хорошо отражается индексами других групп. Таким образом, применение индексов группы Built-up целесообразно для территорий с активными градостроительными процессами.

Методология, основанная на комплексном использовании спектральных индексов, может рассматриваться как эффективный инструмент для поддержки управленческих решений в сфере природопользования. Её применение обеспечивает объективную оценку состояния геосистем, позволяет выявлять тенденции их трансформации и формировать научно обоснованные рекомендации по устойчивому использованию и охране природных территорий.

Список источников

- Jiang Z., Huete A.R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, no. 10. Pp. 3833-3845. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006 ScienceDirect+1.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83, no. 1-2. Pp. 195-213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Mzid N., Pignatti S., Huang W., Casa R. An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 3. P. 474. DOI: 10.3390/rs13030474.
- Nguyen C.T., Bui D.T., Pham H.V. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow period in Southeast Asia using Landsat 8 OLI data. *Land*. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 231. DOI: 10.3390/land10030231.
- He C., Wang Q., Yang J., Xu W., Yuan B. BLEI: Research on a novel remote sensing bare land extraction index. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 9. P. 1534. DOI: 10.3390/rs16091534.
- Vescovo L., Wohlfahrt G., Balzarolo M., Pilloni S., Sotocornola M., Rodeghiero M., Gianelle D. New spectral vegetation indices based on the near-infrared reflectance for the monitoring of grassland phytomass. *International Journal of*

Remote Sensing. 2012. Vol. 33, no. 22. Pp. 6749-6770. DOI: 10.1080/01431161.2012.694701.

7. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zanozin V.V., Barmin A.N. Development of an algorithm for the Earth remote sensing data classification using deep machine learning methods for analyzing the geosystem model of the territory. *Geodesy & Cartography*. 2021. No. 4. Pp. 54-64. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-970-4-54-64.

8. Yamashkin S.A., Radovanović M., Yamashkin A., Vuković D. Improving the efficiency of the ERS data analysis techniques by taking into account the neighborhood descriptors. *Data*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 18. DOI: 10.3390/data3020018

9. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A. Improving the efficiency of remote sensing data interpretation by analyzing neighborhood descriptors. *Mordovia University Bulletin*. 2018. Vol. 28, no. 3. Pp. 352-365. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.352-365.

10. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Vukovich D.V., Frolov A.N., Radovanovich M. Using ensemble-based systems for landscape mapping. *Geodesy & Cartography*. 2016. No. 7. Pp. 42-49. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-913-7-42-49.

References

- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K. & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.
- Mzid, N., Pignatti, S., Huang, W. & Casa, R. (2021). An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*, 13(3), 474.
- Nguyen, C.T., Bui, D.T. & Pham, H.V. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow period in Southeast Asia using Landsat 8 OLI data. *Land*, 10(3), 231.
- He, C., Wang, Q., Yang, J., Xu, W. & Yuan, B. (2024). BLEI: Research on a novel remote sensing bare land extraction index. *Remote Sensing*, 16(9), 1534.
- Vescovo, L., Wohlfahrt, G., Balzarolo, M., Pilloni, S., Sotocornola, M., Rodeghiero, M. & Gianelle, D. (2012). New spectral vegetation indices based on the near-infrared reflectance for the monitoring of grassland phytomass. *International Journal of Remote Sensing*, 33(22), 6749-6770.
- Yamashkin, S.A., Yamashkin, A.A., Zanozin, V.V. & Barmin, A.N. (2021). Development of an algorithm for the Earth remote sensing data classification using deep machine learning methods for analyzing the geosystem model of the territory. *Geodesy & Cartography*, (4), 54-64.
- Yamashkin, S.A., Radovanović, M., Yamashkin, A. & Vuković, D. (2018). Improving the efficiency of the ERS data analysis techniques by taking into account the neighborhood descriptors. *Data*, 3(2), 18.
- Yamashkin, S.A. & Yamashkin, A.A. (2018). Improving the efficiency of remote sensing data interpretation by analyzing neighborhood descriptors. *Mordovia University Bulletin*, 28(3), 352-365.
- Yamashkin, S.A., Yamashkin, A.A., Vukovich, D.V., Frolov, A.N. & Radovanovich, M. (2016). Using ensemble-based systems for landscape mapping. *Geodesy & Cartography*, (7), 42-49. <http://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-913-7-42-49>

Информация об авторах:

Пьянзин Иван Сергеевич, аспирант института геоинформационных технологий и географии, mobivan7@gmail.com

Ямашкин Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7574-0981>, yamashkinsa@mail.ru

Ямашкин Анатолий Анатольевич, доктор географических наук, профессор, директор института геоинформационных технологий и географии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9995-8371>, yamashkin56@mail.ru

Information about the authors:

Ivan S. Pyanzin, postgraduate student at the institute of geoinformation technologies and geography, mobivan7@gmail.com

Stanislav A. Yamashkin, candidate of technical sciences, senior lecturer of the department of automated information processing and control systems, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7574-0981>, yamashkinsa@mail.ru

Anatoly A. Yamashkin, doctor of geographical sciences, professor, director of the geography institute, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9995-8371>, yamashkin56@mail.ru