

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 528.8

ВНУТРИЗОНАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ СКОРОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЛЯХ СРЕДНЕРУССКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2025 г. Э. А. Терехин*

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

**e-mail: terekhin@bsuedu.ru*

Поступила в редакцию 29.09.2022 г.

После доработки 11.07.2024 г.

Принята к публикации 28.12.2024 г.

Рассмотрены особенности изменений лесистости в первые два десятилетия XXI в. для постагрогенных земель в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. Исследование проведено на территории Центрального Черноземья и Орловской области. Оценку скорости формирования древесной растительности предложено проводить на основе первой производной вегетационного индекса NDVI, либо расчетной величины лесистости по времени, прошедшему с прекращения аграрного использования земель. Установлено, что в первые два десятилетия XXI в. величина прироста лесистости одновозрастных залежей существенно различалась между подзонами лесостепи в пределах региона. В северной лесостепи в анализируемый период величина лесистости оставленных аграрных земель изменялась по зависимости, близкой к логарифмической кривой. В подзоне типичной лесостепи лесистость оставленных аграрных земель изменялась по аналогичной зависимости, но с меньшей скоростью. В подзоне южной лесостепи годовой прирост лесистости залежей был минимален. Скорость годового прироста лесистости постагрогенных земель, выраженная через первую производную вегетационного индекса по времени, в подзоне северной лесостепи более чем в 1.7 раз превышала аналогичный показатель в подзоне типичной лесостепи и в 5–6 раз аналогичную величину в подзоне южной лесостепи. Соотношение средних расчетных значений лесистости залежей в подзонах лесостепи в конце второго десятилетия XXI в. оказалось примерно аналогично соотношению их фактических величин. Установленные особенности выступают показателями увеличения внутризональных различий лесистости залежей лесостепи. Вместе с тем различная скорость ее прироста приводит к повышению контрастности внешнего облика ландшафтов лесостепи в ее субмеридиональных границах.

Ключевые слова: залежные земли, лесистость, лесостепная зона, внутризональные различия, дистанционное зондирование, Среднерусская лесостепь

DOI: 10.31857/S2587556625020089

ВВЕДЕНИЕ

Динамика лесистости выступает одним из ведущих факторов, определяющих внешний облик ландшафтов. Ее изменения могут обуславливаться климатическими причинами (Замолотчиков, Краев, 2016; Сергиенко, 2015). Одновременно они могут определяться особенностями использования территории (Лобанов и др., 2017). Формирование древесной растительности в условиях прекращения аграрного использования относится к наиболее выраженным процессам, протекающим на залежных землях европейской территории России в начале XXI в. (Белоусова, Чашин, 2018; Голубева, Наквасина, 2015; Нико-

нов, Смирнов, 2013). В Среднерусской лесостепи этот процесс наблюдается на более 90% бывших пахотных угодий (Терехин, 2022). В настоящем исследовании под залежами понимаются оставленные аграрные земли, т.е. выведенные из использования, на которых после прекращения распахки развиваются восстановительные сукцессии.

Сукцессии, протекающие на постагрогенных землях, приводят к восстановлению почвенного плодородия и повышению биоразнообразия (Люри и др., 2010; Тишков, 2012). Исследование изменений растительного покрова залежей вследствие прекращения аграрного использо-

вания восстановительных сукцессий выступает важнейшей задачей, решение которой необходимо для описания различных процессов, протекающих в ландшафтах (Левыкин и др., 2020; Karelin et al., 2015; Kurganova et al., 2021). В этой связи крайне актуальной задачей становится развитие подходов к оценке процессов формирования древесной растительности на постагрогенных землях и их анализу на внутризональном уровне.

Исследование пространственно-временных особенностей облесенности залежных земель длительное время было затруднено из-за сложности сбора фактической информации, определяющейся во многом спецификой залежей как анализируемых объектов. Непрерывность процесса формирования древесной растительности обуславливает необходимость регулярных наблюдений. Накопление рядов регулярно получаемых спутниковых данных, в первую очередь с сенсора *MODIS* (Justice et al., 2002), а также снимков сверхвысокого пространственного разрешения к концу второго десятилетия XXI в. во многом предоставило возможность решения этой проблемы.

Информационные продукты, содержащие значения спектральных характеристик, получаемые на основе предварительно обработанных спутниковых данных (Барталев и др., 2016; Neck et al., 2019; Testa et al., 2018), открывают возможности пространственно-временного анализа состояния растительного покрова, которые, в том числе, могут быть применены при исследованиях сукцессий на постагрогенных землях. Накопление многолетних рядов спутниковых изображений с систем, фиксирующих спектрально-отражательные свойства земной поверхности с высокой частотой, позволило проводить количественный анализ изменений для различных характеристик экосистем, таких как продуктивность и надземная фитомасса (Золотокрылин и др., 2013; Лавриненко, 2013; Тулохонов и др., 2014; Zhang et al., 2016). Исследования показали возможность оценки тенденций динамики растительного покрова на уровне отдельных природных зон (Варламова, 2012; Елсаков, 2017; Короткова, Зуев, 2021). Вместе с тем проблема выявления и анализа различий в изменениях растительности на внутризональном уровне во многом остается открытой. Особенно это касается восстановительных сукцессий на постагрогенных землях.

Сведения о динамике лесистости залежей могут быть получены на основе их отражательных свойств, измеренным по архивным спутниковым данным. Теоретической основой таких исследований выступает наличие зависимостей между величиной проективного покрытия древесной

растительностью и коэффициентами спектральной яркости (КСЯ), либо спектральными вегетационными индексами (Терехин, 2019, 2021). Наиболее длительные по протяженности многолетние ряды измерений спектрально-отражательных характеристик могут быть получены с использованием информационных продуктов, создаваемых на основе снимков с прибора *MODIS* (Huete et al., 2002). Архивы спутниковых данных, собранных с него, позволяют анализировать спектрально-отражательные свойства отдельных угодий, начиная с 2000 г. (Pan et al., 2012; Zhang et al., 2016).

