

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 528.8

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>
<https://www.elibrary.ru/fvkynr>

Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования

А. В. Косарев[@], И. В. Сергеева, А. В. Ключиков, С. В. Чумакова, А. А. Леонтьев

^{@E-mail:} aleteia@inbox.ru

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

Резюме. Цель работы – на основе данных дистанционного зондирования с применением искусственно-го интеллекта провести ранжирование древесных объектов разной протяженности на территории лесного биогеоценоза. *Материалы и методы.* Объект исследования – памятник природы «Урочище Белый Ключ» Татищевского района Саратовской области. Материалы исследования – мультиканальные спутниковые кос-моснимки в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах. Обработка материалов и их картографирова-ние реализованы на базе кроссплатформенной системы QGIS (версия 3.28.0). Распознавание объектов био-геоценоза осуществлялось с помощью плагина Mapflow. *Результаты.* Установлена многоярусная структура биогеоценоза. При этом 60–65 % растительных объектов относятся к высокому лесу, 30–35 % – к среднему лесу. Установлены признаки устойчивого развития лесного лиственного биогеоценоза: нечеткость почвенной линии в координатах «зеленость» vs «яркость», NIR–RED преобразования tasseled cap; высокая дисперсия за-висимостей «влажность» vs «яркость»; «зеленость» vs «влажность»; наличие локального участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне; асимметрич-ность и смещенность в сторону больших значений частотных диаграмм влажности, зелености, а также ин-декса EVI. *Обсуждение.* Для лесных массивов структура диаграмм tasseled cap отличается нечетким и рас-плывчатым видом линии почвы, а также концентрацией максимума вегетационной составляющей в опре-деленных областях. Эти признаки объясняются тем, что, в отличие от сельскохозяйственных угодий, в лесу почва скрыта под слоем листвы, опавших листьев и мха, поэтому отраженный сигнал от почвы смешивается с отражением от растительности. Преобладание высокого леса указывает на то, что верхний ярус биогеоце-ноза занимает большую часть территории и является определяющим фактором структуры и функционирова-ния экосистемы. Высокие деревья создают тень, влияют на микроклимат, почвенные условия и доступность света для нижних ярусов.

Ключевые слова: лесной биогеоценоз, дистанционное зондирование, искусственный интеллект, спек-тральное преобразование

Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data

Anton V. Kosarev[@], Irina V. Sergeeva, Arkady V. Klyuchikov, Svetlana V. Chumakova,
Alexei A. Leontiev

^{@E-mail:} aleteia@inbox.ru

Saratov State University of genetics, biotechnology and engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

Abstract. The purpose of the study is to rank woody areas of different lengths within the forest biogeocenosis based on remote sensing data and using artificial intelligence. *Materials and methods.* The object of the study is the “Bely Klyuch” natural landmark of the Tatishchevsky district of the Saratov region. The research materials are multichannel

satellite images in the visible and near-infrared spectral ranges. The processing of materials and their mapping were completed using the cross-platform QGIS system (version 3.28.0). Recognition of biogeocenosis objects was carried out using the Mapflow plugin. *Results.* A multilevel structure of the biogeocenosis has been established. It was found that 60–65 % of woody areas belong to the high forest, and 30–35 % to the medium forest. Signs of sustainable development of the deciduous forest biogeocenosis have been established: indistinctness of the soil line in the coordinates of greenness vs brightness, NIR–RED tasseled cap transformations; high dispersion of dependencies wetness vs brightness; greenness vs wetness; the presence of a local area at the top of the principal component diagrams, in which their values vary over a wide range; asymmetry and skewness towards higher values of frequency diagrams of wetness and greenness, as well as the EVI index. *Discussion.* For forested areas, the structure of the tasseled cap diagrams is characterized by indistinct and blurred soil line, as well as by a concentration of maximum vegetation component in certain areas. The reason for this is that in forests, unlike agricultural lands, the soil is hidden under a layer of foliage, fallen leaves, and moss; therefore, the reflected signal from the soil mixes with the reflection from the vegetation. The predominance of high forest indicates that the upper layer of the biogeocenosis occupies a large part of the territory and is a determining factor in the structure and functioning of the ecosystem. Tall trees create shade, influence the microclimate, soil conditions, and light availability for the lower layers.

Keywords: forest biogeocenosis, remote sensing, artificial intelligence, spectral transformation

Для цитирования: Косарев А.В., Сергеева И.В., Ключиков А.В., Чумакова С.В., Леонтьев А.А. Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 286–298. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>; <https://www.elibrary.ru/fvkylnr>

For citation: Kosarev A.V., Sergeeva I.V., Klyuchikov A.V., Chumakova S.V., Leontiev A.A. Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 286–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является современным инструментом, позволяющим проводить комплексную оценку экологического состояния окружающей среды в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [1]. Оно применяется в задачах мониторинга антропогенно нарушенных земель [2], изучении зеленых насаждений [3], исследованиях экологического состояния лесных экосистем [4]. Исследование структуры и динамики леса может реализовываться с помощью алгоритмов трехмерного моделирования структуры и динамики леса по данным лазерного сканирования, космосъемки [5]. Широко применяются в задачах лесоведения кроссплатформенные геоинформационные системы, из которых наиболее известна QGIS. К этим задачам относятся оценка влияния лесных пожаров на целостность лесного биогеоценоза [6]; изучение распределения пород деревьев и влияния на него антропогенного фактора [7]; определение типов поверхности, характерных для лесного массива [8]; кадастровая оценка лесных почвенных ресурсов

с учетом состояния почв [9]; оценка содержания почвенного углерода в лесных массивах [10]. Оценка глубины сезонно-талого слоя с применением дистанционного зондирования позволила выявить вытеснение тундры лесом [11]. Определение вегетационных индексов позволяет выявлять очаги размножения вредителей и их влияние на состояние лесного массива, а также устанавливать зоны сухостоя, ослабленных и отмирающих деревьев [12]. Значительную роль в задачах мониторинга лесных хозяйств играет в настоящее время искусственный интеллект [13]. Цифровые решения на его основе применяются для интерпретации данных ДЗЗ [14]. Перспективным подходом в этом направлении является моделирование на основе машинного обучения [15].

Цель работы – на основе данных дистанционного зондирования Земли с применением искусственного интеллекта провести ранжирование древесных объектов по высоте на территории лесного биогеоценоза. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: 1) подбор космоснимков Landsat-9 и картографирование изучаемой местности; 2) преобразование tasseled cap

по данным космоснимков; 3) распознавание лесных насаждений разной высоты, а также дорог на изучаемой территории с помощью искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Объектом исследований является лесной биогеоценоз, расположенный на ООПТ «Урочище Белый Ключ» в Татищевском районе Саратовской области (рис. 1). В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования нами применялись мультиспектральные снимки, полученные спутником Landsat 9. Обработка данных спутникового мониторинга и картографирование материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0).

