

## Изменение внутризональных различий в естественном растительном покрове ландшафтов лесостепи в конце XX – начале XXI века

Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга  
объектов и природных ресурсов, Белгород, 308015, Россия  
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Изложены результаты анализа естественной динамики растительного покрова в физико-географических подзонах лесостепи на территории Центрального Черноземья. Исследование выполнено на примере участков ландшафтов, испытывающих минимальное антропогенное воздействие: овражно-балочных систем и оставленных аграрных угодий. Установлено, что в период с середины 1980-х гг. по конец второго десятилетия XXI в. происходило повышение различий в лесистости овражно-балочных систем между северной и южной частями лесостепи. Скорость естественного роста лесистости овражно-балочной сети существенно различается между её подзонами. Если в середине 1980-х гг. соотношение лесистости в подзонах северной и южной лесостепи было равно 1,6, то в 2018 г. этот показатель составил 2,5. В 2018 г. между подзонами лесостепи наблюдались статистически значимые различия по лесистости овражно-балочных систем, которых не было в середине 1980-х гг. Современная лесистость одновозрастных залежей северной лесостепи более чем в 7 раз превышает этот показатель для аналогичных залежей южной лесостепи. Залежи разных подзон лесостепи существенно различаются по параметрам многолетней динамики вегетационного индекса NDVI в период 2000–2018 гг. В северной лесостепи установлена положительная статистически значимая динамика индекса. В подзоне типичной лесостепи динамика NDVI есть, но она менее выражена. В подзоне южной лесостепи не выявлено статистически значимой многолетней динамики вегетационного индекса. Установленные тенденции выступают индикаторами повышения внутризональных различий естественного растительного покрова в лесостепной зоне.

**Ключевые слова:** лесостепь, овражно-балочные системы, залежные земли, внутризональные различия, лесовозобновление, спектрально-отражательные характеристики, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 09.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192

### Введение

Индикация динамики природных условий — одна из ключевых географических задач. Различия в них могут наблюдаться не только между природными зонами, но и в их пределах, на внутризональном уровне, что становится основанием для разделения природных зон на таксономические единицы меньше ранга, например физико-географические подзоны или провинции. Вследствие глобальных циклов природно-климатических процессов физико-географические условия подвержены изменениям, что может выступать причиной динамики зональных и внутризональных географических различий. Индикация таких изменений необходима для определения тенденций динамики природной среды, а также для планирования стратегий её использования, учитывающих направленность природных процессов.

Естественный растительный покров — один из важнейших индикаторов природных условий, и его особенности положены, в значительной степени, в основу деления природных зон на более мелкие территориальные единицы. Примером может стать природная зона лесостепи на территории Центрального Черноземья, в пределах которой выделяют три подзоны: северной, типичной и южной лесостепи (Физико-географическое..., 1961). Соотношение древесной и травянистой растительности в природных лесостепных ландшафтах — один из их

ключевых параметров, во многом определяющий их внешний облик. В Среднерусской лесостепи, характеризующейся значительной аграрной преобразованностью и высокой степенью распашки, только некоторые элементы ландшафтов могут быть использованы для анализа тенденций динамики естественной растительности. К ним относятся овражно-балочные системы (ОБС) и оставленные аграрные угодья, или залежные земли.

Овражно-балочная сеть региона на значительной части его территории развита достаточно хорошо. Системы балок и оврагов широко представлены во многих его частях. Некоторое исключение составляет только Окско-Донская равнина. Распространённость овражно-балочных систем позволяет использовать их как объект исследования для территориального анализа характеристик растительного покрова и их динамики.

Другим элементом ландшафта, позволяющим изучить соответствующую проблему, выступают залежные земли, или оставленные аграрные угодья. Прекращение распашки и антропогенного вмешательства в развитие экосистем стимулирует развитие восстановительных сукцессий. Их особенности определяются совокупностью природных условий, в которых расположены залежи (Русанов, 2012; Lisetskii et al., 2010), что позволяет использовать их как объекты для анализа естественных изменений растительного покрова. Залежные земли, также как и овражно-балочные системы, распространены во многих частях Центрально-Черноземного района (ЦЧР) (Терехин, 2020).

Пространственно-временная оценка сукцессионных процессов, связанных с лесовозобновлением, а также анализ их внутризональных особенностей наземными методами затруднительны или невозможны. Применение разновременных спутниковых данных в связи с этим становится наиболее эффективным методом анализа изменений в растительном покрове (Кашницкий и др., 2019; Ховратович и др., 2019; Baumann et al., 2014; Potapov et al., 2015). Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) выступают эффективным инструментом при анализе процессов лесовозобновления (Жиринов и др., 2011; Liu et al., 2008; Pickell et al., 2016; Schmidt et al., 2015) и оценке лесистости территории (Терехин, Чендев, 2019; Chendev et al., 2016; Morresi et al., 2019). Влияние лесистости на спектральный отклик служит основанием для использования ДДЗ при изучении современных и ретроспективных особенностей растительного покрова. Выявление и использование соответствующих зависимостей позволило провести пространственный анализ величины покрытия залежей древесной растительностью (Терехин, 2020) и пространственно-временную оценку лесистости овражно-балочных систем на территории Среднерусской лесостепи (Терехин, 2021). Результаты, полученные в рамках обозначенных исследований, послужили основой для более детального анализа естественных изменений растительности в лесостепи — на внутризональном уровне.

Цель исследования состояла в анализе современных и ретроспективных различий естественного растительного покрова в пределах лесостепи на территории Центрального Черноземья. Задачи исследования включали сопоставления показателей лесистости, спектрально-отражательных характеристик и климатических параметров в подзонах лесостепи в разные временные срезы периода конца XX — начала XXI в.

## Материалы и методика исследования

Территория исследования охватывала лесостепную зону в границах Центрального Черноземья, включая Орловскую обл., и простиралась от лесной зоны на северо-западе до степной зоны на юге. Согласно схеме физико-географического районирования региона (Физико-географическое..., 1961), в его пределах выделяют три подзоны: северной, типичной и южной лесостепи (рис. 1, см. с. 181). Юг региона расположен в условиях зоны степи.