Лесостепная зона на территории Центрально-Черноземного района и Орловской области характеризуется контрастностью природных условий (Мильков, 1977; Федотов, 2008), проявляющейся в ее субмеридиональных границах от лесной зоны до зоны степи. В пределах лесостепи на территории Центрального Черноземья и Орловской области выделяют подзоны северной, типичной и южной лесостепи (Физико-географическое ..., 1961). Для ландшафтов региона характерна высокая аграрная преобразованность, вследствие которой основная часть территории занята сельскохозяйственными угодьями, в особенности, пашней (Косолапов и др., 2015; Трофимов и др., 2017). Оставленные аграрные земли, получившие достаточно значительное распространение в конце XX в., дают возможность исследования на их основе территориальных и внутризональных различий облесенности залежных земель.

Цель исследования — оценка скорости изменения лесистости (облесенности) одновозрастных залежных земель в подзонах северной, типичной и южной лесостепи на территории Центрального Черноземья, включая Орловскую область с использованием спектрально-отражательных свойств угодий, измеряемых на основе регулярно получаемых спутниковых данных. Под лесистостью подразумевается величина проективного покрытия залежных земель древесной растительностью. Задачи исследования включали анализ многолетней динамики отражательных характеристик залежей и сравнение роста их лесистости в физико-географических подзонах. Временной охват исследования включал интервал первых двух десятилетий XXI в.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка динамики лесистости постагрогенных земель проведена на примере наиболее широко распространенного в регионе типа залежных земель — с лиственными породами. В анализ также были включены залежи без древесной рас-

тельности, представленные на юге региона. Залежи с хвойными и смешанными насаждениями не включались в исследование. Обусловлено это тем, что спектрально-отражательные характеристики лиственных и хвойных пород деревьев отличны по абсолютным значениям и их анализ в одной выборке в контексте задач исследования мог бы привести к некорректным результатам. Определение древесных пород на залежах осуществлялось методом совместного анализа снимков *Landsat 8 OLI*, синтезированных в каналах коротковолнового инфракрасного и видимого диапазонов, и снимков сверхвысокого пространственного разрешения из открытых источников.

Исследование проведено по данным, полученным с более 200 объектов, включая сведения о фактической лесистости залежей и их спектрально-отражательных характеристиках. Анализ величины прироста лесистости постагрогенных земель проведен в границах отдельных подзон согласно схеме физико-географического районирования Среднерусской лесостепи (Физико-географическое ..., 1961).

Подбор участков залежных земель осуществлялся методом визуального анализа космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с учетом следующих критериев:

- залежные земли должны были быть одного возраста (одной продолжительности восстановительной сукцессии);
- анализируемые объекты должны находиться в сходных геоморфологических условиях, вне зон повышенного увлажнения и вне пойм рек;
- исследуемые объекты должны быть без признаков антропогенных нарушений растительного покрова;
- для анализируемых объектов должен быть доступен набор разновременных, безоблачных снимков высокого пространственного разрешения, охватывающий период исследования и, позволяющий оценить состояние объекта в разные годы.

Для анализа подбирали угодья, выведенные из аграрного использования в начале 2000-х годов, и непрерывно остававшиеся в залежном состоянии до конца второго десятилетия XXI в. Подбор постагрогенных земель одинакового возраста проводился методом визуального анализа разновременных снимков *Landsat TM*, *OLI* первых двух десятилетий XXI в. Выявление залежей осуществлялось на основе отсутствия признаков распахки в течение периода вегетации, хорошо проявляющихся в вариантах синтеза видимых и инфракрасных каналов спектра.

Учет критерия, определяющего отсутствие признаков нарушенности растительного покро-

ва залежей, обеспечивался методом визуального дешифрирования разновременных снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных в период 2000–2020 гг. из веб-сервисов открытого доступа. Соответствующее пространственное разрешение (1 м) обеспечивало возможность достоверного выявления таких признаков.

Исходя из пространственного разрешения информационных продуктов (*MOD13Q1*), используемых для анализа спектрально-отражательных характеристик залежных земель, для анализа отбирали угодья с площадью не менее 20–30 га. Выявленные и изученные залежи были представлены во всех подзонах лесостепи на территории исследуемого региона (рис. 1, табл. 1). На основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения для каждого участка залежи оценена величина лесистости или покрытия древесной растительностью на конец второго десятилетия XXI в. Древесная растительность на снимках выявлялась по наличию дешифровочных признаков. К ним относятся особенности цвета (при анализе снимков в синтезе каналов видимого спектра), яркости и текстуры, характерные для участков древесной растительности возрастом до 20 лет.

Оценка спектрально-отражательных характеристик залежных земель проведена на основе информационных продуктов *MOD13Q1* (Hesk et al., 2019), включающих 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса *NDVI*, рассчитанные с использованием регулярно получаемых снимков *MODIS*, прошедших атмосферную и радиометрическую коррекцию. Это единственный тип спутниковых данных, позволяющих построить многолетние ряды вегетационного индекса *NDVI* за интервал времени, охватывающий с высокой частотой первые два десятилетия XXI в. Он дает возможность анализа особенностей их изменения внутри этого периода. Растровые модели, содержащие значения индекса, были одним из слоев в информационных продуктах *MOD13Q1*. Вычисление значений вегетационного индекса для отдельных залежных земель осуществлено методом зональной статистики, т.е. способом расчета значения спектрального показателя, усредненного в пределах векторного контура залежи.

Согласно ранее выполненным оценкам, *NDVI* залежных земель зависит от величины их лесистости (Терехин, 2021). Многолетние ряды спектрального индекса, включающие его значения периода августа, как наиболее тесно коррелирующие с величиной покрытия древесной растительности, положены в основу моделирования прироста лесистости залежных земель.

