

## Оценка процессов лесовозобновления на залежах европейской территории России с использованием многолетних изменений спектрально-отражательных характеристик

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*

Лесовозобновление выступает одним из значительных естественных изменений в растительном покрове оставленных аграрных угодий, расположенных на европейской территории России (ЕТР). Изложены результаты, характеризующие территориальные различия в интенсивности лесовозобновления на залежах, типичных для лесной, лесостепной и степной зон ЕТР. Различия в скорости лесообразовательного процесса наблюдаются не только между природными зонами, но и в их пределах, в границах физико-географических подзон. Наибольшая интенсивность лесовозобновления зафиксирована на юге лесной зоны — в подзоне широколиственно-сосновых лесов. Установлено, что индикаторами пространственных особенностей лесовозобновления на залежах могут выступать величина критерия tau Манна–Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда спектрального индекса NDVI, рассчитанные на основе многолетних рядов его значений, измеренных в период вегетации. Оба показателя тесно коррелируют с фактической среднегодовой величиной прироста лесистости и находятся в прямой зависимости от неё. Диапазон варьирования величины tau Манна–Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI может быть использован для описания различий в годовом приросте лесистости залежей. Оба показателя демонстрируют пространственные различия в скорости лесовозобновления между природными зонами и в их границах.

**Ключевые слова:** оставленные аграрные земли, лесовозобновление, европейская территория России, вегетационные индексы, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 22.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-233-244

### Введение

Залежные земли во многих регионах европейской территории России (ЕТР) выступают актуальным объектом для анализа естественной динамики растительности. Обусловлено это тем, что после прекращения аграрной деятельности на них начинаются процессы формирования естественных типов растительных сообществ, присущих конкретным природным зонам (Владыченский и др., 2012; Курганова и др., 2021). Распространение залежей в ЕТР (Люри и др., 2010) открывает возможности для оценки территориальных различий в сукцессионных процессах, происходящих на них.

В начале XXI в. одним из наиболее значимых изменений растительного покрова залежей, расположенных в различных природных зонах, выступают процессы лесовозобновления. Учитывая, что формирование лесных насаждений изменяет объём наземной фитомассы (Иванов и др., 2020) и потоки углерода (Баева и др., 2017; Bonan, 2008; Fradette et al., 2021), а также влияет на биоразнообразие (Nordén et al., 2021) и микроклиматические особенности (Wang et al., 2020), исследование процессов лесовозобновления на залежах становится достаточно актуальной задачей. Формирование ассоциаций древесной растительности на участках оставленных аграрных угодий характеризуется различиями в пространстве и во времени (Терехин, 2021a; Levers et al., 2018; Lisetskii et al., 2015). Вследствие этого его анализ требует использования многолетних рядов измерений, проводимых на всех исследуемых объектах. В силу отсутствия возможности получения соответствующего объёма информации с помощью

полевых методов единственным вариантом решения подобной задачи становится использование разновременных спутниковых снимков. Условием применения данных дистанционного зондирования в таком случае становится наличие количественных связей между величиной покрытия залежей древесной растительностью или их лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками.

К настоящему времени в исследованиях показано, что материалы спутниковой съёмки выступают незаменимым элементом при выявлении и оценке состояния залежных земель (Goga et al., 2019; Löw et al., 2018; Yin et al., 2020). Использование методов количественного анализа спектрального отклика на основе многозональных снимков при этом представляется основным способом анализа оставленных аграрных земель. Формирование лесных насаждений на залежных землях оказывает статистически значимое влияние на спектрально-отражательные характеристики в некоторых зонах спектра, а также на значения вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Терехин, 2020; Шевырнов и др., 2018). Возможность формирования его многолетних рядов на анализируемые объекты позволяет получать представление о тенденциях изменения растительного покрова залежных земель (Терехин, 2021б; Estel et al., 2016; Zhu et al., 2021). Вместе с этим открывается возможность пространственно-временного анализа интенсивности лесовозобновления на залежах в различных природно-климатических условиях.

Цель работы — пространственный анализ лесовозобновления на оставленных аграрных угодьях, типичных для европейской территории России: лесной, лесостепной и степной природных зон. Задачи исследования включали изучение интенсивности лесовозобновления на залежах ЕТР в период, охватывающий первые два десятилетия XXI в., и пространственно-временной анализ многолетних изменений спектрально-отражательных характеристик залежных земель в аналогичный период.

## Материалы и методика исследования

Для анализа сформирована пространственная выборка залежей, расположенных в различных природно-климатических условиях европейской территории России от лесной зоны на севере до зоны степи на юге. Подбор объектов осуществлён на основе разновременных спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м) периода 2000–2018 гг., полученных преимущественно из сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth), а также с использованием многозональных космических снимков Landsat-8 OLI (*англ.* Operational Land Imager) 2018 г.