Оценка тенденций в динамике внутризональных различий естественной растительности осуществлена на основе элементов ландшафтов, которые испытывают минимальное антропогенное воздействие и развитие растительного покрова которых определяется практически исключительно природными условиями. В регионе к ним относятся овражно-балочные системы и оставленные аграрные угодья.

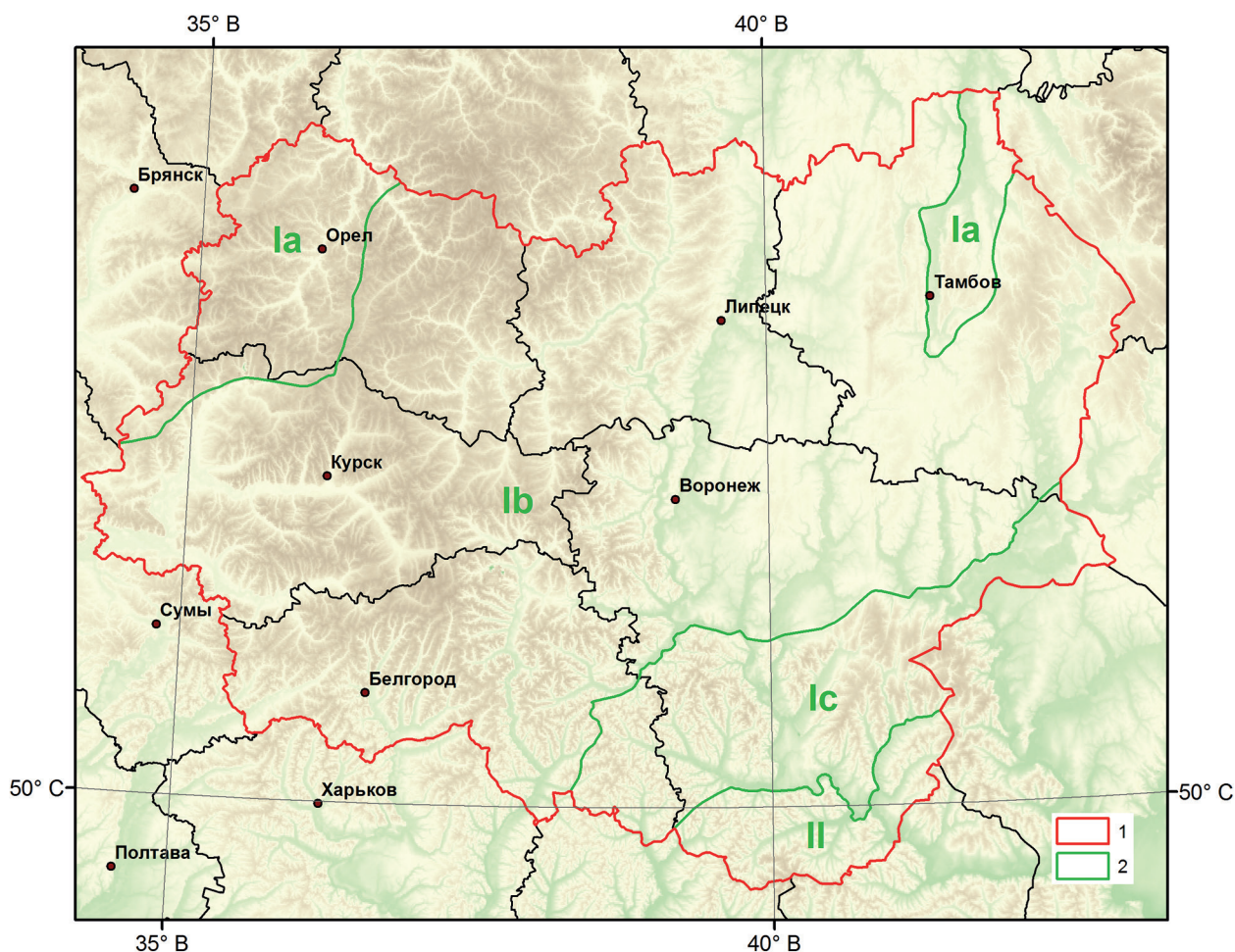


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории (1) и границ физико-географического районирования (2). Лесостепная зона: Ia — подзона северной лесостепи, Ib — подзона типичной лесостепи, Ic — подзона южной лесостепи; II — степная зона

Овражно-балочные системы для анализа подбирали таким образом, чтобы сформированная выборка позволила провести сравнение внутризональных различий по величине их лесистости и спектрально-отражательным характеристикам на три временных среза: середину 1980-х гг., начало 2000-х гг. и конец второго десятилетия XXI в. Учитывались следующие основные критерии: 1) наличие на каждую из них безоблачного космического снимка Landsat TM/OLI (*англ.* Thematic Mapper/Operational Land Imager) середины 1980-х гг., начала 2000-х гг. и конца второго десятилетия XXI в., а также космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения периода 2000–2018 гг.; 2) отсутствие следов лесопосадок и антропогенных нарушений в последние десятилетия; 3) аналогичные для всех ОБС геоморфологические условия и отсутствие в их пределах увлажнённых участков.

Оставленные аграрные угодья подбирали таким образом, чтобы все они были примерно одного возраста, т.е. длительность восстановительных сукцессий на них должна быть аналогична. Угодья должны были быть выведены из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг. и при этом непрерывно оставаться в состоянии залежи до 2018–2019 гг. Площадь анализируемых залежей должна быть не менее 20 га. Для анализа отбирали залежи с формирующимися лесными сообществами лиственного породного состава или залежи без древесной растительности.

Подбор объектов для исследования проводили на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения периода 2000–2018 гг., полученных из архивов открытого доступа, преимущественно из сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Овражно-балочные системы и залежные земли выбирали таким образом, чтобы они были



представлены во всех подзонах лесостепи: северной, типичной и южной. В то же время выполнение этого условия осложнялось неравномерным распространением исследуемых типов объектов на исследуемой территории. В общей сложности для анализа было отобрано 160 овражно-балочных систем и 181 залежь (табл. 1).

Для каждой залежи или овражно-балочной системы на основе спутниковых данных, используемых для их выявления, подготовлен векторный контур, который был применён на следующих этапах для вычисления их спектрально-отражательных характеристик.