Мультиспектральные космоснимки относились к периоду 01.07.2024 – 01.09.2024 гг. (USGS. Science for changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Преобразование изображения tasseled cap представляет собой изменение мультиспектральных данных ДДЗ путем линейной трансформации спектра отражения космоснимков. Данные снимки обладают высокой информативностью при дешифрировании природных объектов, в частности при изучении фенологической стадии развития сельскохозяйственных культур. Вычисление коэффициентов трансформации изображения tasseled cap основано на методе главных компонент преобразования спектральных космических снимков, сводящемся к алгоритму машинного обучения, применяемому для выявления наиболее информативных признаков данных дистанционного зондирования. Для реализации этого алгоритма применены шесть из одиннадцати каналов мультиспектрального космоснимка: синий B2 (450–515 нм), зеленый B3 (525–600 нм),

красный B4 (630–680 нм), ближний ИК(NIR) B5 (845–885 нм), ближний ИК(SWIR2) B6 (1560–1660 нм), ближний ИК(SWIR3) B7 (2100–2300 нм).

С применением линейной комбинации этих данных рассчитаны три компоненты преобразования tasseled cap:

а) Brightness («яркость»), характеризующая отражательную способность почвы, по формуле:

$$\text{Brightness} = 0.3037B2 + 0.2793B3 + 0.4743B4 + 0.5585B5 + 0.5082B6 + 0.1863B7; \quad (1)$$

б) Greenness («зеленость»), характеризующая вегетационную активность растений, по формуле:

$$\text{Greenness} = -0.2941B2 - 0.243B3 - 0.5444B4 + 0.7276B5 + 0.713B6 - 0.1608B7; \quad (2)$$

в) Wetness («влажность»), характеризующая взаимодействие почвенной влаги с растительным покровом, по формуле:

$$\text{Wetness} = 0.1511B2 + 0.1973B3 + 0.3283B4 + 0.3407B5 - 0.7117B6 - 0.455B7. \quad (3)$$

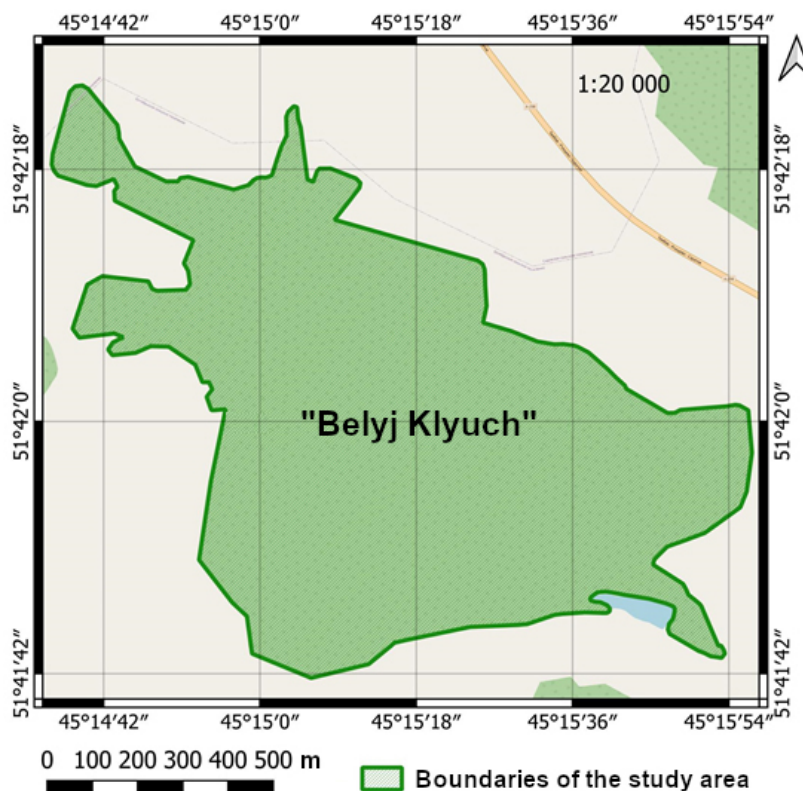


Рис. 1. Топографическая карта «Урочища Белый Ключ».

Fig. 1. Topographic map of the “Bely Klyuch” natural landmark.

Дополнительно был рассчитан EVI (enhanced vegetation index):

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{B5 - B4}{B5 + 6B4 - 7.5B2 + 1} \quad (4)$$

Картограммы трех составляющих преобразования tasseled cap для исследуемой территории: brightness, greenness и wetness (рис. 2) и индекса EVI, а также диаграммы преобразования tasseled cap: greenness vs brightness; wetness vs brightness; greenness vs wetness; NIR (B5) vs RED (B4) (рис. 3, 4) составлены в программе SAGA GIS (версия 9.2.0).

Распознавание лесных насаждений, расположенных в «Урочище Белый Ключ», реализовано с помощью платформы искусственного интеллекта Mapflow, осуществляющей автоматический препроцессинг и анализ. Классификация участков проведена в соответствии с пороговыми значениями, применяемыми модулем AI Mapflow. Деревья и кустарниковая растительность классифицируются в зависимости от плотности насаждения и высоты: высокий лес – свыше 10 м до 99 м, средний (низкорослый, растущий) лес – свыше 4 м до 10 м включительно, кустарники – от 0 до 4 м включительно. Участки леса, соответствующие каждому классу, распознаются в виде отдельных полигонов, класс которых определяется свойствами этого объекта.

Результаты

Путем комбинирования каналов B2–B7 мультиспектрального снимка Landsat-9 получены картограммы распределения трех главных компонент – brightness, greenness и wetness (рис. 2) – преобразования tasseled cap, расположенных внутри периметра изучаемой территории.

Представленная на рис. 2 а компонента brightness (яркость) обозначена серым цветовым градиентом, greenness (зеленость) – зеленым (рис. 2 б), wetness (влажность) – синим (рис. 2 в).

Частотные гистограммы трех главных компонент преобразования tasseled cap (рис. 3)

охарактеризуют фитоэкологическое состояние лесного массива «Урочища Белый Ключ».

Дополнительно был рассчитан улучшенный вегетационный индекс EVI (enhanced vegetation index), характеризующий отражательную способность поверхности, особенно чувствительный у густой растительности, в ближнем инфракрасном и видимом красном диапазонах.