Залежи для исследования подбирали таким образом, чтобы они были одного возраста, выведены из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг. и не использовались как минимум до конца второго десятилетия XXI в. (2018). Возраст анализируемых залежных земель составлял, таким образом, порядка 18 лет. Учёт этого критерия проводился на основе анализа серий разновременных снимков для всего исследуемого периода. На изучаемых залежах должны были формироваться древесные сообщества из лиственных пород, либо древесная растительность должна была отсутствовать. Залежи с хвойными породами не учитывались, так как спектральный отклик хвойных и лиственных лесных насаждений несколько различается и совместный пространственный анализ разных типов залежных земель мог привести к некорректным результатам. Площадь анализируемых угодий должна была быть не менее 20–30 га для обеспечения корректности оценки их спектрального отклика. Анализируемые залежные земли не должны были находиться на участках повышенного увлажнения. Учёт перечисленных критериев был необходим для объективного пространственного анализа скорости лесовозобновления на оставленных аграрных землях и обусловленной ими динамики спектрально-отражательных характеристик.

Формирование выборки залежей проводилось таким образом, чтобы на её основе был возможен анализ территориальных закономерностей в интенсивности лесовозобновления

и спектрально-отражательных характеристиках залежных земель. Их выявление осуществляли в пределах спутниковых сцен Landsat-8 OLI (8 единиц) конца второго десятилетия XXI в., на которые удалось подобрать безоблачные изображения близких сроков периода вегетации (преимущественно август), использовавшиеся для анализа типов лесных насаждений на залежах. Снимки Landsat-8 OLI, благодаря наличию инфракрасных каналов и высокому радиометрическому разрешению, позволяют достаточно точно разделять лиственные и хвойные лесные насаждения, формирующиеся на оставленных аграрных землях. В общей сложности для анализа было выявлено и изучено почти 350 залежных земель (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики выявленных и изученных залежных земель в пределах европейской территории России

Природная зона	Число изученных залежей	Площадь общая, га	Площадь средняя, га
Лесная	89	5704,3	64,1
Лесостепная	215	13041,4	60,7
Степная	45	2816,9	62,6
Всего	349	21562,6	61,8

Для каждой выявленной залежи с использованием снимков сверхвысокого пространственного разрешения была оценена величина покрытия древесной растительностью в конце второго десятилетия XXI в. (2018). С учётом одинакового возраста залежей её показатели позволили провести оценку среднегодовой величины прироста лесистости исследуемых угодий в период 2000–2018 гг. для отдельных природных зон.

На следующем этапе для каждой залежи был рассчитан многолетний ряд спектрального индекса NDVI в период 2000–2018 гг. Значения NDVI получены на основе информационных продуктов MOD13Q1 (Heck et al., 2019), включающих 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса (Robinson et al., 2017). Многолетний ряд охватывал значения индекса периода вегетации с начала апреля по конец октября, т.е. включал почти 250 измерений. Для залежных земель были изучены характеристики вегетационного индекса, которые ранее (Терехин, 2021б) были определены как возможные индикаторы скорости лесовозобновления на оставленных аграрных землях. К ним относятся абсолютная величина критерия  $\tau$  (tau) по непараметрическому тесту Манна–Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда NDVI.

Непараметрический критерий Манна–Кендалла — индикатор непрерывной статистически значимой тенденции. Его вычисление осуществлено с использованием программного пакета R. Угловой коэффициент линейного тренда NDVI рассчитан на основе рядов спектрального индекса, включающих его значения периода вегетации для каждого года. Для обоих показателей многолетней динамики вегетационного индекса выполнен количественный анализ связи с величиной проективного покрытия залежей древесной растительностью.

Заключительный этап исследования состоял в вычислении и анализе картосхем территориального изменения среднегодовой величины прироста лесистости и спектрально-отражательных характеристик залежей. Для подготовки картосхем использованы методы пространственной интерполяции, реализуемые в геоинформационных приложениях.

## Результаты и их обсуждение

Среднегодовая величина прироста лесистости залежных земель в период 2000–2018 гг. существенно и статистически значимо различалась между изученными природными зонами европейской территории России (табл. 2). Аналогичные статистически значимые различия (уровень значимости 0,05) между залежами природных зон ЕТР выявлены и по параме-

трам многолетней динамики вегетационного индекса в первые два десятилетия XXI в.: tau Манна – Кендалла и угловому коэффициенту линейного тренда.