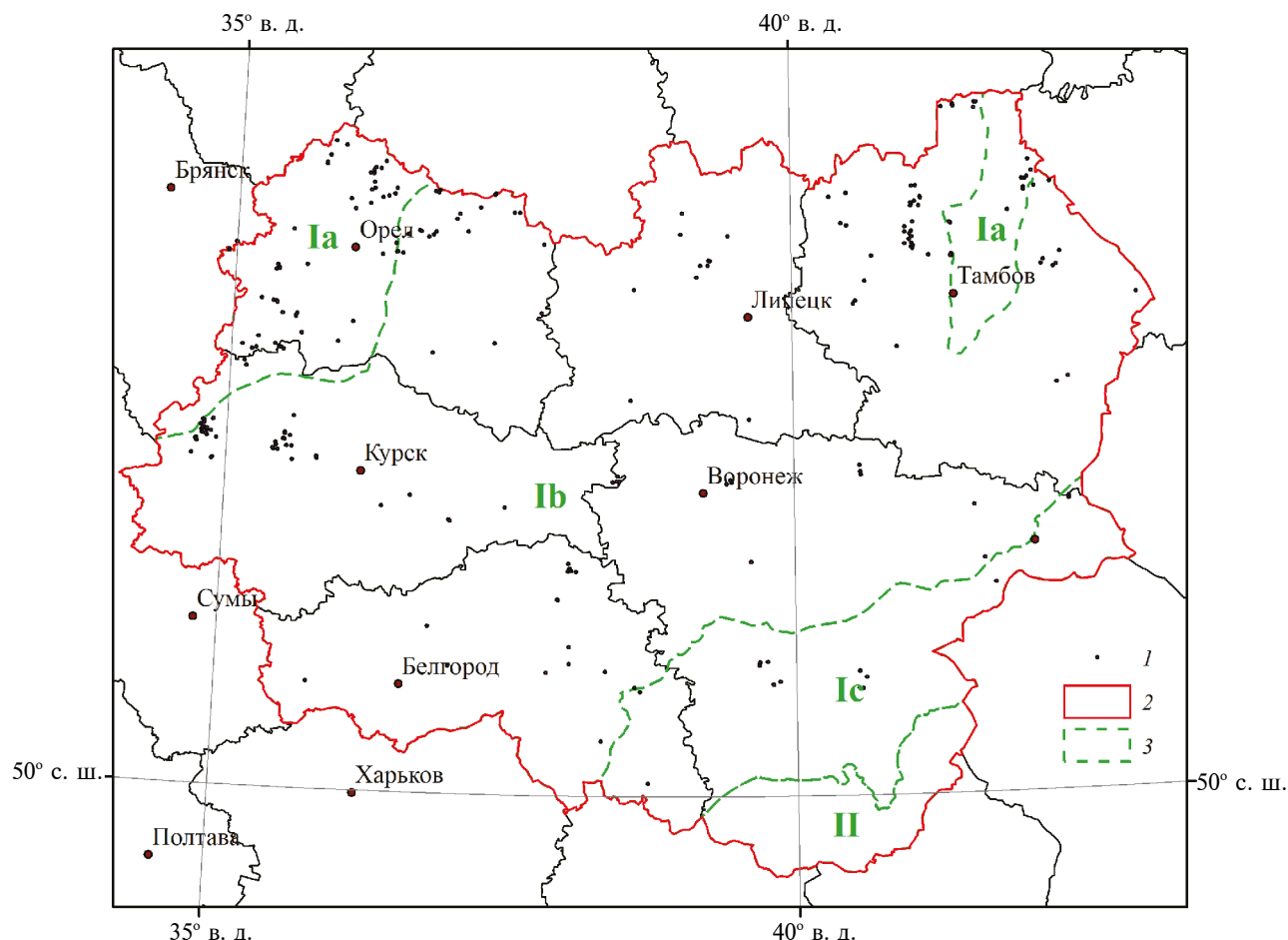


Рис. 1. Территория исследования и анализируемые залежные земли. 1 — исследуемые залежи, 2 — район исследования, 3 — границы физико-географического районирования. Подзоны лесостепи: Ia — северная, Ib — типичная, Ic — южная, II — степная зона.

Таблица 1. Характеристики изученных участков залежных земель в подзонах лесостепи на территории Центрального Черноземья и Орловской области для оценки скорости изменения лесистости вследствие постагрогенных сукцессий

Подзона лесостепи	Число изученных объектов	Площадь средняя, га	Площадь общая, га
Северная	64	58.0	3714.4
Типичная	138	70.0	9664.5
Южная	11	50.6	556.2
Всего	213	65.4	13935.1

Она оценена двумя способами: методом анализа многолетней динамики *NDVI*, рассчитанной для залежей в подзонах лесостепи, и методом оценки динамики лесистости, вычисленной на его основе. Для этой цели применена зависимость между анализируемыми показателями, рассчитанная на основе ранее установленных закономерностей (Терехин, 2021). Она представляла собой статистически значимую логистическую функцию, полученную эмпирически на основе сведений о фактической лесистости постагро-

генных земель и их спектрально-отражательных характеристиках:

$$y = \frac{1}{1 + e^{(-17.42x + 13.622)}}, \quad (1)$$

где y — оцениваемая величина лесистости постагрогенных земель, x — значения вегетационного индекса *NDVI* августа, измеряемые на основе информационных продуктов *MOD13Q1*.

Анализируемые многолетние ряды $NDVI$ представляли последовательность его значений периода августа 2000–2020 гг., усредненных на основе данных с залежей, расположенных в подзонах северной, типичной и южной лесостепи в пределах Центрального Черноземья и Орловской области.

Скорость роста годовых значений вегетационного индекса рассматривалась как его первая производная по времени, прошедшему с прекращения использования угодий и начала восстановительных сукцессий. В свою очередь, скорость роста лесистости, рассчитанной на основе спектрального индекса, также может быть оценена как ее первая производная по времени. Вычисление уравнений динамики $NDVI$ и величины прироста лесистости с последующим расчетом на их основе первых производных по времени, таким образом, было положено в основу сопоставления скорости формирования древесной растительности на залежах в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. Описанный подход к оценке проективного покрытия залежей древесной растительностью впервые применяется для исследования постагрогенных земель Среднерусской лесостепи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях северной лесостепи или близких к ним, процессы роста лесистости на постагрогенных землях протекают достаточно интенсивно и хорошо просматриваются на разновременных снимках со спутников серии *Landsat TM/OLI* (рис. 2). За период около 2-х десятилетий от начала восстановительных сукцессий происходит значительное, либо практически полное покрытие бывших пахотных угодий древесной растительностью.