На рис. 4 представлены двухмерные диаграммы рассеяния, показывающие взаимосвязь коэффициентов главных компонент.

Объекты растительного происхождения и коммуникации были разделены плагином искусственного интеллекта на два основных класса: высокий лес (свыше 10 м до 99 м) и средний (низкорослый, растущий) (свыше 4 до 10 м включительно) (рис. 5). Установлено, что 60–65 % приходится на долю высокого леса (зеленый цвет на рис. 5), 30–35 % – на долю деревьев среднего класса (выделены на рис. 5 желтым цветом). Открытые массивы и кустарники занимают менее 2 % от общего количества растительных объектов.

Обсуждение

«Урочище Белый Ключ» является природно-экологическим каркасом Татищевского района Саратовской области и частью одноименного ООПТ, занимая площадь 152 га. Объектами охраны на этой территории являются ольха черная (*Alnus glutinosa*) и дуб черешчатый (*Quercus robur*), а также краснокнижные растения.

Преобладание объектов высотой свыше 10 м до 99 м (зеленый цвет на карте рис. 5) свидетельствует о формировании зрелого биогеоценоза. Растительные объекты таких размеров представлены крупными деревьями, составляющими верхний ярус леса. Наличие такой группы деревьев говорит о сформировавшейся лесной экосистеме, где деревья достигают зрелости и предоставляют большое количество экологических ниш для других видов растений и животных.

Меньшая доля растительных объектов размерами свыше 4 до 10 м (желтый цвет на карте

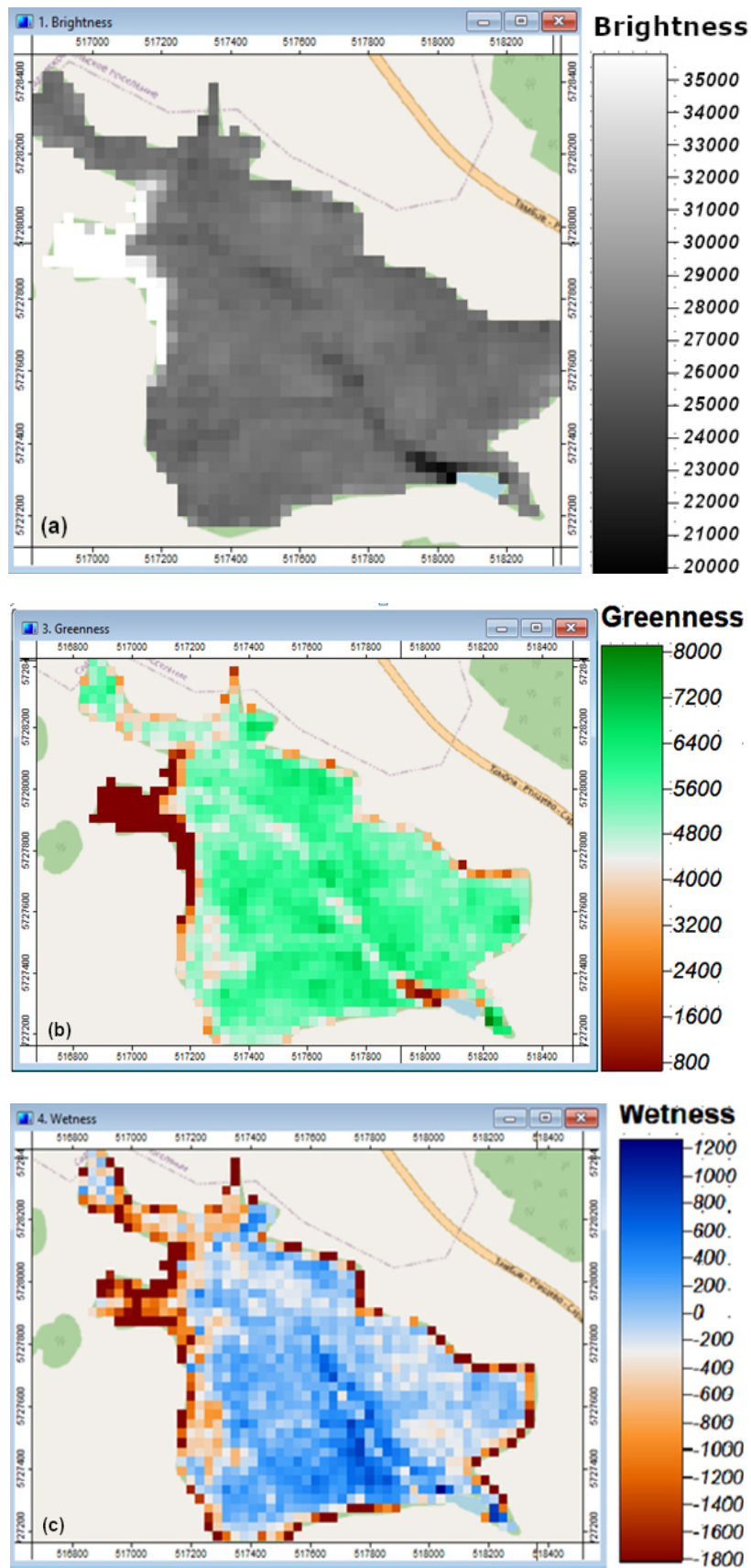


Рис. 2. Картограммы преобразования tasseled cap для изучаемой территории: (a) brightness (яркость), (b) greenness (зеленость), (c) wetness (влажность).

Fig. 2. Tasseled cap transformation cartograms for the study area: (a) brightness, (b) greenness, and (c) wetness.

рис. 5), вероятно, принадлежит подросту и молодым деревьям, обеспечивающим естественное возобновление леса. Объекты меньшего размера составляют молодые деревья дуба и ольхи, находящиеся на стадии роста, а также подлесок (кустарники и небольшие деревья, такие как лещина, бересклет) и отдельные крупные кустарники.

Наличие как крупных деревьев, так и более мелких свидетельствует о сложной вертикальной структуре леса. Это, в свою очередь, говорит о высоком биоразнообразии.

Во-первых, это биоразнообразие местообитаний разных видов, обусловленное нали-

чием многоярусной структуры леса. Различные ярусы леса предоставляют различные условия для обитания растений и животных.

Во-вторых, это возрастная структура леса. Устойчивое развитие биогеоценоза происходит за счет наличия деревьев разного возраста (от молодых до старовозрастных). Это обеспечивает стабильность экосистемы и создает условия для существования видов, приспособленных к разным стадиям развития леса. Так, роль старовозрастных деревьев в функционировании данного биогеоценоза заключается в предоставлении местообитания для гнездования птиц и убежища для летучих мышей.

