

# Параметры многолетней динамики вегетационного индекса как показатели восстановления древесной растительности на постагрогенных землях

Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
Белгород, 308015, Россия  
E-mail: terekhin@bsuedu.ru*

Процессы естественного облесения представлены на многих постагрогенных землях Среднерусской лесостепи. В статье описаны возможности оценки восстановления древесной растительности на залежах на основе параметров многолетней динамики вегетационного индекса. Объектами исследования выступали постагрогенные земли с одинаковым периодом восстановительных сукцессий и типичные для территории Центрального Черноземья. Параметры многолетнего ряда вегетационного индекса, к которым относятся  $\tau$  Манна–Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда, показали разную силу связи со скоростью естественного облесения залежей с лиственными и хвойными породами. Одновременно различия в скорости формирования древесной растительности на залежах с лиственными, хвойными породами и смешанным составом могут быть выражены через первую производную функции вегетационного индекса от времени. Её же параметры характеризуют отличия постагрогенных земель с развитием процессов облесения от залежных земель, на которых восстановление древесной растительности отсутствует или представлено незначительно. Оцениваемые параметры многолетней динамики вегетационного индекса отразили фактические пространственные, относительные различия в скорости облесения постагрогенных земель в регионе. Они показали ключевые территориальные тренды в интенсивности восстановления древесной растительности на залежах.

**Ключевые слова:** залежные земли, многолетние ряды, MODIS, NDVI, восстановление древесной растительности

Одобрена к печати: 07.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-205-217

## Введение

Анализ вторичных сукцессий в условиях постагрогенного развития выступает важнейшей задачей в оценке состояния оставленных аграрных (залежных) земель. Восстановительные процессы в условиях прекращения распашки оказывают влияние на различные характеристики почв (Лисецкий, 2012; Телеснина, 2015; Khorchani et al., 2023), растительного покрова (Карпин и др., 2017; Nadal-Romero et al., 2023), приводят к изменениям в потоках вещества и энергии (Карелин и др., 2015), видовой разнообразия (Баишева, Широких, 2017). На рубеже второго–третьего десятилетий XXI в. восстановительные процессы древесной растительности затронули значительную часть оставленных аграрных земель в лесостепной зоне (Терехин, 2022a). В условиях высокой степени аграрного освоения её территории крайне актуальной становится задача исследования восстановительных процессов на таких угодьях.

Вследствие непрерывности протекания процессов естественного облесения их анализ обуславливает необходимость регулярных наблюдений. Они должны позволять формировать временной ряд измерений, характеризующих облесённость земель в разные этапы восстановительной сукцессии. Возможность формирования таких рядов может быть обеспечена практически исключительно на основе разновременных данных дистанционного зондирования Земли с охватом значительных участков земной поверхности. С другой стороны, анализ фактической облесённости залежей требует наличия снимков необходимого пространственного разрешения, позволяющих оценить её методом визуального дешифрирования (Домнина и др., 2022; Медведев и др., 2019; Терехин, 2022b) либо на основе автоматизированных подходов, например классификации спектральной яркости, метода опорных векторов (Guawali

et al., 2024; Zhang et al., 2014), случайного леса (Bera et al., 2023; Zurqani, 2024) или других. Снимки, позволяющие таким способом оценивать величину облесённости или лесистости постагрогенных земель (например, Sentinel-2), характеризуются относительно невысокой частотой получения, не позволяющей для многих регионов сформировать необходимый ряд. Обусловлено это высоким числом облачных дней в году, вследствие которого становится затруднительным не только подбор безоблачных снимков за сезон, но и построение многолетнего ряда из изображений одних и тех же сроков активной вегетации.

Вариантом решения этой проблемы становится использование снимков с высоким временным, но более низким пространственным разрешением. Такие данные не позволяют напрямую оценивать облесённость залежей, как более детальные снимки, но предоставляют возможность её анализа на основе закономерностей влияния лесистости на их спектрально-отражательные характеристики. Примером таких данных выступают снимки MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), получаемые с начала 2000-х гг. (Justice et al., 2002), и информационные продукты на их основе, содержащие значения спектральных вегетационных индексов (Anees et al., 2024; Heck et al., 2019; Seguini et al., 2024). В свою очередь возникает необходимость установления параметров многолетней динамики спектрально-отражательных свойств, которые могли бы выступать объективными показателями различий в скорости облесения постагрогенных земель.

В условиях Среднерусской лесостепи восстановительные процессы древесной растительности получили распространение на большинстве постагрогенных земель, но скорость естественного облесения существенно изменяется в пределах региона (Терехин, 2022а). Лесостепь характеризуется переходными условиями от лесной зоны к зоне степи. Из зональных типов почв распространены чернозёмы и серые лесные почвы с преобладанием первых (Соловиченко и др., 2012). Достаточно сильно фрагментированные лесопокрываемые земли в наибольшей степени представлены широколиственными лесами, в первую очередь дубравами (Бугаев и др., 2013; Растительность..., 1980). Кроме них также имеются сосновые леса, которые распространены в некоторых частях региона (Камышев, Хмелев, 1976).

Преобладающие в структуре земель пахотные угодья (Трофимов и др., 2017) разделены сетью лесных полос и распространёнными овражно-балочными системами (Беспалова, Саблина, 2019; Дроздов, 1991), по краям многих из которых расположены лесопосадки. Они вместе с лесами служат источником заноса семян на участки оставленной пашни, которая также, как правило, окаймляется лесными полосами. Распространение залежных земель с разной величиной проективного покрытия древесной растительностью отражает региональные особенности и вместе с тем даёт возможность формировать выборки объектов, позволяющие исследовать параметры многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик залежных земель для анализа восстановления на них древесной растительности.

Цель исследования заключалась в анализе параметров многолетних рядов спектрально-отражательных характеристик постагрогенных земель как показателей скорости восстановления на них древесной растительности. Задачи исследования включали:

1. Анализ зависимостей между параметрами многолетней динамики вегетационного индекса и величиной лесистости одновозрастных залежных земель.
2. Формализацию различий в скорости восстановления древесной растительности на залежах с разными древесными породами: лиственными, хвойными или со смешанным составом.
3. Оценку эффективности предложенных показателей для определения пространственных различий в скорости восстановления лесного покрова на постагрогенных землях Среднерусской лесостепи.