Высокая интенсивность роста лесистости в подзоне северной лесостепи отражается на значениях вегетационного индекса $NDVI$, измеренных по данным MOD13Q1. Спектральный показатель находится в прямой зависимости от лесистости залежей. Зависимость между $NDVI$ и временем, прошедшим с начала восстановительных сукцессий, в подзоне северной лесостепи описывается логарифмической кривой (рис. 3). Этой же зависимостью для постагрогенных земель описывается изменение величины проективного покрытия древесной растительностью, оцененной на основе $NDVI$. Расчетная величина покрытия угодий древесной

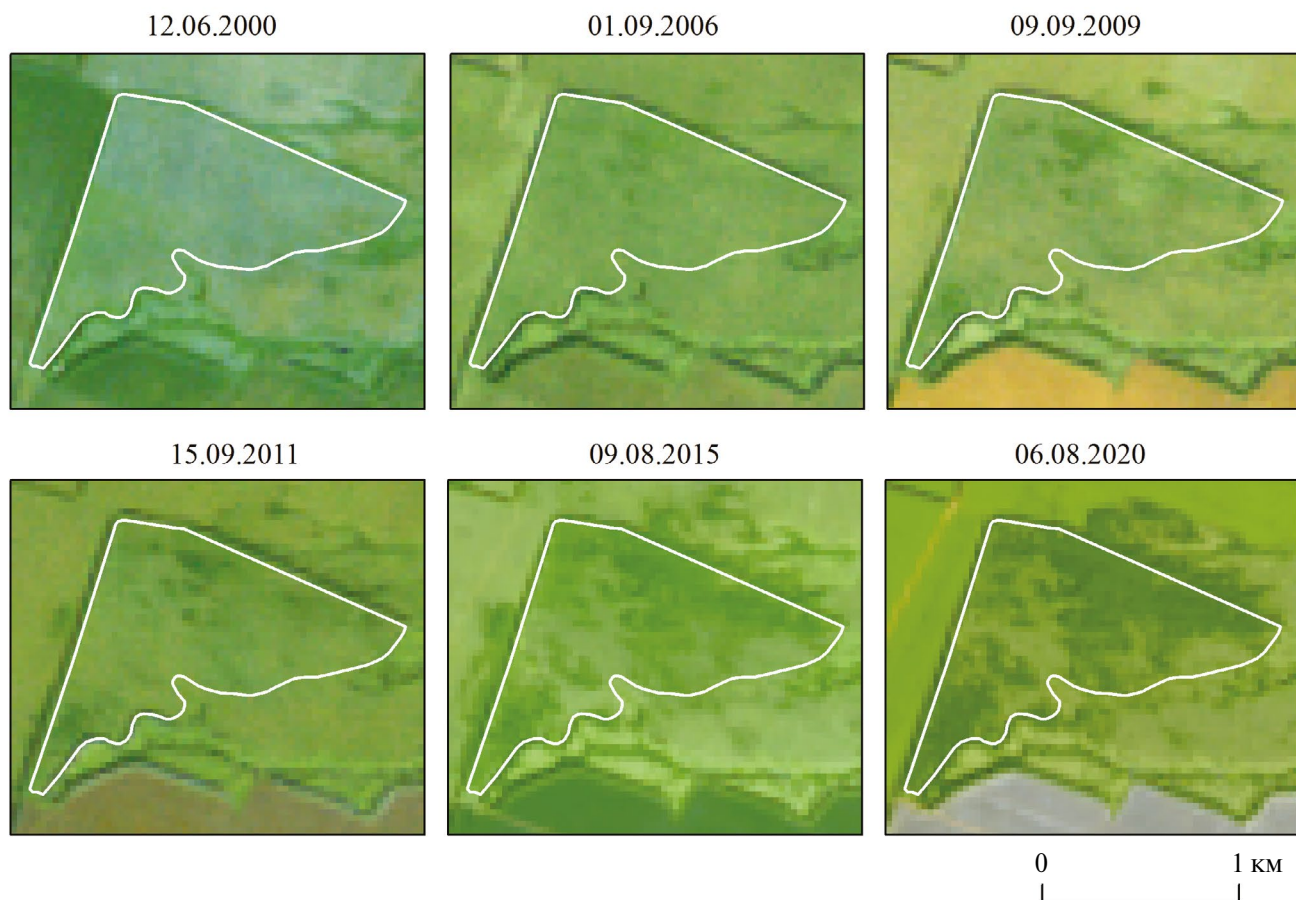


Рис. 2. Отображение процесса формирования древесной растительности на залежных землях в лесостепи на снимках *Landsat TM/OLI*. Тамбовская область. Синтез каналов: SWIR2–SWIR1–RED.

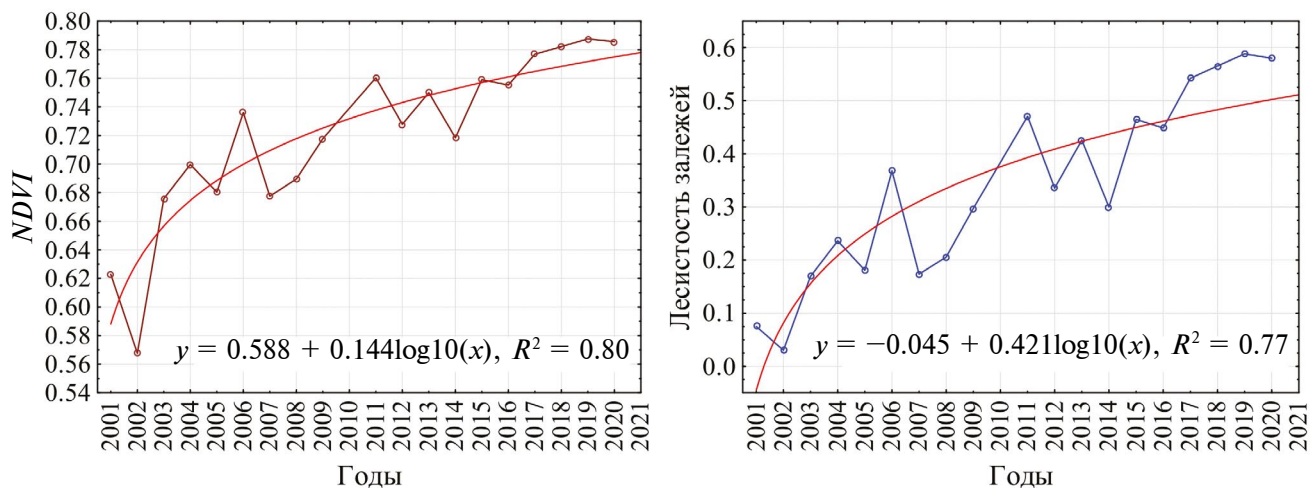


Рис. 3. Зависимости *NDVI* августа и покрытия залежей древесной растительностью от времени, прошедшего с начала восстановительных сукцессий. Подзона северной лесостепи.