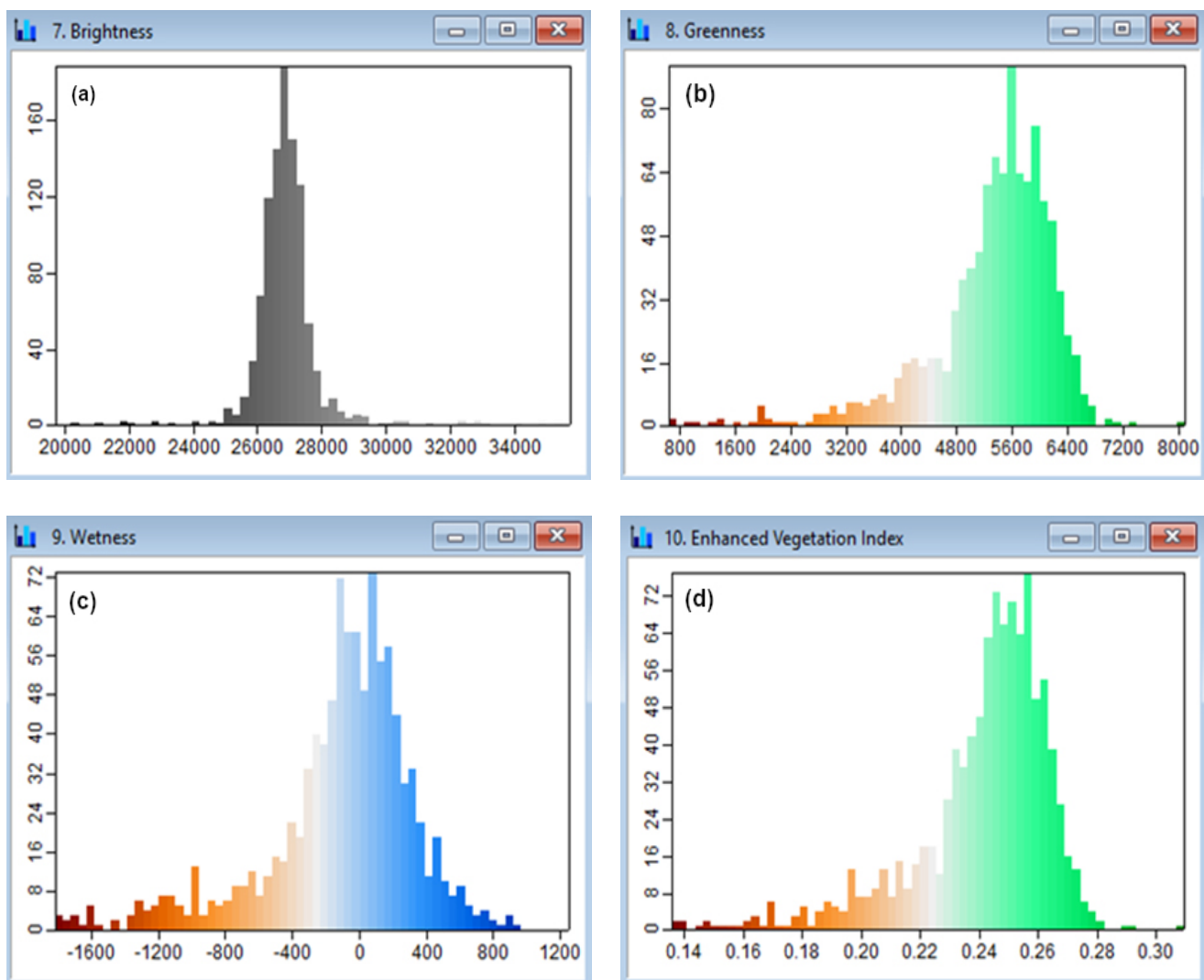


Рис. 3. Частотные гистограммы распределения значений компонент преобразования tasseled cap (a–c) и индекса EVI (d) для изучаемой территории.

Fig. 3. Frequency histograms of the distribution of values of the tasseled cap transformation components (a–c) and the EVI index (d) for the study area.

В-третьих, это видовое разнообразие. Дуб черешчатый и ольха черная создают основу для существования многих связанных с ними видов. Дуб создает местообитания насекомых, птиц и млекопитающих. Ольха, в свою очередь, предпочитает влажные места и способствует формированию почвенной флоры и фауны.

Известно [16], что преобразование tasseled cap эффективно в задаче дешифрирования спутниковых космоснимков. Для многоярусного лесного биогеоценоза, содержащего лес, кустарники, подлесок, распознавание растительных объектов на космоснимках эффективнее проводить с помощью искусственного

интеллекта. Это связано с тем, что преобразование tasseled cap является линейным преобразованием спектральных каналов, оно выделяет главные компоненты, такие как яркость, зеленость и влажность, и эффективнее работает для простых ландшафтов. Для многоярусного леса сигнал, исходящий от пикселя, является нелинейной комбинацией эффектов отражения от полога, подлеска, кустарников, кроны деревьев и других объектов. В таком случае в задаче дешифрирования спутниковых космоснимков эффективнее работает искусственный интеллект, способный устанавливать нелинейные взаимосвязи между указанными характеристиками.