## Материалы и методика исследования

Для оценки влияния процессов естественного облесения постагрогенных земель на многолетнюю динамику их спектрально-отражательных характеристик на территории Среднерусской лесостепи, включающей Центральное Черноземье и Орловскую область, сформирована

пространственная выборка объектов. Соответствующий территориальный охват обеспечил возможность создания необходимой выборки объектов, включающей как залежные земли с разной величиной облесённости, так и с разными древесными породами: лиственными, хвойными, со смешанной древесной растительностью. Подготовка выборок осуществлена методом исследования территории региона по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения 2000–2021 гг., полученным из интернет-архивов открытого доступа, и снимков Landsat TM/OLI (*англ.* Thematic Mapper/Operational Land Imager) аналогичного периода. Они позволяют по дешифровочным признакам формы, структуры и цвета в вариантах синтеза инфракрасных и красных каналов выявлять залежи среди обрабатываемых земель.

Выборка залежных земель сформирована на основе ряда критериев:

1. Объекты исследования должны репрезентативно представлять постагрогенные земли региона, отличающиеся по типам древесных пород, распространённых на них: лиственных, хвойных, смешанных и залежи без древесной растительности.

2. Период восстановительных сукцессий на всех залежных землях должен быть максимально идентичен и в случае настоящего исследования составлял два десятилетия с 2000 по 2021 г.

3. Объекты исследования должны быть пространственно представлены в разных частях региона.

4. Минимальная площадь залежных земель — не менее 20–30 га — для объективности анализа их спектрально-отражательных характеристик по используемым спутниковым данным.

5. Постагрогенные земли должны располагаться в автоморфных условиях — вне участков повышенного увлажнения, вне пойм рек.

6. В исследуемый период на залежах должны отсутствовать признаки нарушений растительного покрова.

Суммарная выборка включала 381 объект. Фактические различия в скорости восстановления древесной растительности на постагрогенных землях оценены на основе проективного покрытия одновозрастных залежей древесной растительностью (лесистости) по состоянию на конечную дату исследования. Либо же различия оценивались на основе среднегодовой величины её прироста, определяемой через отношение величины лесистости залежи в 2020 г. ко времени восстановительных сукцессий, которое на всех объектах было аналогичным и составляло два десятилетия. Фактическая величина лесистости была вычислена для всех залежных земель и получена методом дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, фрагменты которых по состоянию на конечную анализируемую дату были подобраны на каждый объект. Для анализа использованы снимки из интернет-сервисов открытого доступа, в первую очередь Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Лесистость в настоящем исследовании определялась как отношение площади проекций крон деревьев к общей площади залежи. На группе тестовых объектов, расположенных в различных частях региона, проведены полевые исследования особенностей растительного покрова залежных земель. В ходе них фиксировались виды древесной растительности и особенности их распространения на постагрогенных землях.

Исследование спектрально-отражательных характеристик залежей выполнено на основе информационных продуктов MOD13Q1, представляющих 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), создаваемые на основе атмосферно и радиометрически откорректированных снимков MODIS. К настоящему времени этот вид данных позволяет формировать наиболее длительные многолетние ряды вегетационного индекса с высокой частотой получения и оценивать спектрально-отражательные характеристики отдельных угодий, которыми в нашем случае выступали постагрогенные земли. Многолетний ряд MOD13Q1 включал данные с апреля по октябрь каждого года и охватывал период 2000–2020 гг., позволяя таким образом проследить влияние особенностей формирования древесной растительности на многолетнюю динамику спектрального индекса. Расчёт NDVI для каждой залежи выполнен методом зональной статистики.

В качестве параметров многолетней динамики вегетационного индекса были рассмотрены следующие характеристики: величина  $\tau$  критерия Манна–Кендалла, угловой коэффициент линейного тренда, первая производная вегетационного индекса по времени. Критерий Манна–Кендалла является непараметрическим тестом для определения наличия или отсутствия статистически значимой тенденции. В исследовании рассмотрена абсолютная величина  $\tau$ , значения которой были рассчитаны для каждой залежи. Угловые коэффициенты линейного тренда NDVI получены на основе графиков его многолетней динамики, сформированных из величин, усреднённых в периоды вегетации каждого года — с начала апреля по конец октября. Оценка связи показателей многолетней динамики вегетационного индекса и облесённости залежных земель проведена отдельно для угодий с древесной растительностью из лиственных и хвойных пород вследствие различий их спектрально-отражательных характеристик.

На следующем этапе построены ряды многолетней динамики вегетационного индекса, отражающие его региональные особенности для залежей с древесной растительностью из лиственных, хвойных пород, смешанным составом и залежей без древесной растительности. Они получены на основе значений NDVI, усреднённых с каждого из четырёх перечисленных типов залежных земель региона. Для построения рядов использованы августовские показатели индекса, находящиеся в наиболее сильной связи с лесистостью. Они также применялись для оценки пространственных различий в расчётной облесённости постагрогенных земель. Скорость изменения вегетационного индекса на каждом типе залежей рассмотрена как первая производная его функции от времени. Было высказано предположение, что различия в ней отражают отличия в скорости естественного облесения постагрогенных земель с разными типами древесных пород и вместе с тем отличия от залежей, на которых эти процессы не получили развитие.

Заключительный этап исследования включал сопоставление фактических пространственных различий в облесённости постагрогенных земель Среднерусской лесостепи и их отличий, полученных на основе её расчётных значений, которые были вычислены с использованием параметров многолетней динамики вегетационного индекса. Различия были оценены на основе подготовленных картосхем фактической и расчётной облесённости, абсолютной величины  $\tau$  Манна–Кендалла и углового коэффициента линейного тренда. Картосхемы рассчитаны методом пространственного интерполирования каждого показателя с использованием радиальных базисных функций с одинаковыми начальными параметрами.

## Результаты и их обсуждение

Древесная растительность на постагрогенных землях Среднерусской лесостепи (примеры на рис. 1, см. с. 209) представлена в большинстве случаев лиственными породами. На угодьях часто одновременно присутствуют различные виды, к которым относятся яблоня, груша, вяз, берёза и др. В районах распространения сосновых лесов на залежных землях формируются хвойные насаждения из сосны обыкновенной.