растительностью получена на основе уравнений связи этих показателей, установленных ранее (Терехин, 2021). Высокая интенсивность естественного роста лесистости постагрогенных земель, расположенных в условиях северной лесостепи, может быть обусловлена сочетанием климатических и почвенных условий, близким к таковым для лесной зоны.

Из графиков, построенных для залежей северной лесостепи, следует, что к концу второго десятилетия после начала восстановительных сукцессий лесистость угодий достигает в среднем значений 50–60%. При этом сохраняется тенденция к ее дальнейшему повышению, которая, протекает до формирования на оставленных аграрных землях сомкнутой древесной растительности. Достаточно высокая скорость формирования лесных насаждений на относительно многочисленных залежах северной лесостепи, особенно на северо-западе Среднерусской лесостепи, должна выступать одной из основных причин соответствующих изменений в лесистости этой части региона.

В условиях типичной лесостепи скорость роста лесистости на постагрогенных землях ниже (рис. 4), чем в северной лесостепи. К концу второго десятилетия XXI в. с начала восстановительных сукцессий средняя лесистость залежей составляла в среднем 0.33 при более значительном коэффициенте вариации (76% в сравнении с 37% в подзоне северной лесостепи). Для типичной лесостепи изменение значений спектрального индекса в зависимости от числа лет, прошедших с начала восстановительных сукцессий, также как для северной лесостепи, наиболее достоверно и статистически значимо описывается логарифмической

кривой. Более высокие вариации годовых значений вегетационного индекса в подзоне типичной лесостепи в сравнении с северной лесостепью (см. рис. 3 и 4), определяются относительно низкой величиной покрытия залежей древесной растительностью. Она обуславливает высокую долю травянистых сообществ, состояние которых в зависимости от особенностей вегетационного сезона подвержено вариациям. Состояние древесной растительности в течение периода вегетации также может быть подвержено определенным изменениям, но, учитывая, что при анализе многолетней динамики *NDVI* сравнивались только значения, измеренные в августе, влияние фенологии было минимальным. Аналогичные особенности залежей типичной лесостепи характерны и для лесистости (см. рис. 4). Учитывая, что процесс формирования древесной растительности протекает непрерывно, т.е. наблюдается устойчивая тенденция к росту лесистости залежей, многолетняя динамика *NDVI* должна несколько лучше отражать особенности изменения их лесистости, чем многолетняя динамика ее величины, смоделированной на основе спектрального индекса. Этот вывод следует из того, что для расчетной величины лесистости залежей (см. рис. 4) характерны более высокие вариации годовых значений, чем для непосредственно годовых значений вегетационного индекса.

Для постагрогенных земель подзоны южной лесостепи (юго-восток Белгородской области и южная часть Воронежской области), где процессы роста лесистости наблюдаются достаточно слабо, характерно отсутствие выраженной тенденции в изменении вегетационного индекса (рис. 5). Полученные данные согласуются с ре-

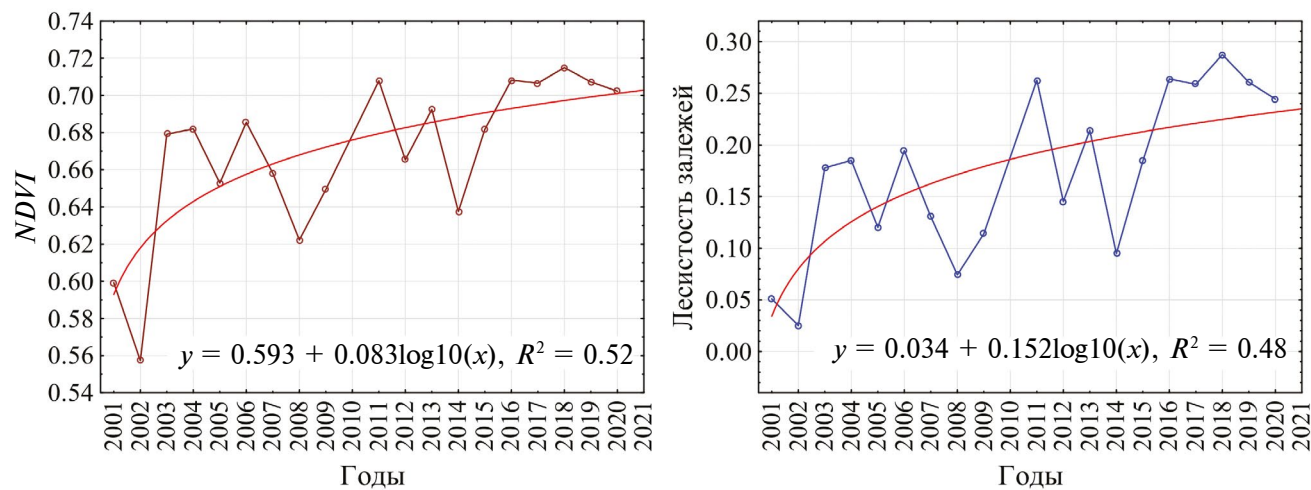


Рис. 4. Зависимость *NDVI* августа и покрытия залежей древесной растительностью от времени, прошедшего с начала восстановительных сукцессий. Подзона типичной лесостепи.

Таблица 2. Зависимости, описывающие скорость изменения годовых значений *NDVI* и лесистости одно-возрастных залежных земель в подзонах лесостепи на территории Центрального Черноземья (включая Орловскую область) в первые два десятилетия восстановительных сукцессий

Подзона лесостепи	Зависимость	
	<i>NDVI</i> залежей	Лесистость (<i>FC</i>) залежей
Северная	$\frac{dNDVI}{dx} = \frac{0.144}{x \ln 10}$	$\frac{dFC}{dx} = \frac{0.421}{x \ln 10}$
Типичная	$\frac{dNDVI}{dx} = \frac{0.083}{x \ln 10}$	$\frac{dFC}{dx} = \frac{0.152}{x \ln 10}$
Южная	$\frac{dNDVI}{dx} = \frac{0.027}{x \ln 10}$	$\frac{dFC}{dx} = \frac{0.010}{x \ln 10}$

Примечание: * *x* — год, прошедший с начала восстановительных сукцессий на залежах.