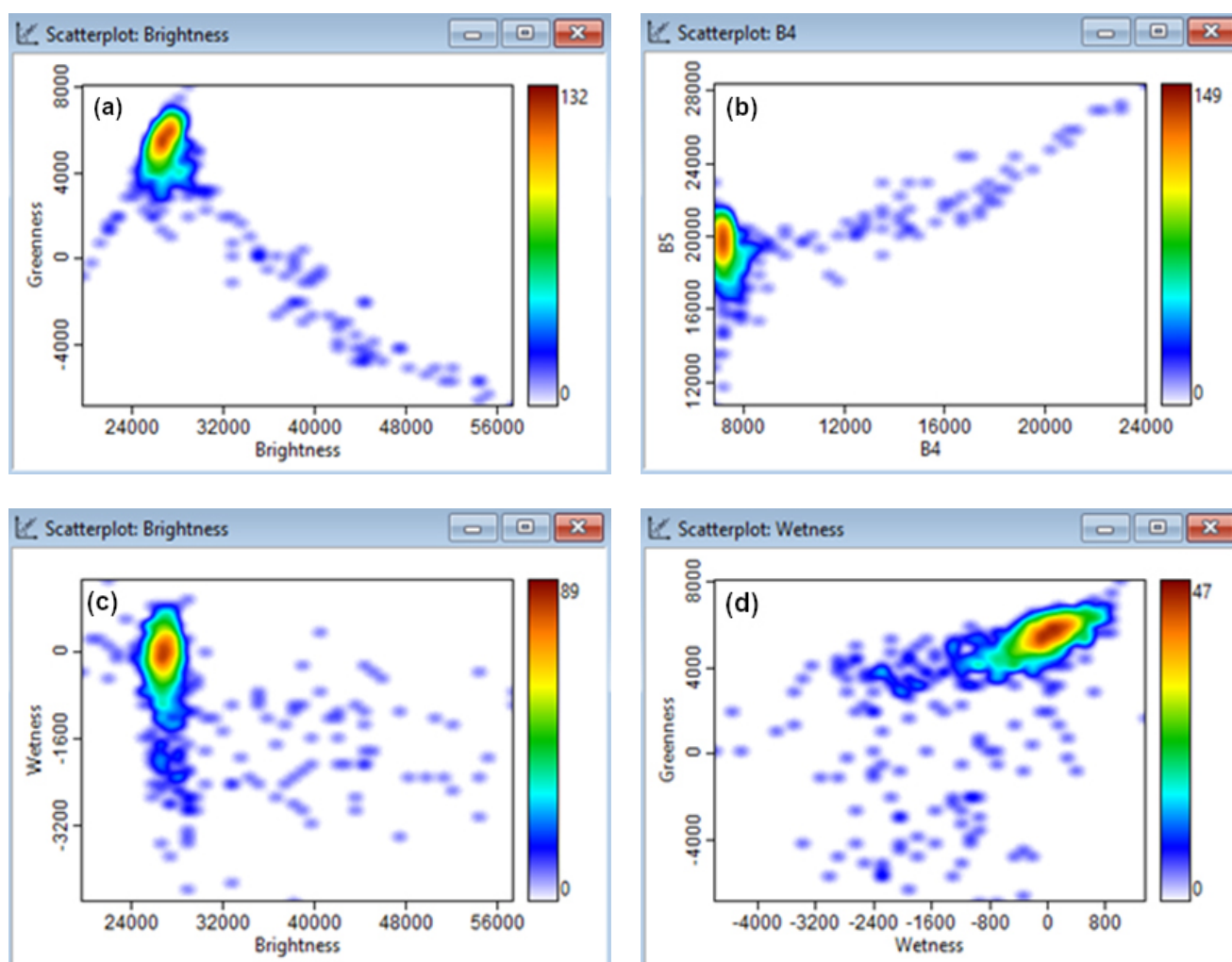


Рис. 4. Результат преобразования tasseled cap для изучаемой территории. Двухмерные диаграммы, показывающие взаимосвязь коэффициентов главных компонент: (a) greenness vs brightness; (b) NIR (B5) vs RED (B4); (c) wetness vs brightness; (d) greenness vs wetness.

Fig. 4. The result of the tasseled cap transformation for the study area. Two-dimensional diagrams showing the relationship between the coefficients of the principal components: (a) greenness vs brightness; (b) NIR (B5) vs RED (B4); (c) wetness vs brightness; (d) greenness vs wetness.

Полученные с помощью плагина распознавания космоснимков на основе искусственного интеллекта Mapflow данные о высоте растительных объектов в «Урочище Белый Ключ» позволили оценить структуру лесного массива. На основе пиксельной классификации, реализованной с помощью архитектур CNN, выделены размерные группы деревьев на космоснимках и установлено их процентное соотношение.

Преобладание высокого леса (60–65 %) указывает на то, что верхний ярус биогеоценоза занимает большую часть территории и является определяющим фактором структуры и функционирования экосистемы. Высокие деревья создают тень, влияют на микроклимат, почвенные условия и доступность света для нижних ярусов.

Открытые участки почвы, подстилка и сухая листва, более освещенные участки крон увеличивают значение компоненты яркости brightness преобразования tasseled cap и, соответственно, интенсивность серой окраски (рис. 3 а). Высокие значения brightness харак-

терны для участков леса, на которых имеются вырубки, повреждения, или участков с преобладающей открытой почвой. Сомкнутые леса характеризуются низким значением величины brightness.

Высокая величина компоненты зелени greenness (рис. 3 б) и, соответственно, более яркий зеленый оттенок на диаграмме отвечают посадкам высокой плотности и сомкнутости крон. Напротив, участки с поврежденной вырубками и гарью растительностью или открытые участки почвы будут иметь более низкие значения greenness.

Высокие значения компоненты влажности wetness (рис. 3 с) соответствуют влагообеспеченным лиственным породам деревьев. Это может быть связано с большим количеством воды в листьях, высокой биомассой или наличием влажной подстилки. Низкие значения wetness указывают на участки с дефицитом влажности.

Симметричная, компактная форма диаграммы brightness (рис. 3 а) соответствует растительному сообществу, в котором отмечается