Таблица. 1. Характеристики проанализированных овражно-балочных систем и залежных земель, используемых для изучения внутризональных различий в пределах лесостепи

| Подзона            | Овражно-балочные системы |             | Залежные земли |             |
|--------------------|--------------------------|-------------|----------------|-------------|
|                    | Число                    | Площадь, га | Число          | Площадь, га |
| Северной лесостепи | 9                        | 395,7       | 47             | 2677,1      |
| Типичной лесостепи | 136                      | 3067,6      | 121            | 7840,6      |
| Южной лесостепи    | 15                       | 385,8       | 13             | 518,0       |
| Всего              | 160                      | 3849,1      | 181            | 11035,7     |

Оценка спектрально-отражательных признаков овражно-балочных систем выполнена по данным Landsat на три временных среза: середину 1980-х гг., начало 2000-х гг., конец второго десятилетия XXI в. Для этой цели на каждый временной срез было сформировано покрытие ЦЧР снимками Landsat TM/OLI периода августа, включающее по 10 изображений (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Все снимки прошли атмосферную и радиометрическую корректировку (Landsat..., 2019). Вычисление лесистости ОБС на каждый временной срез осуществлено с помощью методики, основанной на зависимости лесистости и спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный) (Терехин, 2021). Величины лесистости на 2018 г. были оценены также с использованием снимков сверхвысокого пространственного разрешения. После этого были рассчитаны средние показатели лесистости ОБС на все временные срезы для каждой подзоны лесостепи: северной, типичной и южной.

Оценка спектрально-отражательных характеристик залежных земель в силу их особенностей была проведена иным способом, чем анализ аналогичных характеристик овражно-балочных систем. Анализ отражательных свойств залежей по состоянию на конец второго десятилетия XXI в. осуществлён на основе снимков Landsat OLI 2018 г., полученных в период августа, и включал оценку КСЯ (коэффициентов спектральной яркости) SWIR-диапазона и индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Huete et al., 2002; Valor, Caselles, 1996). Обе спектральные характеристики тесно коррелируют с величиной покрытия залежей древесной растительностью (Терехин, 2020) и могут применяться для анализа процессов лесовозобновления на них. Значения отражательных признаков SWIR-диапазона и NDVI залежей, полученные по данным Landsat 2018 г., были рассчитаны для каждой подзоны лесостепи и сопоставлены с фактическими значениями покрытия залежей древесной растительностью, полученными по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения конца второго десятилетия XXI в.

Второй этап анализа отражательных характеристик залежей включал исследование многолетней динамики вегетационного индекса NDVI в период 2000–2018 гг. по данным MOD13Q1, которые содержат 16-дневные композитные значения вегетационного индекса NDVI (Didan, 2015), рассчитанные по снимкам MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Для каждой залежи был вычислен многолетний ряд индекса, включающий его значения за периоды вегетации каждого года: с начала апреля по конец октября. То есть многолетний ряд NDVI для каждой залежи насчитывал по 234 значения. На основе рядов NDVI, полученных для отдельных залежей, были рассчитаны усреднённые многолетние ряды вегетационного индекса для каждой подзоны лесостепи в пределах Центрального

Черноземья. Таким образом, многолетние ряды вегетационного индекса охватывали период в два десятилетия от начала восстановительных сукцессий. Анализ многолетних рядов вегетационного индекса состоял в оценке их трендовой составляющей, осуществлённой по непараметрическому тесту Манна – Кендалла.

На следующем этапе для каждой подзоны лесостепи были проанализированы фактическая величина покрытия залежей древесной растительностью в конце второго десятилетия XXI в. и значения спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона по данным Landsat OLI и вегетационного индекса NDVI. После этого для подзон лесостепи было осуществлено сравнение многолетней динамики вегетационного индекса по данным MOD13Q1 в 2000–2018 гг. Учитывая, что все залежи были примерно одного и того же возраста, перечисленные показатели выступали индикаторами различий в темпах лесовозобновления на залежах и их особенностей на внутризональном уровне.

Анализ динамики климатических условий региона проведён для периода 1980–2018 гг. и включал оценку характеристик тепло- и влагообеспеченности: суммы активных температур (температура выше +10 °C), суммы осадков за период с температурой выше +10 °C, гидротермического коэффициента Селянинова. Сумма активных температур определяет теплообеспеченность в период вегетации, а также его продолжительность. Гидротермический коэффициент (ГТК) выступает индикатором влагообеспеченности территории и определяется по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{10R}{\sum t > 10^\circ\text{C}},$$

где  $R$  — сумма осадков за период с температурой не ниже 10 °C (мм);  $\sum t$  — сумма активных температур за тот же период времени.

Оценка перечисленных характеристик осуществлена на три периода: 1980–1985, 1995–2000 и 2013–2018 гг. То есть была выполнена таким образом, чтобы обеспечить возможность их сопоставления с результатами анализа растительного покрова овражно-балочных систем и оставленных аграрных земель. Для этого были обработаны данные с 12 метеостанций, расположенных на территории Центрального Черноземья или вблизи него: Рыльский, Курск, Поньри, Готня, Богородицкое-Фенино, Конь-Колодезь, Воронеж, Валуйки, Тамбов, Росташи, Каменная Степь, Калач (источник данных: <http://meteo.ru>).

Все три климатические характеристики рассчитаны на основе ежедневных значений температуры и осадков для каждой метеостанции. На основе полученных данных были вычислены средние значения сумм активных температур, количества осадков и ГТК в анализируемые периоды для подзон северной, типичной и южной лесостепи. После этого результаты анализа гидротермических характеристик были сопоставлены с результатами анализа естественной динамики растительного покрова.

## Результаты и их обсуждение

На основе анализа изменений растительности овражно-балочных систем и залежных земель, обусловленных лесовозобновлением и динамикой лесистости, выявлено значительное повышение её внутризональных различий, наблюдающееся в конце XX–начале XXI в. Оно проявляется в увеличении контрастности между подзонами северной, типичной и южной лесостепи.