результатами сравнения фактической и расчетной величины лесистости залежей в конце второго десятилетия XXI в. Согласно им расчетная величина лесистости одновозрастных залежей подзоны южной лесостепи к концу второго десятилетия после вывода угодий из аграрного использования была порядка 5% при фактической величине в 8–10%.

Между подзонами лесостепи достаточно выражены различия по кривым динамики вегетационного индекса и лесистости. Соответствующие различия могут быть охарактеризованы количественно через параметры многолетней динамики *NDVI*. Скорость роста годовых значений вегетационного индекса *NDVI* залежей может быть выражена через его первую производную по времени. Аналогично может быть

оценена скорость увеличения лесистости залежей в первые десятилетия, следующие после начала восстановительных сукцессий. В нашем случае — это первые два десятилетия XXI в. Соотношение скоростей этого процесса в подзонах лесостепи, таким образом, может быть получено методом дифференцирования уравнений (см. рис. 3–5, табл. 2). Показателями скорости роста лесистости залежей разных подзон лесостепи выступают коэффициенты числителей в правой части уравнений. Они позволяют сравнить скорость роста *NDVI* на самом распространенном типе залежей в регионе — с древесной растительностью из лиственных пород. Из уравнений следует, что *NDVI* с разной скоростью растет в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. В период 2000–2020 гг. скорость роста годовых значений вегетационного индекса в северной лесостепи была более чем в 1.7 раз выше, чем в типичной лесостепи и в 5–6 раз выше, чем в южной лесостепи. Несколько более высокие различия в скорости естественного облесения залежей между северной и типичной лесостепью показали оценки расчетной скорости роста лесистости залежей.

Результаты оценки лесистости залежных земель в конце второго десятилетия, полученные на основе предложенного подхода, достаточно хорошо согласуются с фактическими величинами лесистости одновозрастных залежей (табл. 3), которые получены методом определения величины покрытия древесной растительностью на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м). С одной стороны расчетные значения лесистости залежей оказались несколько ниже фактических величин. С другой стороны они достаточно объективно отражают ее соотношение между

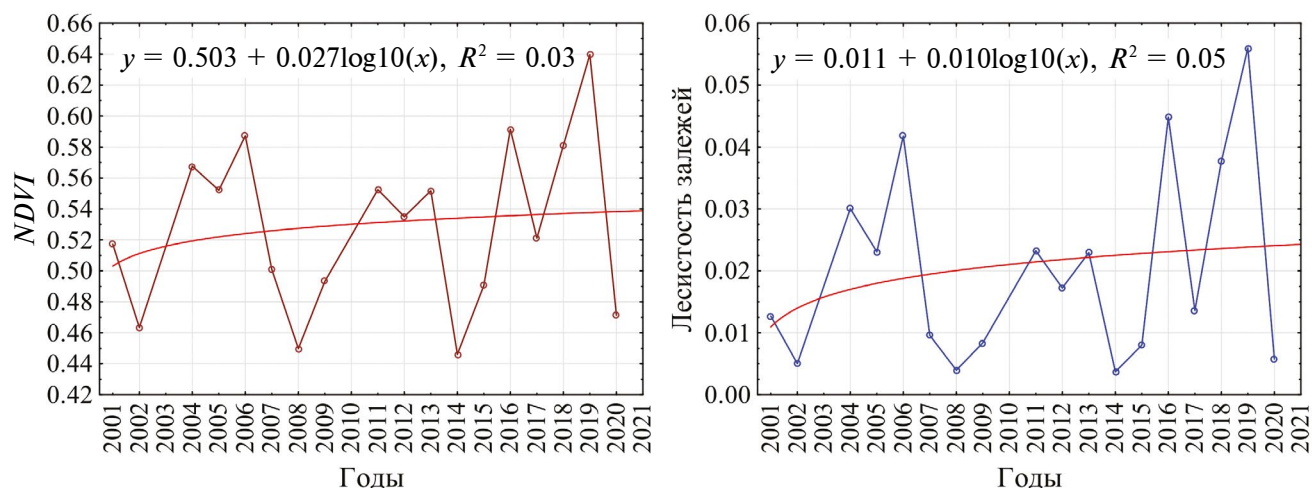


Рис. 5. Зависимость $NDVI$ и покрытия залежей древесной растительностью от времени, прошедшего с начала восстановительных сукцессий. Подзона южной лесостепи.

Таблица 3. Сравнение фактической и расчетной величин лесистости залежных земель в конце второго десятилетия XXI в. в Среднерусской лесостепи

Подзона лесостепи	Лесистость залежей	
	фактическая	расчетная, на основе $NDVI$
Северная	0.57	0.58
Типичная	0.32	0.29
Южная	0.10	0.04

подзонами лесостепи. Из полученных функций видно, насколько контрастны субмеридиональные различия в лесостепной зоне на территории Центрального Черноземья и Орловской области по скорости формирования древесной растительности на оставленных аграрных землях.

Полученные результаты, подтвержденные фактическими оценками лесистости залежей в конце второго десятилетия XXI в. (Терехин, 2022), позволили количественно охарактеризовать внутризональные различия в скорости естественного облесения залежных земель на основе параметров многолетней динамики вегетационного индекса.