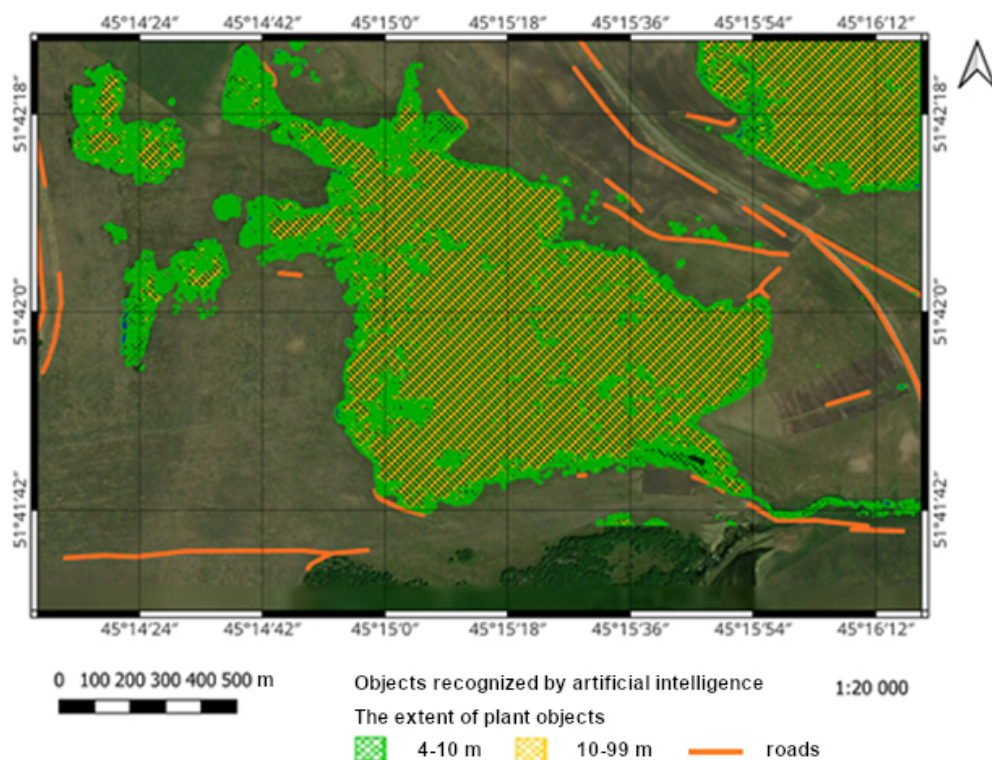


Рис. 5. Результаты распознавания растительных объектов и дорог на исследуемой территории с использованием искусственного интеллекта.

Fig. 5. Results of the AI recognition of plant objects and roads in the study area.

высокая однородность распределения высокой и низкорослой растительности и сомкнутости крон. Асимметричная, смещенная в сторону высоких значений величина компоненты зелени (*greenness*) (рис. 3 б) также соответствует высокой сомкнутости крон и густоте облиствения кроны. Об этом же свидетельствует смещенная в сторону больших значений, асимметричная форма компоненты влажности (*wetness*) (рис. 3 с), связанная с высоким влагозапасом кроны деревьев урочища, наличием листовой подстилки и запасов влаги в почве. Асимметричное распределение улучшенного вегетационного индекса *EVI*, смещенное в сторону высоких значений (рис. 3 д), свидетельствует о высокой продуктивности фитомассы деревьев на рассматриваемой территории и о высокой плотности ее распределения, что объясняется высокой сомкнутостью крон.

Структура диаграмм tasseled cap для лесного массива характеризуется нечетким, размытым характером почвенной линии, а также локальным сосредоточением пика вегетационной компоненты (рис. 3 а–д). Это объясняется тем, что, в отличие от сельскохозяйственных полей, лесная почва скрыта под листвой, опадом, мхом и поэтому отклик отражения от почвы смешивается с отражением от растительности. Кроме того, затененные участки имеют пониженную отражательную способность, а также способны маскировать почвенные участки. Таким образом, чем более диффузный характер имеет почвенная линия и чем более локальный характер имеет пик вегетационной компоненты на диаграмме tasseled cap лесного биогеоценоза, тем выше плотность расположения деревьев и выше сомкнутость их крон.

Анализ двухмерных диаграмм взаимосвязи главных компонент преобразования tasseled cap (рис. 4) позволяет выявить их особенности при анализе лесной экосистемы.

Во-первых, это нечеткость, размытость почвенной линии в преобразовании с координатами *greenness vs brightness* (рис. 4 а) и *NIR vs RED* (рис. 4 б). Данный факт можно объяснить системным характером взаимодействий компонентов лесного биогеоценоза: многослойной структурой лесного полога; фактора-

ми, снижающими отражательную способность почвы, такими как влияние фотосинтетической активности растительной биомассы, фактор тени, наличие органического вещества лесной подстилки, имеющего собственную отражательную активность.

Во-вторых, зависимости *wetness vs brightness* (рис. 4 с), *greenness vs wetness* (рис. 4 д) для лесного массива имеют высокую дисперсию. Причиной этого являются системные взаимосвязи компонентов лесной экосистемы: возрастное распределение деревьев и, как следствие, сомкнутость их крон и интенсивность отбрасываемой тени. Кроме того, влияют на данные зависимости различная плотность полога (области с густым пологом будут отличаться по влажности и зелени от участков с редким пологом), наличие подлеска, рельеф местности, с которым связаны освещенность территории и дренаж. Размытый характер зависимостей влажности от яркости и зелени от влажности является показателем устойчивого развития лесной экосистемы.

В-третьих, наличие локального участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне значений. Это объясняется вегетационной активностью зеленой биомассы в кронах деревьев и кустарников. Внедрение подобных технологий искусственного интеллекта в практику лесоустройства и экологического мониторинга значительно повышает эффективность и точность проводимых исследований. Автоматизация процессов обработки данных и анализа изображений сокращает временные и трудовые затраты, а также минимизирует влияние человеческого фактора на результаты. Полученные данные могут быть использованы для разработки планов по устойчивому управлению лесными ресурсами, сохранению биоразнообразия и смягчению последствий изменения климата. Это, в свою очередь, способствует принятию обоснованных управленческих решений в области лесного хозяйства и охраны природы.

Научно-методическое значение сочетания метода tasseled cap и модуля искусственного интеллекта Mapflow состоит в следующем.

Метод tasseled cap преобразует многоспектральные данные дистанционного зондирования в набор ортогональных индексов, наиболее информативных для анализа растительности, снижая размерность данных до трех наиболее значимых компонент (яркость, зеленость, влажность). Отсюда следует, что данный метод акцентирует внимание на таких характеристиках, как биомасса, содержание хлорофилла и влажность. Это увеличивает эффективность алгоритмов распознавания различий в характеристиках деревьев.

Применение модуля Mapflow для распознавания высоты деревьев на основе преобразованных с помощью tasseled cap данных позволяет автоматизировать картографирование территории, устраняя ручную оцифровку. При этом с помощью алгоритмов машинного обучения (таких как сверточные сети) увеличивается точность распознавания границ деревьев и дифференциации разных объектов (деревьев, кустарников, почвы и т.д.).

Таким образом, сочетание метода tasseled cap и модуля искусственного интеллекта Mapflow позволяет получить ценную информацию для изучения и мониторинга лесных экосистем – провести оценку биомассы и запасов древесины. Используя повторные съемки и анализ на основе описанного подхода, мы можем отслеживать динамику изменений в лесном покрове, вызванных пожарами, вырубками и другими факторами. Это важно и для определения границ отдельных биогеоценозов.

Заключение

На основе анализа мультиспектральных космоснимков в видимой и ближней ИК-областях с помощью преобразования tasseled cap выделены следующие признаки устойчивого развития лесного листовенного биогеоценоза: нечеткость почвенной линии в координатах «зеленость» vs «яркость», NIR vs RED преобразования tasseled cap; высокая дисперсия зависимостей «влажность» vs «яркость»; «зеленость» vs «влажность»; наличие локального

участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне; асимметричность и смещенность в сторону больших значений частотных диаграмм влажности, зелености, а также индекса EVI. Эти признаки объясняются системным характером взаимодействия в лесных биогеоценозах таких факторов, как многослойная структура лесного полога, влияние фотосинтетической активности растительной биомассы, фактор тени, а также возрастное распределение растительных компонентов экосистем.