Для одновозрастных залежных земель с древесной растительностью из лиственных пород абсолютная величина  $\tau$  Манна–Кендалла характеризуется сильной статистически значимой связью с величиной проективного покрытия древесной растительностью (облесённости). Коэффициент корреляции Спирмена между ней и абсолютной величиной  $\tau$  составил 0,68. Этот же коэффициент достиг 0,71 для углового коэффициента линейного тренда вегетационного индекса. В обоих случаях показатели статистически значимы на уровне 0,05. Зависимость между величиной прироста лесистости залежей и показателями многолетней динамики вегетационного индекса аппроксимируется логит-моделью, т.е. функцией вида  $y = A + B \log(x/(1-x))$  (рис. 2, см. с. 209), которая с достаточно высокой объяснительной способностью описывает изменение параметров многолетней динамики NDVI от величины облесённости земель.

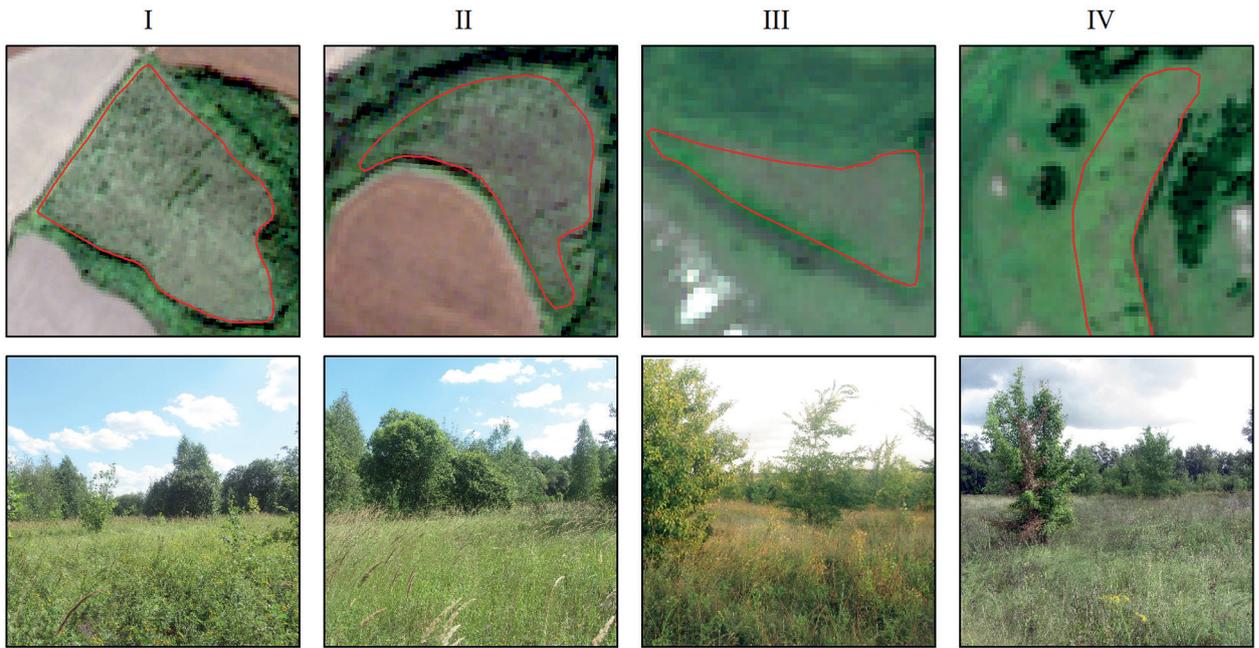


Рис. 1. Примеры постагрогенных земель (I–IV) Среднерусской лесостепи на снимках Sentinel-2 (синтез каналов Red-Green-Blue) и на местности

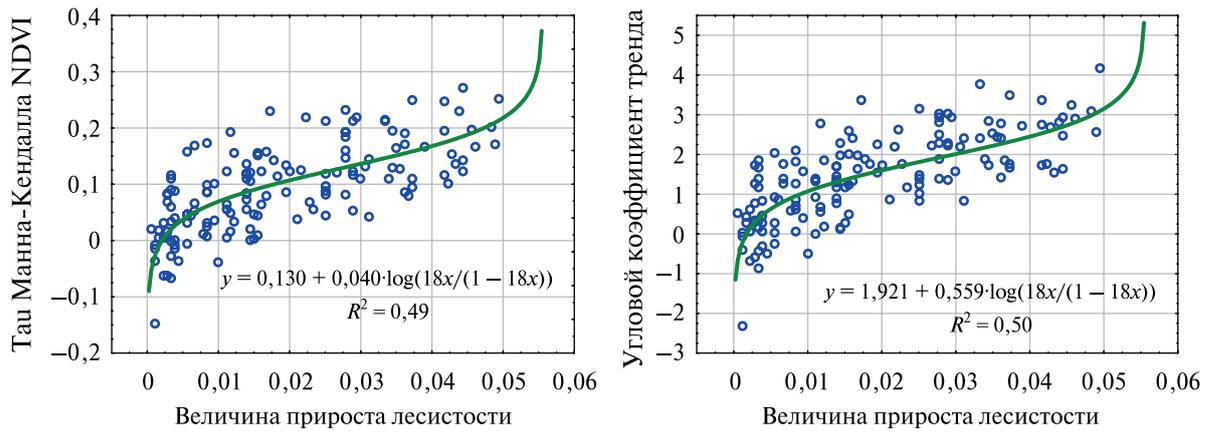


Рис. 2. Зависимости параметров многолетней динамики вегетационного индекса от среднегодовой величины прироста лесистости постагрогенных земель с лиственными породами деревьев