### *Тенденции повышения внутризональных различий растительного покрова овражно-балочных систем*

Более высокая скорость формирования древесной растительности на участках ОБС в подзонах северной и типичной лесостепи в сравнении с южной лесостепью обусловила и более существенные внутрирегиональные различия по этому критерию в конце второго десятилетия

XXI в., чем в середине 1980-х гг. Оценка лесистости овражно-балочных систем, смоделированной на основе отражательных характеристик SWIR-диапазона, показала, что с начала 1980-х гг. наблюдается тенденция к повышению различий во всех подзонах лесостепи на территории Центрального Черноземья. Если в середине 1980-х гг. средняя лесистость ОБС изменялась от 0,12 в южной до 0,20 в северной лесостепи, то в 2018 г. она изменялась от 0,28 до 0,69 (табл. 2).

Таблица 2. Параметры изменения лесистости овражно-балочных систем в подзонах лесостепи, полученные на основе спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона

| Подзона            | 1985 г. |                        | 2000 г. |                        | 2018 г. |                        |
|--------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|
|                    | Среднее | Стандартное отклонение | Среднее | Стандартное отклонение | Среднее | Стандартное отклонение |
| Северной лесостепи | 0,20    | 0,06                   | 0,37    | 0,09                   | 0,69    | 0,17                   |
| Типичной лесостепи | 0,16    | 0,08                   | 0,25    |                        | 0,46    | 0,19                   |
| Южной лесостепи    | 0,12    | 0,06                   | 0,30    |                        | 0,28    | 0,20                   |

Если в середине 1980-х гг. лесистость ОБС в подзоне северной лесостепи превышала в среднем лесистость ОБС в южной лесостепи в 1,6 раза, то в конце второго десятилетия XXI в. этот показатель равен 2,5.

Другим критерием увеличения внутризональных различий выступает повышение значимости различий по величине лесистости овражно-балочных систем в подзонах лесостепи в анализируемый период. На основе дисперсионного анализа и его непараметрического аналога — теста Краскела — Уоллиса — установлено, что в 1985 г. в подзонах лесостепи не наблюдалось статистически значимых различий по лесистости овражно-балочных систем (табл. 3). Но с начала 2000-х гг. они начинают появляться и существенно усиливаются к концу второго десятилетия XXI в., что следует из повышения абсолютных значений и статистической значимости различий критериев Фишера (F) и Краскела — Уоллиса (H).

Таблица 3. Параметры изменения значимости различий между подзонами лесостепи по лесистости ОБС на основе критериев Фишера (F) и Краскела — Уоллиса (H)

| Год  | Критерий Фишера (F) |                    | Критерий Краскела — Уоллиса (H) |                    |
|------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
|      | Абсолютное значение | Уровень значимости | Абсолютное значение             | Уровень значимости |
| 1985 | 2,51                | 0,085              | 6,5                             | 0,039              |
| 2000 | 6,48                | 0,002              | 9,7                             | 0,007              |
| 2018 | 10,36               | 0,000              | 17,0                            | 0,002              |

Повышение в различиях средних значений лесистости овражно-балочных систем для подзон лесостепи наглядно проявляется при графическом анализе (рис. 2, см. с. 185), из которого видно, что лесистость ОБС на территории Среднерусской лесостепи росла с разной скоростью в период 1985–2018 гг.

Следствием установленной тенденции становится повышение контрастности между подзонами лесостепи по величине лесистости и, соответственно, по внешнему облику естественных ландшафтов.

В анализируемый период в регионе наблюдались достаточно существенные изменения в гидротермических характеристиках, которые могли быть причиной выявленных изменений в растительном покрове. С начала 1980-х гг. по конец второго десятилетия XXI в. во всех подзонах лесостепи наблюдалась тенденция к повышению суммы активных температур. Она протекала на фоне снижения либо сохранения на начальном уровне суммы осадков за период, в который наблюдалась среднесуточные температуры выше +10 °C (табл. 4).

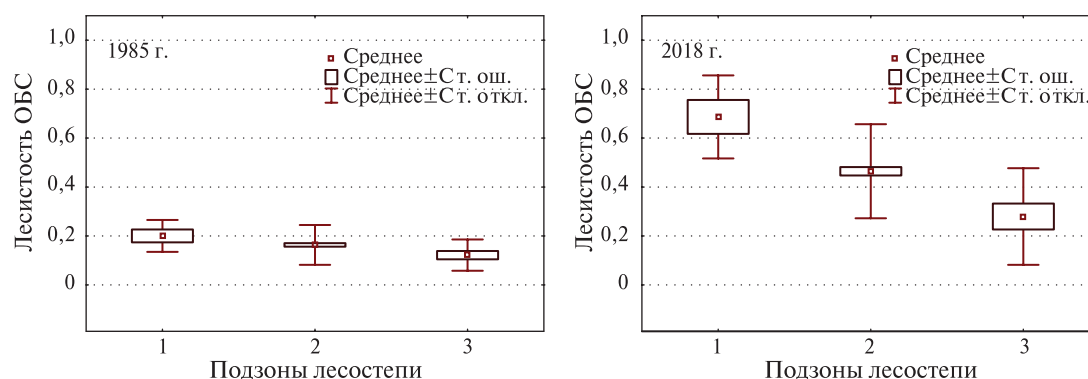


Рис. 2. Параметры лесистости овражно-балочных систем, рассчитанной на основе спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона в подзонах северной (1), типичной (2) и южной (3) лесостепи в середине 1980-х и конце 2010-х гг.

Таблица 4. Изменения в суммах активных температур и суммах осадков за периоды с температурой выше 10 °С в подзонах лесостепи с начала 1980-х по конец 2010-х гг.

| Подзона                | Средняя годовая сумма активных температур, °С |               |               | Средняя годовая сумма осадков за период активных температур, мм |               |               |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                        | 1980–1985 гг.                                 | 1995–2000 гг. | 2000–2018 гг. | 1980–1985 гг.                                                   | 1995–2000 гг. | 2000–2018 гг. |
| Северной лесостепи     | 2531                                          | 2645          | 2868          | 337                                                             | 322           | 297           |
| Типичной лесостепи     | 2647                                          | 2781          | 3007          | 307                                                             | 297           | 289           |
| Южной лесостепи        | 2813                                          | 2926          | 3125          | 251                                                             | 250           | 254           |
| В среднем по лесостепи | 2664                                          | 2784          | 3000          | 298                                                             | 290           | 280           |