Структура диаграмм tasseled cap для лесного массива характеризуется нечетким, размытым характером почвенной линии, а также локальным сосредоточением пика вегетационной компоненты. Это объясняется тем, что лесная почва скрыта под листвой, опадом, мхом и поэтому отклик отражения от почвы смешивается с отражением от растительности. Кроме того, затененные участки имеют пониженную отражательную способность, а также способны маскировать почвенные участки. Таким образом, диффузный характер почвенной линии и локальный характер пика вегетационной компоненты на диаграмме tasseled cap лесного биогеоценоза характеризуют плотность расположения деревьев и сомкнутость их крон.

Практическая значимость работы, сочетающей преобразование tasseled cap и методы искусственного интеллекта для оценки вегетационной активности лесного биогеоценоза и вклада древесных пород разной высоты, заключается в следующем.

Преобразование tasseled cap позволяет выделить основные компоненты, характеризующие состояние растительности: яркость, зеленость и влажность. Модели, созданные с помощью искусственного интеллекта, более точно оценивают вегетационную активность, чем созданные традиционными методами. Это позволяет выявлять проблемные участки леса на ранних стадиях, например зоны с растительностью, угнетенной из-за болезней, вредителей или загрязнения.

Оценка вклада древесных пород разной высоты в общую вегетационную активность

леса позволяет понять структуру лесного биогеоценоза и выявить доминирующие породы. Это важно для оценки устойчивости леса к изменениям климата, так как разные породы обладают разной устойчивостью к засухе, болезням и другим факторам. Модели искусственного интеллекта могут быть обучены для разделения вклада разных пород на основе данных дистанционного зондирования и наземных измерений.

Сочетание tasseled cap и искусственного интеллекта позволяет создать систему мониторинга изменений в лесах во времени. Это особенно важно в условиях изменяющегося климата, когда леса подвергаются воздействию новых угроз. С помощью такой системы можно оперативно выявлять изменения в состоянии лесов и принимать меры по их защите и адаптации.

Разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования будущей вегетационной активности лесов в зависимости от различных факторов, таких как изменения климата, лесохозяйственные мероприятия или антропогенное воздействие. Это позволяет принимать более обоснованные решения в области лесопользования и планирования.

Применение дистанционного зондирования и методов искусственного интеллекта может значительно снизить затраты на мониторинг лесов по сравнению с традиционными методами, требующими большого объема наземных измерений. Это делает мониторинг более доступным и позволяет охватить значительные территории.

Список литературы

1. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. **2018**. Космос, земля и суперкомпьютинг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН). *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*, 7(4): 5–29.
2. Зеньков И.В., Кустикова Е.А., Ле Хунг Ч., Сильванович О.В., Юронен Ю.П., Маглинец Ю.А., Раевич К.В., Герасимова Е.И., Миронова Ж.В., Скорнякова С.Н. **2024**. Цифровая платформа в решении задач экологии нарушенных земель для горнодобывающих предприятий с открытыми горными работами на основе ресурсов дистанционного зондирования и искусственного интеллекта. *Экология и промышленность России*, 28(1): 52–57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-52-57>
3. Каримуллах А., Братков В.В. **2024**. Оценка изменений площади зеленых насаждений Кабула по материалам дистанционного зондирования земли. *Мониторинг. Наука и технологии*, 4(62): 59–67. doi:10.25714/MNT.2024.62.008
4. Бисенбаева С.Б., Мелисбек Ш.М., Баймухан Е.К. **2024**. Обзор мониторинга лесов в Казахстане на основе наблюдения за землей. *Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология*, 147(2): 135–149. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149>
5. Данилин И.М., Лапко В.А., Кузнецов А.А., Бабий И.А., Вайсман А.О. **2024**. Инновационный учебно-научный центр мониторинга лесных ресурсов Сибири на основе лазерной и микроволновой аэрокосмической съемки. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 25(1): 8–17. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17>
6. Стрекаловская М.И., Доброворская Н.И. **2023**. Использование ГИС-технологий для создания базы данных лесовосстановления. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 4(2): 199–204. doi:10.33764/2618-981X-2023-4-2-199-204
7. Япаров И.М., Вильданов И.Р., Баширова Э.В., Гумеров Р.А., Магасумов Т.М. **2020**. Анализ многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории природного парка «Иремел» для местного лесопользования с использованием цифровых моделей рельефа. *Астраханский вестник экологического образования*, 3(57): 140–149. doi:10.36698/2304-5957-2020-19-3-140-149
8. Мамедалиева В.М. **2021**. Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга. *Известия вузов. Лесной журнал*, 2(380): 106–115. doi:10.37482/0536-1036-2021-2-106-115
9. Черткова Е.П., Замолотчиков Д.Г. **2024**. Оценка земельных ресурсов Алтайского государственного природного биосферного заповедника с учетом уникальности биоразнообразия и ценности экосистем. *Экосистемы*, 40: 39–49. (In Russ). doi:10.29039/2413-1733-2024-40-39-49
10. Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. **2023**. Mapping of soil organic carbon content and stocks at the regional and local levels: the analysis of modern methodological