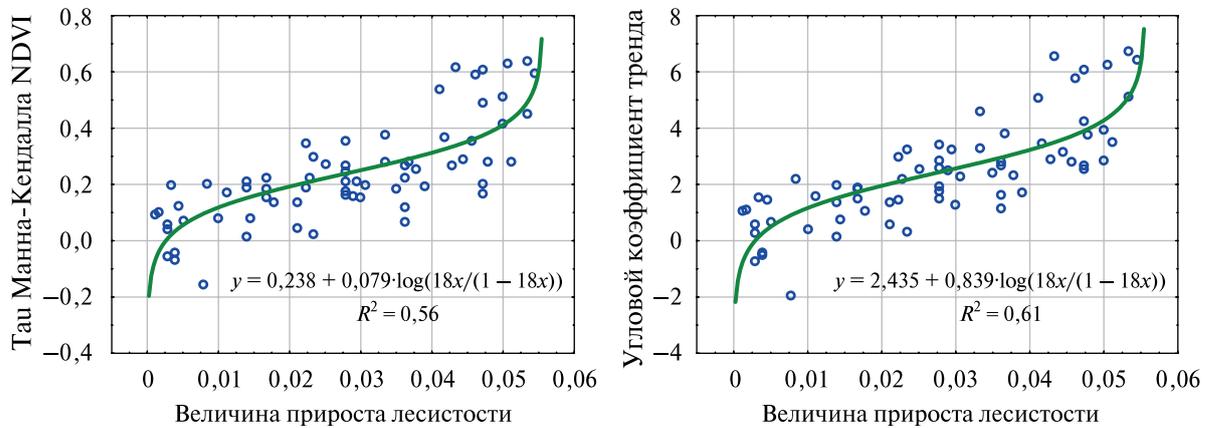


Рис. 3. Зависимости параметров многолетней динамики вегетационного индекса от среднегодовой величины прироста лесистости, постагрогенных земель с хвойными породами деревьев

Для постагрогенных земель с древесной растительностью из хвойных пород связь прироста лесистости и показателей многолетней динамики вегетационного индекса выражена сильнее. Коэффициент корреляции Спирмена между  $\tau$  Манна–Кендалла и среднегодовой величиной прироста лесистости составил для этого типа угодий 0,75 и 0,82 — между  $\tau$  и угловым коэффициентом линейного тренда NDVI. Зависимость между приростом лесистости залежных земель и параметрами многолетней динамики вегетационного индекса также аппроксимируется логит-функцией (рис. 3, см. с. 209).

Сопоставляя графики на рис. 2 и 3, достаточно хорошо видно, что и абсолютная величина  $\tau$ , и угловой коэффициент линейного тренда для залежей с хвойными породами достигают более высоких значений, чем для залежных земель с лиственными породами, что выступает показателем их более высокой скорости облесения.

Наряду с описанными показателями многолетней динамики NDVI скорость восстановления древесной растительности на постагрогенных землях может быть выражена через первую производную функции вегетационного индекса по времени, прошедшему от начала восстановительных сукцессий. Основанием для реализации такого подхода является наличие сильной связи между величиной покрытия древесной растительностью и значениями NDVI, особенно периода августа. Использование соответствующего подхода позволило формализовать различия в скорости восстановления лесного покрова на залежных землях с древесной растительностью из лиственных ( $NDVI_1$ ), хвойных пород ( $NDVI_2$ ), смешанного состава ( $NDVI_3$ ). Одновременно появляется возможность сравнения многолетней динамики NDVI в условиях развития восстановительных сукцессий древесной растительности с динамикой индекса залежей, на которых аналогичные процессы не получили развитие ( $NDVI_4$ ). Зависимость, характеризующая многолетние изменения вегетационного индекса от времени, описывается логарифмической кривой для разных типов залежных земель и формализуется набором функций (1)–(4). После их дифференцирования коэффициенты в правой части выступают показателями относительных различий в скорости естественного облесения в конкретный год от начала восстановительных сукцессий:

$$\frac{dNDVI_1}{dx} = (0,558 + 0,070 \log_{10}(x))' \Rightarrow \frac{dNDVI_1}{dx} = \frac{0,070}{x \cdot \ln 10}, \quad (1)$$

$$\frac{dNDVI_2}{dx} = (0,513 + 0,099 \log_{10}(x))' \Rightarrow \frac{dNDVI_2}{dx} = \frac{0,099}{x \cdot \ln 10}, \quad (2)$$

$$\frac{dNDVI_3}{dx} = (0,552 + 0,078 \log_{10}(x))' \Rightarrow \frac{dNDVI_3}{dx} = \frac{0,078}{x \cdot \ln 10}, \quad (3)$$

$$\frac{dNDVI_4}{dx} = (0,549 + 0,016 \log_{10}(x))' \Rightarrow \frac{dNDVI_4}{dx} = \frac{0,016}{x \cdot \ln 10}, \quad (4)$$

где  $x$  — число лет, прошедших от начала восстановительных сукцессий.

Представленные уравнения показывают снижение скорости облесения постагрогенных земель в ряду залежей «с хвойными породами — со смешанным составом — с лиственными породами». Этот вывод подтверждается сопоставлением полученных данных со сведениями о фактической облесённости постагрогенных земель Среднерусской лесостепи, имеющих одинаковое время восстановительных сукцессий. Согласно им (Терехин, 2022а) по прошествии двадцатилетнего периода восстановления величина лесистости в обозначенном ряду залежей снижается сначала от 0,48 до 0,41, а затем до 0,34, что отражает различия между типами постагрогенных земель, полученные на основе анализа многолетней динамики вегетационного индекса. Таким образом, в условиях региона наиболее высока скорость облесения залежей с хвойными породами. Далее следуют залежи со смешанной древесной растительностью и затем — с лиственными породами. Для залежей без древесной растительности ( $NDVI_4$ ) коэффициент в числителе функции более чем в четыре раза меньше, чем для залежей с развитием процессов формирования древесной растительности.

Показатели многолетней динамики вегетационного индекса, таким образом, могут быть положены в основу анализа пространственных различий в скорости естественного облесения постагрогенных земель. Ключевым условием их применения при исследовании территориальных различий в облесённости залежей выступает использование земель только с одной группой древесной растительности — лиственной, хвойной или смешанной. Величина облесённости также может быть оценена на основе непосредственной зависимости NDVI от проективного покрытия залежей древесной растительностью. Для оценки в этом случае могут быть применены показатели индекса середины августа. Значения лесистости рассчитываются на основе логистической кривой, имеющей вид  $y = 1 / (1 + \exp(kx + b))$ , где  $y$  — величина покрытия залежей древесной растительностью;  $x$  — показатели NDVI августа, вычисляемые на основе данных MOD13Q1 (умноженные на 10 000). Параметры  $k$  и  $b$  подобраны эмпирически. Параметр  $k$  в настоящем случае принимает значение  $-17,42$ , параметр  $b = 13,362$ .