Таблица 2. Параметры среднегодовой величины прироста лесистости, tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI для залежных земель природных зон ЕТР в первые два десятилетия XXI в.

Природная зона	Величина прироста лесистости		tau Манна – Кендалла NDVI		Коэффициент наклона линейного тренда NDVI	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Лесная	0,030	0,014	0,17	0,07	2,75	1,14
Лесостепная	0,020	0,017	0,11	0,10	1,85	1,55
Степная	0,004	0,005	-0,04	0,08	-0,38	1,16

В ряду «лесная зона – лесостепь – степь» наблюдается последовательное снижение среднегодовой величины прироста залежей и характеристик многолетних рядов вегетационного индекса. В лесной зоне скорость лесовозобновления в среднем в 1,5 раза выше, чем в лесостепной зоне, и во столько же раз выше величина tau Манна – Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда NDVI. На изученной территории степной зоны признаков лесовозобновления практически не наблюдается, что аналогично проявляется и на показателях многолетней динамики вегетационного индекса.

На более низком территориальном уровне (физико-географических подзон) особенности среднегодовой величины прироста лесистости и параметров многолетней динамики NDVI залежей более сложные (рис. 1).

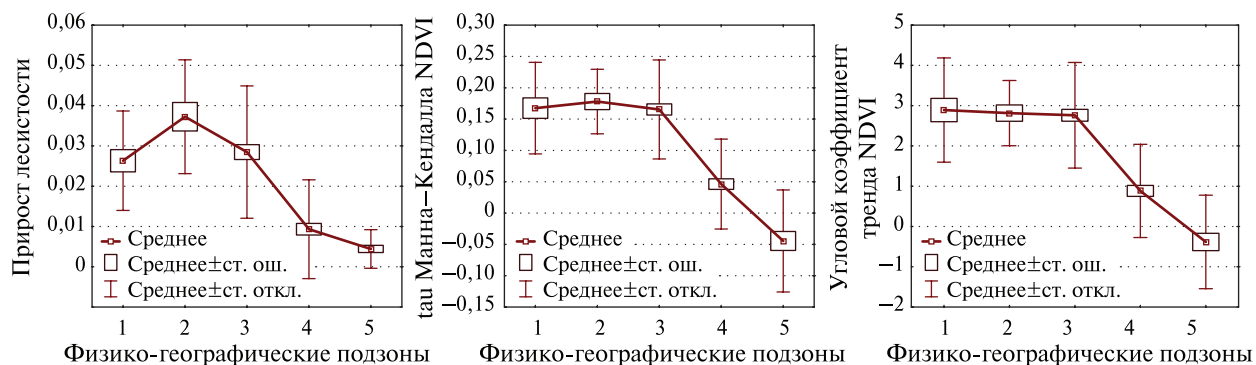


Рис. 1. Параметры среднегодовой величины прироста лесистости, tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI в 2000–2018 гг. для залежей ЕТР. Подзоны: 1 – широколиственно-хвойно-подтаёжных лесов; 2 – широколиственно-сосновых лесов; 3 – северной лесостепи; 4 – типичной и южной лесостепи; 5 – разнотравно-дерновинно-злаковых степей

При движении с севера на юг в пределах ЕТР среднегодовая величина прироста лесистости залежей растёт в пределах лесной зоны: от подзоны широколиственно-хвойно-подтаёжных лесов к подзоне широколиственно-сосновых лесов. От подзоны широколиственно-сосновых лесов на юг она последовательно снижается в подзонах лесостепной зоны и зоны степи. Величина tau Манна – Кендалла, рассчитанная на основе рядов NDVI 2000–2018 гг., показала близкие закономерности. Но для неё отличия подзоны широколиственно-сосновых лесов, т.е. подзоны, в которой выявлена наиболее высокая среднегодовая величина прироста лесистости залежей, от граничащих с ней подзон значительно меньше. Величина углового коэффициента линейного тренда NDVI в 2000–2018 гг. также выявила различия между тремя

самыми южными подзонами, но не показала значимых различий между подзоной широколиственно-сосновых лесов и близлежащими подзонами. Величина tau Манна – Кендалла NDVI, таким образом, показала более высокую эффективность для оценки среднегодовой величины прироста лесистости залежей, чем величина углового коэффициента линейного тренда NDVI.

Величина критерия tau Манна – Кендалла, вычисленная на основе многолетних рядов NDVI 2000–2018 гг., характеризуется высокой корреляцией со среднегодовой величиной прироста лесистости залежей. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,79 на уровне значимости 0,05. Коэффициент корреляции Спирмена – 0,83 на аналогичном уровне статистической значимости. Угловой коэффициент линейного тренда NDVI характеризуется несколько меньшей теснотой связи со среднегодовой величиной прироста лесистости залежей. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена для него составили 0,78 и 0,82 на уровне значимости 0,05. Более высокие значения непараметрического критерия Спирмена, чем параметрического критерия Пирсона, в случае обоих показателей выступают индикаторами нелинейной связи между параметрами многолетней динамики вегетационного индекса и среднегодовой величиной прироста лесистости залежных земель.