- approaches. *Forest Science Issues*, 6(4): 1–46. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
11. Калиничева С.В., Никифорова Н.Н., Максимов Н.А., Мисайлов И.Е., Федоров А.Н. **2021**. Исследование наступления леса на тундру в регионе Восточной Сибири в условиях меняющегося климата с применением ГИС и данных дистанционного зондирования Земли. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*, 4(24): 73–82. doi:10.25587/SVFU.2021.24.4.017
 12. Алексеев А.С., Черниховский Д.М. **2024**. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2(398): 11–28. doi:10.37482/0536-1036-2024-2-11-28
 13. Беспалова В.В., Полянская О.А. **2021**. Внедрение цифровых технологий на предприятиях лесного комплекса. *Журнал прикладных исследований*, 2(4): 66–70. doi:10.47576/2712-7516_2021_2_4_66
 14. Иванова Н.В., Шашков М.П., Лебедев А.В., Шанин В.Н. **2024**. Количественный анализ факторов, влияющих на повреждение старовозрастного южнотаежного древостоя в результате катастрофического ветровала, на основе дистанционных и объединенных данных. *Экология*, 4: 284–292. <https://doi.org/10.31857/S0367059724040043>
 15. Линкина А.В., Елсуков В.Д., Тришин А.А. **2023**. Использование моделей машинного обучения при решении задач в отрасли органического сельского хозяйства. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 85(4): 133–138.
 16. Николаев А.А., Николаева И.О. **2022**. Преобразование цифровых данных космической съемки алгоритмом tasseled cap при определении структуры лесных насаждений. *Международный научно-исследовательский журнал*, 9(123): 1–5. doi:10.23670/IRJ.2022.123.77; URL: <https://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77> (accessed 20.04.2025).
 17. Zenkov I., Kustikova E., Le Hung Ch., Silvanovich O., Yuronen Yu., Maglinets Yu., Raevich K., Gerasimova E., Mironova Zh., Skornyakova S. **2024**. The digital platform for resolving problems of ecology of disturbed lands for mining companies with open-pit mining based on remote sensing resources and artificial intelligence. *Ecology and Industry of Russia*, 28(1): 52–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-52-57>
 18. Karimullah A., Bratkov V.V. **2024**. Evaluation of changes in the urban green space area of Kabul, Afganistan. *Monitoring. Science and Technologies*, 4(62): 59–67. (In Russ.). doi:10.25714/MNT.2024.62.008
 19. Bissenbayeva S., Melisbek Sh., Baymukan Er. **2024**. An overview of forest monitoring in Kazakhstan based on Earth observation. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 147(2): 135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149>
 20. Danilin I.M., Lapko V.A., Kuznetsov A.A., Babi I.A., Vaisman A.O. **2024**. Innovative educational and research center for monitoring forest resources of Siberia based on laser and microwave aerospace imaging. *Siberian Aerospace Journal*, 25(1): 8–17. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17>
 21. Strekalovskaya M.I., Dobrotvorskaya N.I. **2023**. Using GIS technologies to create a reforestation database. *Interexpo GEO-Siberia*, 4(2): 199–204. (In Russ). doi:10.33764/2618-981X-2023-4-2-199-204
 22. Yaparov I.M., Vildanov I.R., Bashirova E., Gumerov R.A., Magasumov T.M. **2020**. Analysis of multi-year dynamics of the NDVI growing index in the Iremel Natural Park for local forest management using digital terrain models. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 3(57): 140–149. (In Russ). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-3-140-149>
 23. Mamedaliyeva V.M. **2021**. Algorithm and measurement of forest cover area change in the Khachmaz region of Azerbaijan by satellite monitoring. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2(380): 106–115. (In Russ). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-106-115>
 24. Chertkova E.P., Zamolodchikov D.G. **2024**. Assessment of land resources of the Altai State Nature Biosphere Reserve considering the uniqueness of biodiversity and the value of ecosystems. *Ecosystems*, 40: 39–49. (In Russ). doi:10.29039/2413-1733-2024-40-39-49
 25. Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. **2023**. Mapping of soil organic carbon content and stocks at the regional and local levels: the analysis of modern methodological

References

1. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. **2018**. Space, Earth and supercomputing: Conjugate problems of ecology, climate, monitoring and remote sensing of Earth, hyper-spectral approach and nanodiagnostics of natural environments (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences). *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathe-*

- approaches. *Forest Science Issues*, 6(4): 1–46. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
11. Kalinicheva S.V., Nikiforova N.N., Maksimov N.A., Misailov I.E., Fedorov A.N. **2021**. Investigation of the forest attack on the tundra in the Eastern Siberia region in a changing climate using GIS and Earth remote sensing data. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta imeni M.K. Ammosova. Seria: Nauki o Zemle*, 4(24): 73–82. (In Russ.). doi:10.25587/SVFU.2021.24.4.017
 12. Alekseev A.S., Chernikhovskiy D.M. **2024**. Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2: 11–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>
 13. Bepalova V.V., Polyanskaya O.A. **2021**. Implementation of digital technologies at the enterprises of the forest complex. *Journal of Applied Research*, 2(4): 66–70. (In Russ.). doi:10.47576/2712-7516_2021_2_4_66
 14. Ivanova N.V., Shashkov M.P., Lebedev A.V., Shannin V.N. **2024**. Quantitative analysis of factors influencing damage to old-growth hemiboreal stands as a result of a catastrophic windthrow, based on remote sensing and merged data. *Ekologiya*, 4: 284–292. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0367059724040043>
 15. Linkina A.V., Elsukov V.D., Trishin A.A. **2023**. The use of machine learning models in solving problems in the field of organic agriculture. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 85(4): 133–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-4-133-138>
 16. Nikolaev A.A., Nikolaeva I.O. **2022**. [Transformation of digital satellite imagery data by the tasseled cap algorithm in determining the structure of forest plantations]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*, 9(123): 1–5. (In Russ.). doi:10.23670/IRJ.2022.123.77; URL: <https://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77> (accessed 20.04.2025).

Об авторах

Сотрудники Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия:

Косарев Антон Валериевич (<https://orcid.org/0000-0002-6614-7297>), кандидат химических наук, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК», aleteia@inbox.ru

Сергеева Ирина Вячеславовна (<https://orcid.org/0000-0001-6824-1597>), доктор биологических наук, заведующая кафедрой «Ботаника и экология», ivsergeeva@mail.ru

Ключиков Аркадий Викторович (<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>), кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Цифровое управление процессами в АПК», krok9407@mail.ru

Чумакова Светлана Валентиновна (<https://orcid.org/0000-0002-2877-0758>), кандидат технических наук, заместитель директора Института генетики и агрономии, ch-sv@yandex.ru

Леонтьев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, заместитель директора Института инженерии и робототехники, aleksei_leontev@list.ru

About the Authors

Employees of the Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia:

Kosarev, Anton V. (<https://orcid.org/0000-0002-6614-7297>), Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor at the Department of Digital process management in the agro-industrial complex, aleteia@inbox.ru

Sergeeva, Irina V. (<https://orcid.org/0000-0001-6824-1597>), Doctor of Biology, Head of the Department of Botany and ecology, ivsergeeva@mail.ru

Klyuchikov, Arkady V. (<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>), Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Digital process management in the agro-industrial complex, krok9407@mail.ru

Chumakova, Svetlana V. (<https://orcid.org/0000-0002-2877-0758>), Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Genetics and Agronomy Institute, ch-sv@yandex.ru

Leontiev, Aleksei A., Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Engineering and Robotics Institute, aleksei_leontev@list.ru

Поступила 29.05.2025

Принята к публикации 05.08.2025

Received 29 May 2025

Accepted 5 August 2025