Использование величины tau Манна–Кендалла или углового коэффициента линейного тренда NDVI в качестве показателей облесённости залежных земель позволяет осуществлять оценку её территориальных относительных различий с учётом, что оба показателя находятся в прямой зависимости от лесистости постагрогенных земель. Оба показателя вычисляются на основе рядов вегетационного индекса, сформированных из его значений периода вегетации (начало апреля–конец октября). Величины первой производной вегетационного индекса от времени могут быть использованы для анализа пространственных различий облесённости залежных земель в конкретный год от начала восстановительных сукцессий.

Применение всех описанных показателей имеет ряд условий, которые в первую очередь связаны с характеристиками информационных продуктов MOD13Q1, на основе которых осуществляется их расчёт. Для оценок пространственных различий в скорости облесения залежных земель в этой связи могут быть использованы угодья с площадью от 20–30 га. При этом пространственные выборки необходимо формировать отдельно для залежных земель с лиственными, хвойными породами или со смешанным породным составом. В Среднерусской лесостепи, несмотря на наличие залежных земель с разными группами древесных пород, пространственная репрезентативность характерна только для залежей с древесной растительностью из лиственных пород деревьев. Постагрогенные земли этого типа были выбраны для сопоставления фактических территориальных различий в облесённости постагрогенных земель и различий, оценённых на основе описанных показателей.

Пространственное распределение фактической облесённости постагрогенных земель (рис. 4а, см. с. 212) и её распределение, полученное на основе вегетационного индекса по данным MOD13Q1 (см. рис. 4б), показали практически аналогичные территориальные закономерности.

Расчётная облесённость постагрогенных земель (см. рис. 4б), значения которой получены на основе августовских показателей NDVI, отражает аналогичные пространственные различия с тем отличием, что в категории 0,2–0,4 территориальное распространение залежных земель показано выше, чем для фактических значений. Пространственное распределение абсолютной величины tau Манна–Кендалла NDVI и углового коэффициента его линейного тренда (см. рис. 4в, г) характеризует относительные различия в скорости естественного облесения постагрогенных земель в регионе. В районах слабого развития процессов формирования древесной растительности на постагрогенных землях эти показатели могут принимать значения, расположенные вблизи нуля или ниже него.

Наличие общих пространственных трендов в лесистости постагрогенных земель и показателей многолетней динамики вегетационного индекса достаточно наглядно проявляется при их трёхмерной визуализации (рис. 5, см. с. 212), когда местоположение залежных земель на территории региона отражено в горизонтальной плоскости, а по вертикальной оси отображён анализируемый показатель. Наиболее высокие значения лесистости залежей, приуроченные к северо-западной и северо-восточной части региона (подзона северной лесостепи), и её наиболее низкие значения на юге определяют территориальные изменения как при движении с запада на восток, так и с севера на юг.

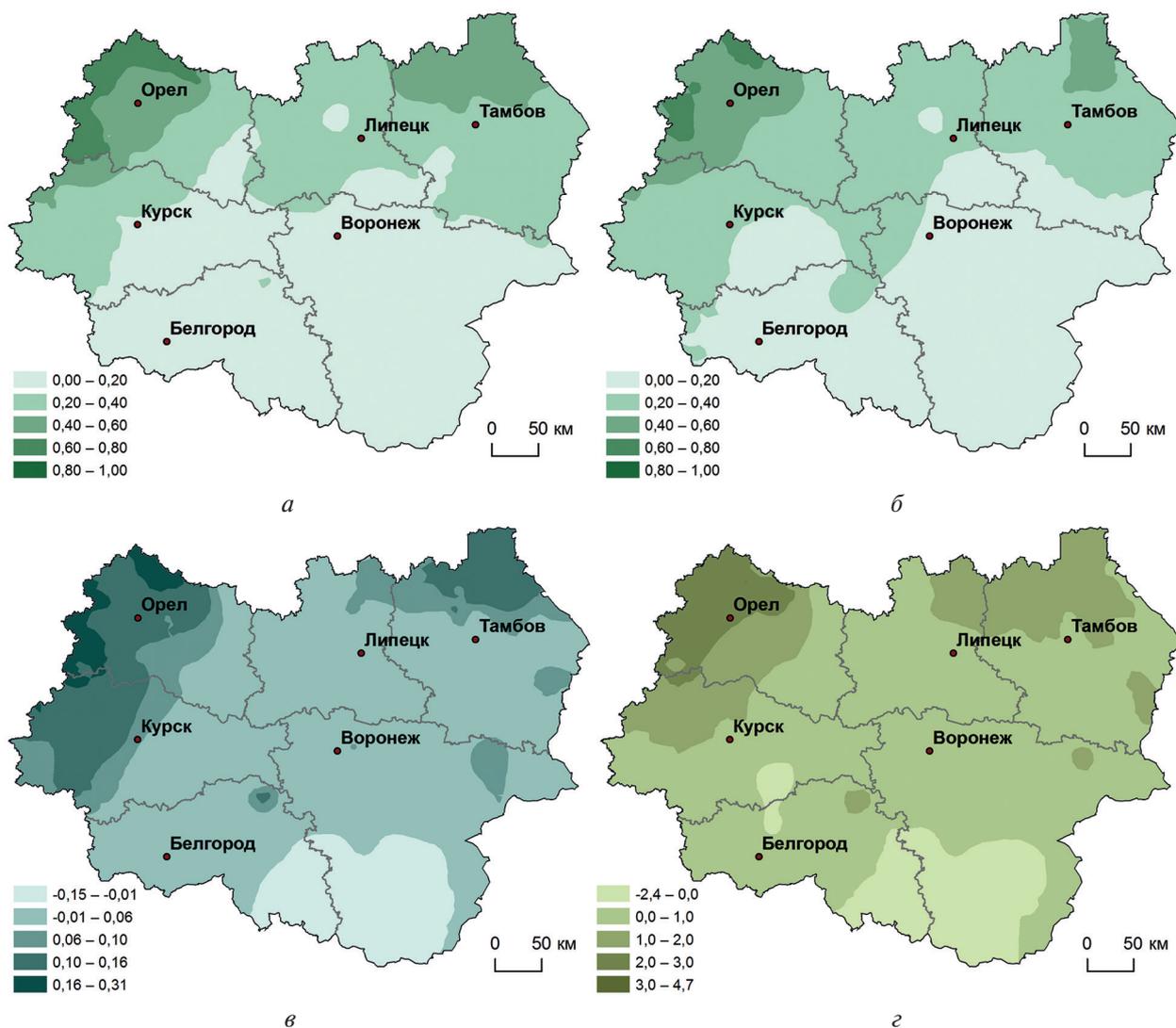


Рис. 4. Территориальные различия облесённости одновозрастных постагрогенных земель (а) и их облесённости, рассчитанной на основе значений NDVI августа (б). Пространственные различия tau Манна – Кендалла (в) и углового коэффициента линейного тренда NDVI (г)