Таблица 5. Изменения в величине гидротермического коэффициента в подзонах лесостепи на территории Центрального Черноземья с начала 1980-х по конец 2010-х гг.

| Подзона                | Гидротермический коэффициент |               |               |
|------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
|                        | 1980–1985 гг.                | 1995–2000 гг. | 2000–2018 гг. |
| Северной лесостепи     | 1,35                         | 1,23          | 1,04          |
| Типичной лесостепи     | 1,19                         | 1,09          | 0,96          |
| Южной лесостепи        | 0,91                         | 0,86          | 0,82          |
| В среднем по лесостепи | 1,15                         | 1,06          | 0,94          |

За период около 40 лет рост суммы активных температур составил свыше 12 % от начального уровня, что выступает индикатором повышения теплообеспеченности территории. На фоне роста сумм активных температур в подзонах северной и типичной лесостепи, а также в целом по региону зафиксировано снижение количества осадков за период с температурами выше +10 °С. Произошедшие изменения обусловили снижение величины гидротермического коэффициента (табл. 5).

Таким образом, естественный рост лесистости овражно-балочных систем происходил на фоне повышения теплообеспеченности территории и некоторого снижения её влагообеспеченности.

### **Тенденции повышения внутризональных различий растительного покрова оставленных аграрных угодий**

Для залежных земель, расположенных в различных подзонах лесостепи, также как и для овражно-балочных систем, характерна различная скорость лесовозобновления. Величина покрытия

древесной растительностью в 2018 г. для залежных земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг., существенно и при этом статистически значимо (уровень значимости 0,05) различалась в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. Для неё характерно последовательное снижение с севера на юг (табл. 6).

Таблица 6. Характеристики величины покрытия одновозрастных залежей древесной растительностью в подзонах лесостепи в конце второго десятилетия XXI в.

| Подзона            | Среднее | Число объектов | Стандартное отклонение | Коэффициент вариации, % |
|--------------------|---------|----------------|------------------------|-------------------------|
| Северной лесостепи | 0,62    | 47             | 0,23                   | 37                      |
| Типичной лесостепи | 0,33    | 121            | 0,25                   | 76                      |
| Южной лесостепи    | 0,08    | 13             | 0,09                   | 116                     |

Вместе с этим для оставленных аграрных земель характерны и существенные различия в спектрально-отражательных характеристиках, коррелирующих с долей древесной растительности: спектрально-отражательных признаках (КСЯ) SWIR-диапазона и значениях вегетационного индекса NDVI (табл. 7).

Таблица 7. Спектрально-отражательные характеристики одновозрастных залежных земель в подзонах лесостепи в конце второго десятилетия XXI в.

| Подзона            | КСЯ SWIR-диапазона |                         | NDVI    |                         |
|--------------------|--------------------|-------------------------|---------|-------------------------|
|                    | Среднее            | Коэффициент вариации, % | Среднее | Коэффициент вариации, % |
| Северной лесостепи | 0,15               | 10                      | 0,70    | 10                      |
| Типичной лесостепи | 0,18               | 13                      | 0,65    | 11                      |
| Южной лесостепи    | 0,23               | 8                       | 0,47    |                         |

Исследуемые спектральные характеристики (КСЯ SWIR-диапазона и NDVI) последовательно, но разнонаправленно изменяются в ряду «северная лесостепь – типичная лесостепь – южная лесостепь» (рис. 3). При этом наиболее контрастно отличаются друг от друга подзоны типичной и южной лесостепи.

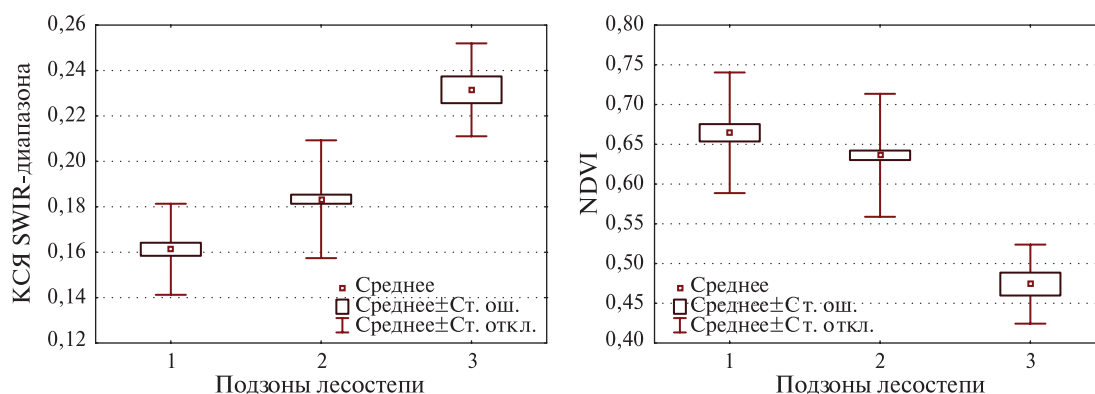


Рис. 3. Значения спектрально-отражательных характеристик залежных земель (по Landsat-8 OLI) с листовыми породами для подзон северной (1), типичной (2) и южной (3) лесостепи (2018)

Индикатором статистически значимой тенденции изменения вегетационного индекса и, соответственно, тенденции лесовозобновления на залежах могут выступать особенности мно-



голетней динамики вегетационного индекса NDVI и параметры его трендовой составляющей. Анализ рядов NDVI для залежей разных подзон лесостепи, проведённый на основе теста Манна – Кендалла, показал (табл. 8), что трендовые составляющие многолетней динамики NDVI периода 2000–2018 гг. на территории ЦЧР существенно различаются в подзонах северной, типичной и южной лесостепи.

Таблица 8. Характеристики tau Манна – Кендалла для многолетних рядов NDVI залежных земель в подзонах лесостепи в 2000–2018 гг.

| Подзона              | Абсолютная величина | Уровень значимости |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| Северной лесостепи   | 0,181               | 0,000              |
| Типичной лесостепи   | 0,092               | 0,034              |
| Южной лесостепи      | –0,032              | 0,471              |
| В среднем по региону | 0,106               | 0,015              |

Для залежей северной лесостепи характерна положительная статистически значимая величина tau (по тесту Манна – Кендалла), выступающая критерием значимой положительной тенденции вегетационного индекса в исследуемый период. Для залежей типичной лесостепи также установлена положительная статистически значимая тенденция NDVI, но с меньшей абсолютной величиной критерия tau. В южной лесостепи статистически значимой тенденции в динамике вегетационного индекса не выявлено.