ВЫВОДЫ

В границах лесостепи на территории Центрального Черноземья и Орловской области выявлены существенные различия между физико-географическими подзонами по скорости формирования древесной растительности на постагрогенных землях. Она может быть оценена методом расчета первой производной спектрального индекса $NDVI$ по времени,

прошедшему с начала восстановительных сукцессий. Предложенный подход включает применение многолетних рядов $NDVI$, состоящих из значений индекса аналогичных сроков периода вегетации, в которые наблюдается связь с величиной лесистости постагрогенных земель. Расчет лесистости предложено осуществлять с использованием логистической кривой, параметры, которой устанавливаются эмпирически. На основе сравнения характеристик многолетней динамики вегетационного индекса и расчетной величины лесистости в 2000–2020 гг. установлено, что в подзоне северной лесостепи скорость ее прироста на залежах более чем в 1.7 раз выше, чем в подзоне типичной лесостепи и многократно выше, чем в подзоне южной лесостепи. Различия в скорости формирования древесной растительности на внутризональном уровне обуславливают увеличение контрастности лесистости залежей разных подзон, а на территориях их значительного распространения приводят и к увеличению различий во внешнем облике ландшафтов. Полученные результаты показали возможность использования параметров многолетней динамики вегетационного индекса для оценки интенсивности формирования древесной растительности в процессе постагрогенных сукцессий в различных природно-климатических условиях на внутризональном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

- Белоусова А.П., Чащин А.Н. Оценка интенсивности зарастания почв сельскохозяйственных угодий лесной растительностью по данным дистанционного зондирования // Вестн. Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2018. Т. 28. № 3. С. 269–278.
- Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны восточной Сибири по спутниковым данным // Наука и образование. 2012. № 2. С. 58–62.
- Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Зарастание древесной растительностью постагрогенных земель на карбонатных отложениях в Архангельской области // Изв. Санкт-Петербург. лесотехнич. академии. 2015. № 210. С. 25–36.
- Елсаков В.В. Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съемки MODIS 2000–2016 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72.
- Замолотчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4 (48). С. 23–31.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4 (57). С. 31–39.
- Короткова Е.М., Зуев В.В. Отклик растительного покрова Западно-Сибирской равнины на климатические изменения в 1982–2015 гг. // Исследование Земли из Космоса. 2021. № 6. С. 50–59.
- Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Изд. дом Наука, 2015. 198 с.
- Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2013. № 6. С. 4–16.
- Левыкин С.В., Чибилёв А.А., Кочуров Б.И., Казачков Г.В. К стратегии сохранения и восстановления степей и управления природопользованием на постцелинном пространстве // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 4. С. 626–636.
- Лобанов Г.В., Протасова А.П., Авраменко М.В., Тришкин Б.В. Изменения лесистости среднего Подесенья в период сельскохозяйственного освоения: историко-географические закономерности, влияние на ландшафты и природопользование // Бюл. Брянского отд. Русского бот. общ-ва. 2017. № 3 (11). С. 49–56.
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Мильков Ф.Н. Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 149 с.
- Никонов М.В., Смирнов И.А. Некоторые особенности зарастания агроландшафтов на земле Новгородской // Вест. Новгород. гос. ун-та им. Ярослава Мудрого. 2014. № 76. С. 58–60.
- Сергиенко В.Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербург. НИИ лесного хозяйства. 2015. № 1. С. 5–19.
- Терехин Э.А. Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252.
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-797>
- Терехин Э.А. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 4. С. 594–604.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622040112>
- Терехин Э.А. Сукцессионные процессы на залежах юга Среднерусской возвышенности по данным спутниковых съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 180–193.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193>
- Тишков А.А. Сукцессии растительности зональных экосистем: сравнительно-географический анализ, значение для сохранения и восстановления биоразнообразия // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1–5. С. 1387–1390.
- Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Сохранение и оптимизация агроландшафтов центрального Черноземья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 1. С. 103–109.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-103-109>
- Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Волошин А.Л., Батуева Д.Ж., Чимэддорж Ц. Пространственно-временные характеристики растительного покрова аридной и семиаридной климатических зон Монголии на основе индекса вегетации NDVI // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 2 (59). С. 19–29.
- Федотов С.В. Вертикальная дифференциация ландшафтов и проблема границ природных зон в центре Русской равнины // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2008. № 2. С. 5–12.
- Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1961. 263 с.
- Heck E., Beurs K.M. de, 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. of Photogrammetry and Remote Sens. 2019. Vol. 156. P. 121–134.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011>

- 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 // *The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): a new generation of Land Surface Monitoring*. 2002. Vol. 83. № 1. P. 195–213.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status // *Remote Sens. of Environ.* 2002. Vol. 83. № 1–2. P. 3–15.
- Karelin D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe // *Eurasian Soil Sci.* 2015. Vol. 48. № 11. P. 1229–1241.
<https://doi.org/10.1134/S1064229315110095>
- Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution // *Eurasian Soil Sci.* 2021. Vol. 54. № 3. P. 337–351.
<https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Pan Y., Li L., Zhang J., Liang S., Zhu X., Sulla-Menashe D. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index // *Remote Sens. of Environ.* 2012. Vol. 119. P. 232–242.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.011>
- Testa S., Soudani K., Boschetti L., Borgogno Mondino E. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests // *J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. Vol. 64. P. 132–144.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.006>
- Zhang B., Zhang L., Xie D., Yin X., Liu C., Liu G. Application of Synthetic NDVI Time Series Blended from Landsat and MODIS Data for Grassland Biomass Estimation // *Remote Sens.* 2016. Vol. 8. № 1.
<https://doi.org/10.3390/rs8010010>

Intrazonal Differences in Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe

E. A. Terekhin*

Belgorod State University, Belgorod, Russia

*e-mail: terekhin@bsuedu.ru

Afforestation in the first two decades of the 21st century for post-agrogenic lands in the subzones of the northern, typical and southern forest-steppe was considered. The study was carried out in the Central Chernozem region of Russia, including the Oryol oblast. The natural afforestation rate was estimated using first-order derivative of the NDVI vegetation index with respect to time. It is also proposed to estimate the afforestation rate using the first-order derivative of the calculated forest cover with respect to time. In the first two decades of the 21st century, the increase in the forest cover of abandoned lands varied significantly among the subzones of the forest-steppe. During the analyzed period, the forest cover of abandoned agricultural lands in the northern forest-steppe increased according to a logarithmic dependence. In the typical forest-steppe subzone, the forest cover of abandoned lands increased according to a similar dependence at a slower rate. The annual increase in the forest cover of abandoned lands located in the subzone of the southern forest-steppe was minimal or absent. The rate of afforestation, expressed by the first-order derivative of the vegetation index from time, in the subzone of the northern forest-steppe exceeded that in the typical forest-steppe more than 1.7 times. The afforestation rate in the northern forest-steppe subzone exceeded that in the southern forest-steppe by 5–6 times. The ratio of the average calculated values of abandoned land forest cover of in the forest-steppe subzones at the end of the second decade of the 21st century turned out to be approximately similar to the ratio of their actual values. The established patterns are indicators of an increase in intrazonal differences in the forest cover of abandoned lands in the forest-steppe. Different afforestation rates lead to increase in the contrast landscapes of forest-steppe in its submeridional boundaries.