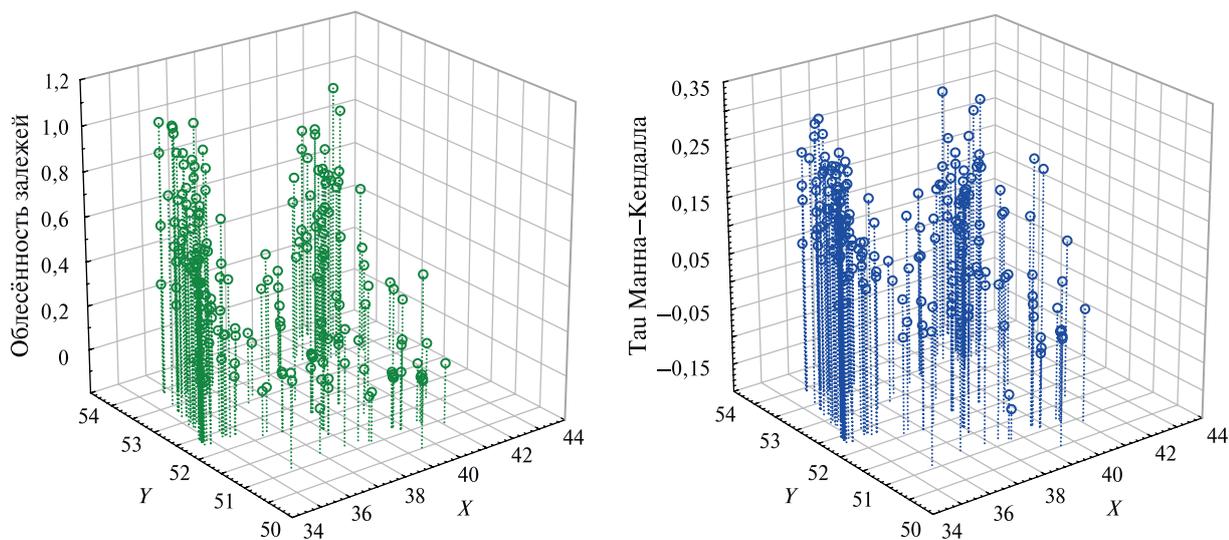


Рис. 5. Трёхмерная визуализация пространственных различий в облесённости одновозрастных залежных земель в Среднерусской лесостепи и величине tau Манна – Кендалла многолетнего ряда вегетационного индекса

Аналогичная закономерность наблюдается для абсолютной величины  $\tau$  Манна–Кендалла, которая проявляется на трёхмерном графике её значений. Местоположение постагрогенных земель на территории региона определяется основаниями вертикальных линий на горизонтальной плоскости в пределах графиков. Длина вертикальных линий на них характеризует величину лесистости либо абсолютное значение  $\tau$ .

Пространственные различия углового коэффициента линейного тренда NDVI, рассчитанного так же, как и абсолютная величина  $\tau$  на основе двадцатилетних рядов индекса, сформированных из значений периодов вегетации, аналогичны территориальным трендам лесистости одновозрастных постагрогенных земель (рис. 6). На обоих графиках достаточно хорошо проявляется снижение показателей от северо-западной и северо-восточной части региона к южной, отражающее пространственные различия в скорости естественного облесения постагрогенных земель. Вместе с тем оно характеризует и высокую пространственную вариацию скорости постагрогенного восстановления древесной растительности.

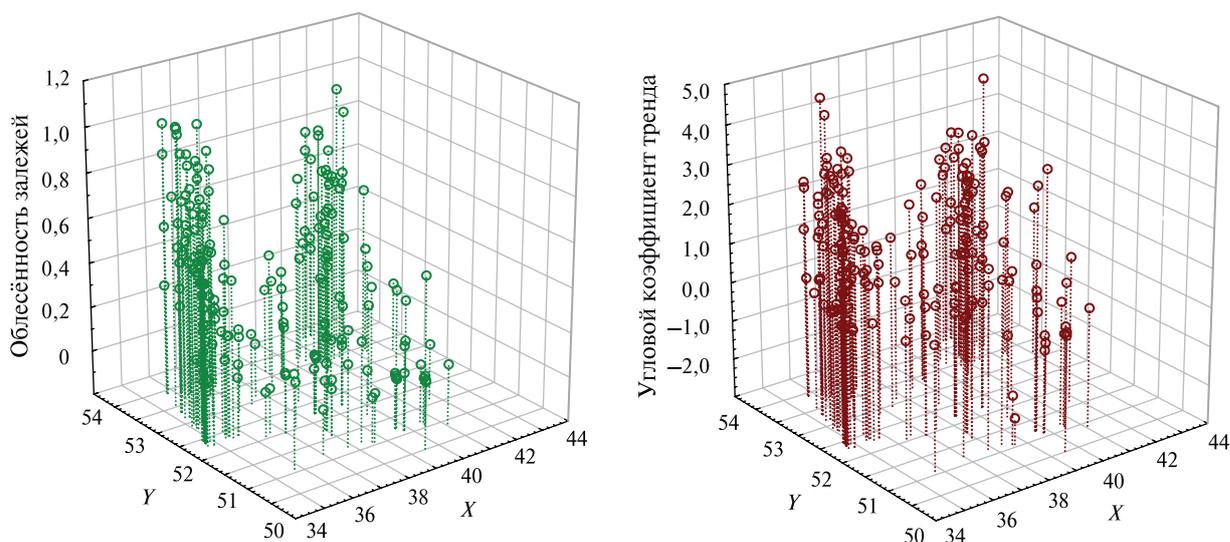


Рис. 6. Трёхмерная визуализация пространственных различий в облесённости одновозрастных залежных земель в Среднерусской лесостепи и величине углового коэффициента линейного тренда NDVI

Параметры многолетних рядов вегетационного индекса, таким образом, показали достаточно высокую эффективность для оценки различий в облесённости постагрогенных земель, обусловленных разной скоростью восстановительных сукцессий. При возможности формирования выборки объектов с аналогичной древесной растительностью (лиственная или хвойная) параметры многолетних рядов могут быть применены для оценок пространственных различий в скорости облесения залежных земель и на более обширных территориях. При этом основным ограничением предложенных показателей выступает минимальный размер анализируемых объектов.