С учётом тесной связи NDVI с величиной покрытия залежей древесной растительностью (Терехин, 2020) выявленные различия в динамике вегетационного индекса характеризуют различия в интенсивности лесовозобновления на залежах разных подзон лесостепи. Его разная интенсивность обуславливает повышение различий между залежами физико-географических подзон лесостепи по доле древесной растительности. То есть выявленная тенденция приводит к усилению внутризональных различий по особенностям естественного растительного покрова.

Различия в многолетней динамике вегетационного индекса залежей разных подзон наглядно видны на графиках его многолетних рядов периода 2000–2018 гг. (рис. 4–6). Каждый ряд включает значения NDVI, усреднённые за периоды вегетации, с начала апреля по конец октября, т. е. на основе 13 значений. С учётом того, что все анализируемые угодья были выведены из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг., динамика индекса характеризует интенсивность формирования сообществ древесной растительности на залежах в первые два десятилетия с начала процессов лесовозобновления.

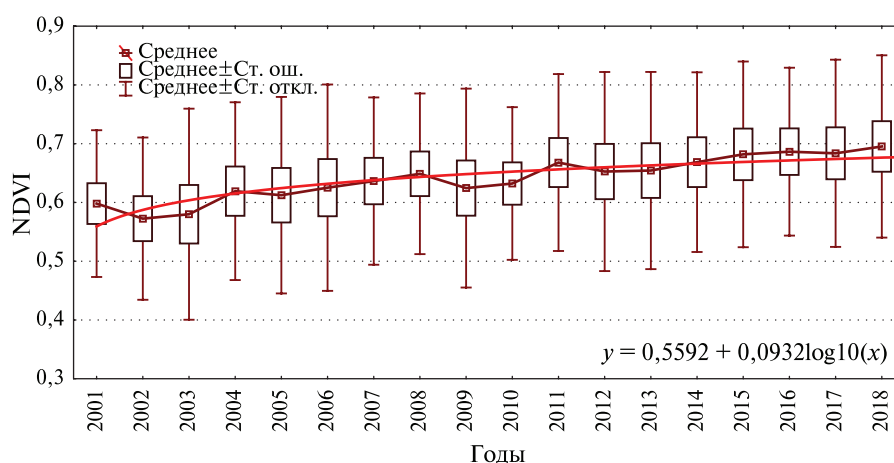


Рис. 4. Многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI для залежных земель северной лесостепи (залежи с лиственными породами)

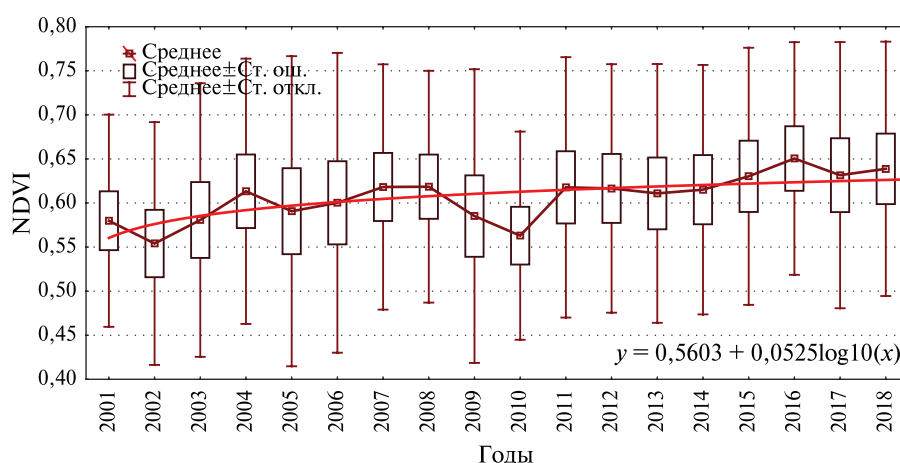


Рис. 5. Многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI для залежных земель типичной лесостепи (залежи с лиственными породами)

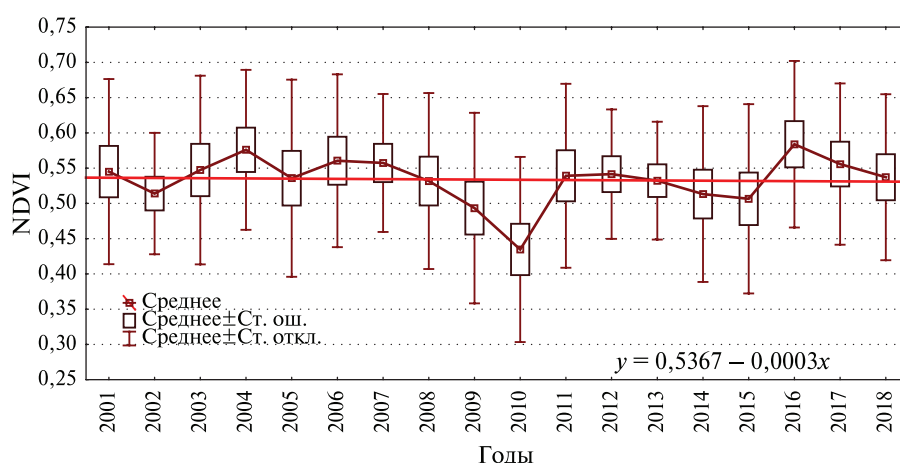


Рис. 6. Многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI для залежных земель южной лесостепи (залежи с лиственными породами)

Индикатором тенденций в динамике внутризональных различий растительного покрова оставленных аграрных угодий наряду с параметрами tau Манна – Кендалла может служить коэффициент наклона трендовой линии вегетационного индекса NDVI, вычисленный на основе его многолетних рядов.