Keywords: abandoned agricultural lands, afforestation, forest-steppe, intrazonal differences, remote sensing, Central Russian forest-steppe

REFERENCES

- Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Lupyan E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Land Cover Mapping Over Russia Using Earth Observation Data]. Moscow: IKI RAN, 2016. 208 p.
- Belousova A.P., Chashchin A.N. Assessment of the intensity of agricultural land soils overgrowing by forest vegetation according to remote sensing data. *Vestn. Udmurt. Univ., Ser.: Biol. Nauki Zemle*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 269–278. (In Russ.).
- Elsakov V.V. Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation cover of Eurasian tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS data. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 56–72. (In Russ.).
- Fedotov S.V. Vertical differentiation of landscapes and the problem of natural zones borders in the Russian Plain centre. *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geogr. Geoekol.*, 2008, no. 2, pp. 5–12. (In Russ.).
- Fiziko-geograficheskoe raionirovaniye tsentral'nykh chernozemnykh oblastei* [Physical and Geographical Zoning of the Central Chernozem Regions]. Voronezh: Izd-vo Voronezh. Univ., 1961. 263 p.
- Golubeva L.V., Nakvasina E.N. Abandoned agricultural land overgrown woody vegetation on carbonate deposits in Arkhangelsk region. *Izv. S.-Peterb. Lesotekhn. Akad.*, 2015, no. 210, pp. 25–36. (In Russ.).
- 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. Photogramm. Remote Sens.*, 2019, vol. 156, pp. 121–134.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011>
- 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 Sens. Environ.*, 2002, vol. 83, no. 1–2, pp. 195–213.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 83, no. 1–2, pp. 3–15.
- Karelin D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 11, pp. 1229–1241.
<https://doi.org/10.1134/S1064229315110095>
- Korotkova E.M., Zuev V.V. Response of the vegetation cover of the West Siberian Plain to climatic changes in 1982–2015. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2021, no. 6, pp. 50–59. (In Russ.).
- Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. *Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovaniye i upravleniye* [Agrolandscapes of Central Chernozem Region. Zoning and Management]. Moscow: Nauka Publ., 2015. 198 p.
- Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution. *Eurasian Soil Sci.*, 2021, vol. 54, no. 3, pp. 337–351.
<https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V. The impact of climate change on the plant cover of the Barents Sea islands. *Tr. KNTs RAN*, 2013, no. 6, pp. 4–16. (In Russ.).
- Levykin S.V., Chibilev A.A., Kochurov B.I., Kazachkov G.V. To the strategy of steppes' conservation and restoration and natural resource use in the area of post-virgin lands. *Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr.*, 2020, no. 4, pp. 626–636. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556620040093>
- Lobanov G.V., Protasova A.P., Avramenko M.V., Trishkin B.V. Changes in the forest cover of the Middle Desna basin in the period of agricultural development: Historical and geographical patterns, the impact on landscapes and landuse. *Byull. Bryansk. Otdel. Russ. Botan. Obshch.*, 2017, no. 3, pp. 49–56. (In Russ.).
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XXI veke i postagrogennoe vosstanovleniye rastitel'nosti i pochvy* [Dynamics of Agricultural Lands of Russia in 20th Century and Postagrogenic Restoration of Vegetation and Soils]. Moscow: GEOS Publ., 2010. 416 p.
- Mil'kov F.N. *Prirodnye zony SSSR* [Natural Zones of the USSR]. Moscow: Mysl' Publ., 1977. 149 p.
- Nikonov M.V., Smirnov I.A. Some peculiarities of farmland overgrowing in Novgorod region. *Vestn. Novgorod. Gos. Univ. Yarosl. Mudrogo*, 2014, no. 76, pp. 58–60. (In Russ.).
- Pan Y., Li L., Zhang J., Liang S., Zhu X., Sulla-Menashe D. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. *Remote Sens. Environ.*, 2012, vol. 119, pp. 232–242.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.011>
- Sergienko V.G. The dynamics of the boundaries of forest vegetation zones in Russia under climate change. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2015, no. 1, pp. 5–19. (In Russ.).
- Terekhin E.A. Satellite-based estimation of successional processes on abandoned farmland of south Central Russian upland. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 180–193. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193>

- Terekhin E.A. Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series. *Komp. Optika*, 2021, vol. 45, no. 2, pp. 245–252. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-797>
- Terekhin E.A. Reforestation on abandoned agricultural lands in the Central Russian Forest–Steppe. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 594–604. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556622040112>
- Testa S., Soudani K., Boschetti L., Borgogno Mondino E. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2018, vol. 64, pp. 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.006>
- Tishkov A.A. Plant successions of zonal ecosystems: geographical analysis, significans for conservation and restoration of biodiversity. *Izv. Samar. Nauch. Ts. RAN*, 2012, vol. 14, no. 1–5, pp. 1387–1390. (In Russ.).
- Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. Preservation and optimization of agrolandscapes of the Central Chernozem zone. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 1, pp. 103–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-103-109>
- Tulokhonov A.K., Tsydypov B.Z., Voloshin A.L., Batueva D.Z., Chimeddorj T. Spatio-temporal characteristics of vegetation cover of arid and semiarid climatic zones in Mongolia on the basis of vegetation index NDVI. *Arid Ecosys.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 61–68.
- Varlamova E.V., Solov'ev V.S. Monitoring of vegetation cover in the Arctic zone of eastern Siberia using satellite data. *Nauka Obrazovanie*, 2012, no. 2, pp. 58–62. (In Russ.).
- Zamolodchikov D., Kraev G. Impact of climate change on Russian forests: Recorded impacts and forecast estimates. *Ustoich. Lesopol'zov.*, 2016, no. 4, pp. 23–31. (In Russ.).
- Zhang B., Zhang L., Xie D., Yin X., Liu C., Liu G. Application of Synthetic NDVI Time Series Blended from Landsat and MODIS Data for Grassland Biomass Estimation. *Remote Sens.*, 2016, vol. 8, no. 1, art. 10. <https://doi.org/10.3390/rs8010010>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Ulanova S.S., Fedorova N.L. Ground-based and satellite investigation of production of pastures in Kalmykia that vary in degree of vegetation degradation. *Arid Ecosys.*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 212–219.