## Выводы

Параметры многолетней динамики вегетационного индекса, к которым относятся  $\tau$  Манна–Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда, находятся в зависимости от скорости облесения постагрогенных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, но при этом характеризуются разной силой связи с облесённостью залежей с лиственными и хвойными породами. Различия в скорости облесения залежей с лиственными, хвойными породами и смешанным составом формализуются через первую производную функции вегетационного индекса по времени, прошедшему от начала восстановительных сукцессий.

Она характеризует снижение скорости формирования древесной растительности от залежей с хвойными породами к залежам со смешанным составом, а затем к залежам с лиственными породами. Она же показывает отличия постагрогенных земель с древесной растительностью и без неё. Рассмотренные параметры многолетней динамики вегетационного индекса одновременно выступают показателями пространственных различий в скорости естественного облесения залежных земель.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2023-0011.

## Литература

1. Баишева Э.З., Широких П.С. К биофлоре зарастающих лесом сельхозугодий республики Башкортостан // Изв. Уфимского науч. центра РАН. 2017. № 3–1. С. 17–21.
2. Беспалова Е.С., Саблина О.М. Оценка состояния лесополос и эрозионного рельефа в бассейне реки Везелка (Белгородская область) // Науч. вед. Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 3. С. 223–231. DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-3-223-231.
3. Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В. Дубравы лесостепи. Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. акад., 2013. 247 с.
4. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теорет. и приклад. экология. 2022. № 3. С. 82–89. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-082-089.
5. Дроздов К.А. Элементарные ландшафты среднерусской лесостепи. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 176 с.
6. Камышев Н.С., Хмелев К.Ф. Растительный покров Воронежской области и его охрана. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1976. 181 с.
7. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В. и др. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X.
8. Карпин В.А., Петров Н.В., Турунен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сибирский лесной журн. 2017. № 6. С. 120–129.
9. Лисецкий Ф.Н. Воспроизводство почв в степных экосистемах разного возраста // Сибирский эколог. журн. 2012. Т. 19. № 6. С. 819–829.
10. Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Дистанционный высокоточный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 3. С. 1–12. DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12.
11. Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 429 с.
12. Соловиченко В.Д., Тютюнов С.И., Уваров Г.И. Воспроизводство плодородия почв и рост продуктивности сельскохозяйственных культур Центрально-Чернозёмного региона. Белгород: Отчий край, 2012. 256 с.
13. Телеснина В.М. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демулационной сукцессии в южной тайге // Лесоведение. 2015. № 4. С. 293–306.
14. Терехин Э.А. (2022а) Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 4. С. 594–604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
15. Терехин Э.А. (2022б) Изменение внутризональных различий в естественном растительном покрове ландшафтов лесостепи в конце XX–начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 179–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192.
16. Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Сохранение и оптимизация агроландшафтов Центрального Черноземья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 1. С. 103–109. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.
17. Anees S.A., Mehmood K., Rehman A. et al. Unveiling fractional vegetation cover dynamics: A spatiotemporal analysis using MODIS NDVI and machine learning // Environmental and Sustainability Indicators. 2024. V. 24. Article 100485. DOI: 10.1016/j.indic.2024.100485.
18. Bera D., Das Chatterjee N., Bera S. et al. Comparative performance of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI data in canopy cover prediction using Random Forest model: Comparing model performance and

- tuning parameters // *Advances in Space Research*. 2023. V. 71. No. 11. P. 4691–4709. DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.027.
19. Gyawali A., Adhikari H., Aalto M., Ranta T. From simple linear regression to machine learning methods: Canopy cover modelling of a young forest using planet data // *Ecological Informatics*. 2024. V. 82. Article 102706. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102706.
  20. Heck E., de Beurs K. M., Owsley B. C., Henebry G. M. Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. V. 156. P. 121–134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011.
  21. Justice C. O., Townshend J. R. G., Vermote E. F. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. No. 1–2. P. 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
  22. Khorchani M., Gaspar L., Nadal-Romero E. et al. Effects of cropland abandonment and afforestation on soil redistribution in a small Mediterranean mountain catchment // *Intern. Soil and Water Conservation Research*. 2023. V. 11. No. 2. P. 339–352. DOI: 10.1016/j.iswcr.2022.10.001.
  23. Nadal-Romero E., Llana M., Cortijos-López M., Lasanta T. Afforestation after land abandonment as a nature-based solution in Mediterranean mid-mountain areas: Implications and research gaps // *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 2023. V. 34. Article 100481. DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100481.
  24. Seguíni L., Vrieling A., Meroni M., Nelson A. Annual winter crop distribution from MODIS NDVI time-series to improve yield forecasts for Europe // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. V. 130. Article 103898. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103898.
  25. Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S. Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010 // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 31. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.006.
  26. Zurqani H. A. High-resolution forest canopy cover estimation in ecodiverse landscape using machine learning and Google Earth Engine: Validity and reliability assessment // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. V. 33. Article 101095. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101095.

## Parameters of long-term vegetation index dynamics as indicators of afforestation on postagrogenic lands

E. A. Terekhin

*Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia*  
*E-mail: terekhin@bsuedu.ru*

Natural afforestation processes are present on many postagrogenic lands of the Central Russia forest-steppe. The article describes an approach and indicators for assessing the restoration of forest vegetation on abandoned agricultural lands on the basis of parameters of long-term vegetation index dynamics. The study objects are postagrogenic lands with the same period of restoration successions. They are located on the Central Chernozem Region. The parameters of vegetation index time series, which include the Mann–Kendall tau and the linear trend slope, demonstrate different strengths of connection with the rate of natural afforestation of postagrogenic lands with deciduous and coniferous species. Differences in the rate of afforestation of abandoned lands with deciduous, coniferous and mixed composition can be expressed through the first derivative of the vegetation index function over time. The first derivative simultaneously characterizes the differences between postagrogenic lands with afforestation processes and fallow lands without them. The estimated parameters of the vegetation index long-term dynamics reflect the actual spatial, relative differences in the natural afforestation rate of postagrogenic lands in the region. They showed key spatial trends in the intensity of forest vegetation restoration on abandoned agricultural lands.