Этот показатель может выступать критерием скорости формирования древесной растительности на залежах лесостепи в пространстве и во времени. При анализе значений NDVI в 2000 и 2018 гг. на рис. 4–6 видно, что в 2018 г. различия между оставленными аграрными угодьями подзон северной и типичной лесостепи значительно выше, чем в начале и середине 2000-х гг.

Таким образом, на залежных землях лесостепной зоны, также как и на участках овражно-балочной сети, в последние десятилетия наблюдается тенденция естественного лесовозобновления и обусловленная им динамика спектрально-отражательных характеристик.

Полученные результаты продемонстрировали непосредственную возможность использования спектрального отклика ландшафтов для индикации различий естественного растительного покрова на внутризональном уровне. Получены новые данные, характеризующие естественные изменения растительного покрова в субмеридиональных границах лесостепи. Вместе с этим они согласуются с результатами анализа естественного лесовозобновления на юге лесостепной зоны (Chendev et al., 2016, 2019), а также в условиях лесной зоны европейской территории России (Королева и др., 2018; Ershov et al., 2022) и Восточной Европы (Biró et al., 2022; Kolecka, 2021).

Сопоставление особенностей лесовозобновления в овражно-балочной сети и на оставленных аграрных угодьях в первые два десятилетия XXI в. показало, с одной стороны, общую тенденцию к нарастанию внутризональных различий по этому показателю: скорость формирования древесной растительности снижается от подзоны северной к южной лесостепи. С другой стороны, темпы лесовозобновления на залежах более значительны, чем в ОБС. Для овражно-балочных систем в конце второго десятилетия XXI в. лесистость в северной лесостепи превышала лесистость в южной лесостепи в 2,5 раза. Для одновозрастных залежных земель различия в аналогичном показателе между северной и южной лесостепью составили 7,7 раза. Если в северной лесостепи на залежах лесовозобновление происходит с очень значительными темпами, то в южной лесостепи оно незначительно либо отсутствует. Для оставленных аграрных земель, как и для овражно-балочных систем, повышение контрастности внутризональных различий проявляется в изученных спектрально-отражательных характеристиках, коррелирующих с долей древесной растительности.

## Выводы

Установлена тенденция к повышению внутризональных различий естественного растительного покрова в ландшафтах Среднерусской лесостепи. Она проявляется в разной скорости процессов лесовозобновления и соответствующей динамике спектрально-отражательных характеристик в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. С середины 1980-х гг. по конец второго десятилетия XXI в. различия между лесистостью овражно-балочных систем северной и южной лесостепи выросли более чем в 1,5 раза. В 2018 г. лесистость овражно-балочных систем подзоны северной лесостепи превышала аналогичный показатель южной лесостепи в 2,5 раза. Тенденция повышения различий в величине покрытия древесной растительностью и коррелирующих с ней спектрально-отражательных характеристик также выявлена на одновозрастных залежах подзон северной, типичной и южной лесостепи. Современная величина покрытия древесной растительностью залежей, выведенных из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг., в северной лесостепи превышает аналогичный показатель в южной лесостепи более чем в 7 раз. Естественное повышение лесистости в овражно-балочных системах и на залежах в исследуемый период происходило на фоне повышения теплообеспеченности территории и некоторого снижения её влагообеспеченности.

## Литература

1. *Жирин В. М., Князева С. В., Эйлина С. П.* Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таёжных лесах Русской равнины // *Лесоведение*. 2011. № 6. С. 29–38.
2. *Кашицкий А. В., Ховратович Т. С., Балашов И. В.* Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111.
3. *Королева Н. В., Тихонова Е. В., Еришов Д. В., Салтыков А. Н., Гаврилюк Е. А., Пугачевский А. В.* Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // *Лесоведение*. 2018. № 2. С. 83–96.
4. *Русанов А. М.* Естественное восстановление агроландшафтов степной и лесостепной зон Оренбургской области // *Степной бюл.* 2012. № 36. С. 8–12.
5. *Терехин Э. А.* Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 142–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
6. *Терехин Э. А.* Пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи с применением спектрально-отражательных признаков // *Исслед. Земли из космоса*. 2021. № 4. С. 84–96. DOI: 10.31857/S0205961421040060.
7. *Терехин Э. А., Чендев Ю. Г.* Анализ пространственно-временных изменений лесистости на юге лесостепи Среднерусской возвышенности по спутниковым данным // *Лесоведение*. 2019. № 4. С. 257–265. DOI: 10.1134/S0024114819030094.

8. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. 263 с.
9. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий А. В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 2019. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
10. Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A., Vladimirova N., Radeloff V. C. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. P. 171–179.
11. Biró M., Molnár Z., Öllerer K., Demeter L., Bölöni J. Behind the general pattern of forest loss and gain: A long-term assessment of semi-natural and secondary forest cover change at country level // Landscape and Urban Planning. 2022. V. 220. Art. No. 104334.
12. Chendev Yu. G., Hubbard J. A., Terekhin E. A., Lupo A. R., Sauer T. J., Burras C. L. Recent afforestation in the Iowa river and Vorskla river basins: A comparative trends analysis // Forests. 2016. V. 7(11). Art. No. 278. DOI: 10.3390/f7110278.
13. Chendev Yu., Gennadiev A., Sauer T., Terekhin E., Matveev S. M. Forests advancements to grasslands and their influence on soil formation: forest steppe of the Central Russian Upland // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Intern. Scientific and Practical Conf. “Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions” (Forestry-2019). 2019. V. 392. Art. No. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012003.
14. Didan K. MOD13Q1 v006: MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid / NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>.
15. Ershov D. V., Gavriluk E. A., Koroleva N. V., Belova E. I., Tikhonova E. V., Shopina O. V., Titovets A. V., Tikhonov G. N. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 2. Art. No. 322. DOI: 10.3390/rs14020322.
16. 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. V. 83. No. 1. P. 195–213.
17. Kolečka N. Greening trends and their relationship with agricultural land abandonment across Poland // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 257. Art. No. 112340.
18. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook: Version 5.0. USGS. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 114 p. URL: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
19. Lisetskii F. N., Chernyavskikh V. I., Degtyar O. V. Pastures in the zone of temperate climate: Trends for development, dynamics, ecological fundamentals of rational use // Pastures: Dynamics. Economics and Management. N. Y.: Nova Science Publishers, 2010. P. 51–84.
20. Liu W., Song C., Schroeder T. A., Cohen W. B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 3855–3872.
21. Morresi D., Vitali A., Urbinati C., Garbarino M. Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 3. Art. No. 308. DOI: 10.3390/rs11030308.
22. Pickell P. D., Hermosilla T., Frazier R. J., Coops N. C., Wulder M. A. Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. P. 138–149.
23. Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe’s forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 159. P. 28–43.
24. Schmidt M., Lucas R., Bunting P., Verbesselt J., Armston J. Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 158. P. 156–168.
25. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 57. No. 3. P. 167–184. DOI: 10.1016/0034-4257(96)00039-9.



## 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

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The article analyzes the parameters of vegetation cover natural dynamics within the forest-steppe zone in the territory of the Central Chernozem Region. Landscapes experiencing minimal anthropogenic impact were studied, such as small-dry-valleys and abandoned agricultural lands. During the mid-1980s to the end of the 2010s, an increase of differences in forest cover of small-dry-valleys was established between the northern and southern parts of the forest-steppe. The rate of forest cover increase differs significantly between forest-steppe physical-geographical subzones. The ratio of dry-valleys forest cover between the northern and southern forest-steppe increased from 1.6 in the mid-1980s to 2.5 in the late 2010s. There were statistically significant differences in dry-valleys forest cover between the forest-steppe subzones in 2018, which did not exist in the mid-1980s. The modern forest cover of abandoned agricultural lands in the northern forest-steppe is 7 times higher than this indicator in the southern forest-steppe. Abandoned lands located in various forest-steppe subzones differ significantly in the parameters of NDVI long-term dynamics in 2000–2018. In the northern forest-steppe, a positive statistically significant dynamics of the vegetation index was established. In the typical forest-steppe, NDVI dynamics is present, but it is less pronounced. In the southern forest-steppe, no statistically significant dynamics of the vegetation index was revealed. The established trends serve as indicators of increasing intrazonal differences in the natural vegetation cover within the forest-steppe zone.

**Keywords:** forest-steppe zone, small-dry-valleys, abandoned lands, intrazonal differences, reforestation, spectral response, remote sensing

Accepted: 09.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192

## References

1. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P., Remote maintenance of forest-forming process in taiga forests after their cutting in the Russian Plain, *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 29–38 (in Russian).
2. Kashnitskii A. V., Khovratovich T. S., Balashov I. V., The organization of remote sensing data processing for solving the problems of deforestation detection in large areas, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 103–111 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111.
3. Koroleva N. V., Tikhonova E. V., Ershov D. V., Saltykov A. N., Gavriluk E. A., Twenty-five years of reforestation on nonforest lands in Smolenskoe Poozerye national park according to Landsat imagery assessment, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 719–728.
4. Rusanov A. M., Natural restoration of agricultural landscapes of the steppe and forest-steppe zones of the Orenburg region, *Stepnoi byulleten'*, 2012, No. 36, pp. 8–12 (in Russian).
5. Terekhin E. A., Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 142–156 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
6. Terekhin E. A., Spatio-temporal assessment of forest cover of small-dry-valleys in the Central Russian forest-steppe using spectral response, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 4, pp. 84–96 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961421040060.
7. Terekhin E. A., Chendev Yu. G., Satellite-Derived Spatiotemporal Variations of Forest Cover in Southern Forest-Steppe, Central Russian Upland, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, No. 7, pp. 780–786, DOI: 10.1134/S1995425519070102.
8. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie tsentral'nykh chernozemnykh oblastei* (Physico-geographical zoning of the central chernozem region), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1961, 263 p. (in Russian).
9. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. B., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian).

10. Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A., Vladimirova N., Radeloff V. C., Landsat remote sensing of forest windfall disturbance, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143, pp. 171–179.
11. Biró M., Molnár Z., Öllerer K., Demeter L., Bölöni J., Behind the general pattern of forest loss and gain: A long-term assessment of semi-natural and secondary forest cover change at country level, *Landscape and Urban Planning*, 2022, Vol. 220, Art. No. 104334.
12. Chendev Yu. G., Hubbart J. A., Terekhin E. A., Lupo A. R., Sauer T. J., Burras C. L., Recent afforestation in the Iowa river and Vorskla river basins: A comparative trends analysis, *Forests*, 2016, Vol. 7(11), Art. No. 278, DOI: 10.3390/f7110278.
13. Chendev Yu., Gennadiev A., Sauer T., Terekhin E., Matveev S. M., Forests advancements to grasslands and their influence on soil formation: forest steppe of the Central Russian Upland, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Intern. Scientific and Practical Conf. "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" (Forestry-2019)*, 2019, Vol. 392, Art. No. 012003, DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012003.
14. Didan K., MOD13Q1 v006, *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006, available at: <https://lp-daac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>.
15. Ershov D. V., Gavriluk E. A., Koroleva N. V., Belova E. I., Tikhonova E. V., Shopina O. V., Titovets A. V., Tikhonov G. N., Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 2, Art. No. 322, DOI: 10.3390/rs14020322.
16. 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, No. 1, pp. 195–213.
17. Kolečka N., Greening trends and their relationship with agricultural land abandonment across Poland, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 257, Art. No. 112340.
18. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, Version 5.0*, USGS, Department of the Interior, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 114 p., available at: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
19. Lisetskii F. N., Chernyavskikh V. I., Degtyar O. V., Pastures in the zone of temperate climate: Trends for development, dynamics, ecological fundamentals of rational use, In: *Pastures: Dynamics. Economics and Management*, New York: Nova Science Publishers, 2010, pp. 51–84.
20. Liu W., Song C., Schroeder T. A., Cohen W. B., Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, pp. 3855–3872.
21. Morresi D., Vitali A., Urbinati C., Garbarino M., Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 3, Art. No. 308, DOI: 10.3390/rs11030308.
22. Pickell P. D., Hermosilla T., Frazier R. J., Coops N. C., Wulder M. A., Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, pp. 138–149.
23. Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43.
24. Schmidt M., Lucas R., Bunting P., Verbesselt J., Armston J., Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 158, pp. 156–168.
25. Valor E., Caselles V., Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 57, No. 3, pp. 167–184, DOI: 10.1016/0034-4257(96)00039-9.