**Keywords:** postagrogenic lands, time series, MODIS, NDVI, natural afforestation

Accepted: 07.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-205-217

## References

1. Baisheva E. Z., Shirokikh P. S., On the bryophyte flora of abandoned agricultural lands overgrown with forest in the Republic of Bashkortostan, *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, No. 3–1, pp. 17–21 (in Russian).
2. Bespalova E. S., Sablina O. M., Assessment of shelterbelts and erosion relief in the river basin of Vezelka (Belgorod region), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2019, V. 43, No. 3, pp. 223–231 (in Russian).
3. Bugaev V. A., Musievskii A. L., Tsaralunga V. V., *Dubravyy lesostepi* (Oak forests of the forest-steppe), Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2013, 247 p. (in Russian).
4. Domnina E. A., Adamovich T. A., Timonov A. S., Ashikhmina T. Ya., Monitoring of overgrowing of abandoned agricultural lands using high-resolution satellite images, *Teoreticheskaya i prikladnaya ehkologiya*, 2022, No. 3, pp. 82–89 (in Russian), DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-082-089.
5. Drozdov K. A., *Elementarnyye landshafty srednerusskoi lesostepi* (Elementary landscapes of the Central Russian forest-steppe), Voronezh: Izd. VGU, 1991, 176 p. (in Russian).
6. Kamyshev N. S., Khmelev K. F., *Rastitel'nyi pokrov Voronezhskoi oblasti i ego okhrana* (Vegetation cover of the Voronezh region and its protection), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1976, 181 p. (in Russian).
7. Karelin D. V., Lyuri D. I., Goryachkin S. V. et al., Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the chernozems forest-steppe, *Eurasian Soil Science*, 2015, V. 48, No. 11, pp. 1229–1241, DOI: 10.1134/S1064229315110095.
8. Karpin V. A., Petrov N. V., Tuyunen A. V., Regeneration of forest phytocoenoses after various agricultural land use practices in the conditions of middle taiga subzone, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 6, pp. 120–129 (in Russian).
9. Lisetskii F. N., Soil reproduction in steppe ecosystems of different ages, *Contemporary Problems of Ecology*, 2012, V. 5, No. 6, pp. 580–588, DOI: 10.1134/S1995425512060108.
10. Medvedev A. A., Telnova N. O., Kudikov A. V., Highly detailed remote sensing monitoring of tree overgrowth on abandoned agricultural lands, *Voprosy lesnoi nauki*, 2019, V. 2, No. 3, pp. 1–12 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12.
11. *Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR* (Vegetation of the European part of the USSR). Leningrad: Nauka, 1980, 429 p. (in Russian).
12. Solovichenko V. D., Tyutyunov S. I., Uvarov G. I., *Vosproizvodstvo plodorodiya pochv i rost produktivnosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur Tsentral'no-Chernozemnogo regiona* (Reproduction of soil fertility and growth of agricultural crop productivity in the Central Chernozem Region), Belgorod: Otchii krai, 2012, 256 p.
13. Telesnina V. M., Postagrogenic dynamics of vegetation and soil properties during demutational succession in south taiga, *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 293–306 (in Russian).
14. Terekhin E. A. (2022a), Reforestation on abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 4, pp. 594–604 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622040112.
15. Terekhin E. A. (2022b), Changes in intrazonal differences in the natural vegetation cover of forest-steppe landscapes in the late 20<sup>th</sup> and early 21<sup>st</sup> century, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 1, pp. 179–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192.
16. Trofimov I. A., Trofimova L. S., Yakovleva E. P., Preservation and optimization of agrolandscapes of the Central Chernozem zone, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2017, No. 1, pp. 103–109 (in Russian), DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.
17. Anees S. A., Mehmood K., Rehman A. et al., Unveiling fractional vegetation cover dynamics: A spatio-temporal analysis using MODIS NDVI and machine learning, *Environmental and Sustainability Indicators*, 2024, V. 24, Article 100485, DOI: 10.1016/j.indic.2024.100485.
18. Bera D., Das Chatterjee N., Bera S. et al., Comparative performance of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI data in canopy cover prediction using Random Forest model: Comparing model performance and tuning parameters, *Advances in Space Research*, 2023, V. 71, No. 11, pp. 4691–4709, DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.027.
19. Gyawali A., Adhikari H., Aalto M., Ranta T., From simple linear regression to machine learning methods: Canopy cover modelling of a young forest using planet data, *Ecological Informatics*, 2024, V. 82, Article 102706, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102706.
20. Heck E., de Beurs K. M., Owsley B. C., Henebry G. M., Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, V. 156, pp. 121–134, DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2019.07.011.

21. Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F. et al., An overview of MODIS Land data processing and product status, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83, No. 1–2, pp. 3–15, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
22. Khorchani M., Gaspar L., Nadal-Romero E. et al., Effects of cropland abandonment and afforestation on soil redistribution in a small Mediterranean mountain catchment, *Intern. Soil and Water Conservation Research*, 2023, V. 11, No. 2, pp. 339–352, DOI: 10.1016/j.iswcr.2022.10.001.
23. Nadal-Romero E., Llena M., Cortijos-López M., Lasanta T., Afforestation after land abandonment as a nature-based solution in Mediterranean mid-mountain areas: Implications and research gaps, *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2023, V. 34, Article 100481, DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100481.
24. Seguini L., Vrieling A., Meroni M., Nelson A., Annual winter crop distribution from MODIS NDVI time-series to improve yield forecasts for Europe, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, V. 130, Article 103898, DOI: 10.1016/j.jag.2024.103898.
25. Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S., Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, V. 31, pp. 25–36, DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.006.
26. Zurqani H.A., High-resolution forest canopy cover estimation in ecodiverse landscape using machine learning and Google Earth Engine: Validity and reliability assessment, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, V. 33, Article 101095, DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101095.