Величина tau Манна – Кендалла NDVI и углового коэффициента его линейного тренда, рассчитанные на основе многолетних рядов 2000–2018 гг., находятся в прямой зависимости от среднегодовой величины прироста лесистости залежей. Она наиболее полно аппроксимируется статистически значимой логит-кривой (рис. 2) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,65$  для tau Манна – Кендалла и  $R^2 = 0,63$  для углового коэффициента линейного тренда NDVI.

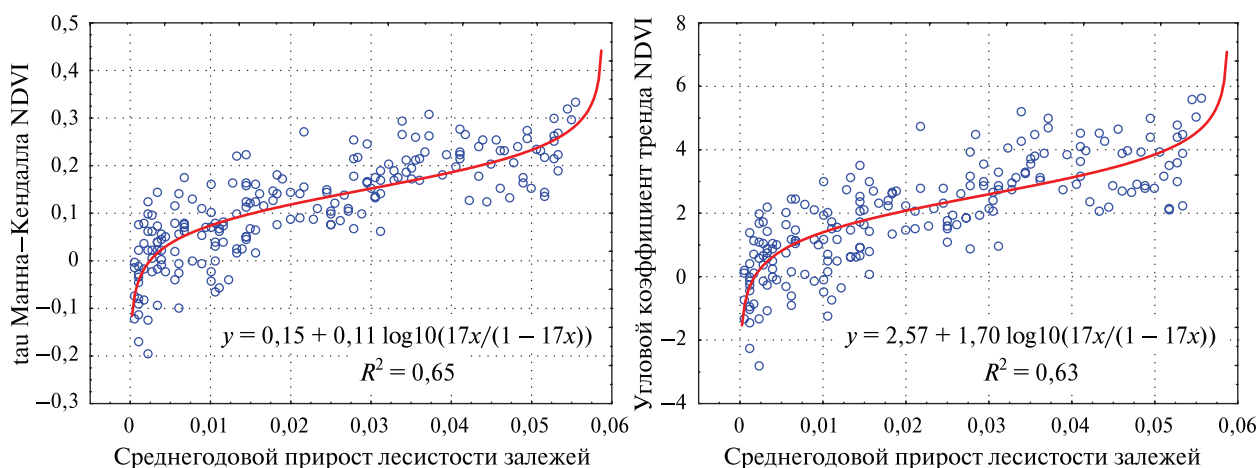


Рис. 2. Зависимости tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI в 2000–2018 гг. от среднегодовой величины прироста лесистости залежей ЕТР

Для описания связи между среднегодовой величиной прироста лесистости залежей и показателями многолетней динамики NDVI может быть также использована логарифмическая модель, но она характеризуется меньшими, хотя и статистически значимыми, коэффициентами детерминации:  $R^2 = 0,62$  для tau Манна – Кендалла NDVI и  $R^2 = 0,59$  для углового коэффициента линейного тренда вегетационного индекса.

Наличие статистически значимых зависимостей между величиной среднегодового прироста лесистости залежей и показателями многолетней динамики вегетационного индекса выступает основанием для их использования в решении задач, связанных с пространственной оценкой интенсивности лесовозобновления на оставленных аграрных землях ЕТР.

Величина tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI, рассчитанные на основе многолетних рядов индекса 2000–2018 гг. для периодов вегетации, характеризуются последовательным увеличением, происходящим по мере роста величины прироста лесистости залежей (табл. 3).



Таблица 3. Соотношение между градациями среднегодовой величины прироста лесистости, величины tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI

Градации среднегодовой величины прироста лесистости залежей	tau Манна – Кендалла		Угловой коэффициент линейного тренда NDVI	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
0,00–0,01	0,01	0,07	0,37	1,08
0,01–0,02	0,08	0,08	1,33	1,23
0,02–0,03	0,13	0,07	2,21	1,12
0,03–0,04	0,20	0,05	3,33	0,95
0,04–0,06	0,22	0,06	3,54	1,05

Параметры tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI, рассчитанные для отдельных градаций прироста лесистости залежей, отражают прямую связь между ними и одновременно показывают снижение различий только самыми большими градациями прироста лесистости залежных земель (рис. 3), т. е. соответствующих наибольшей выявленной интенсивности лесовозобновления.

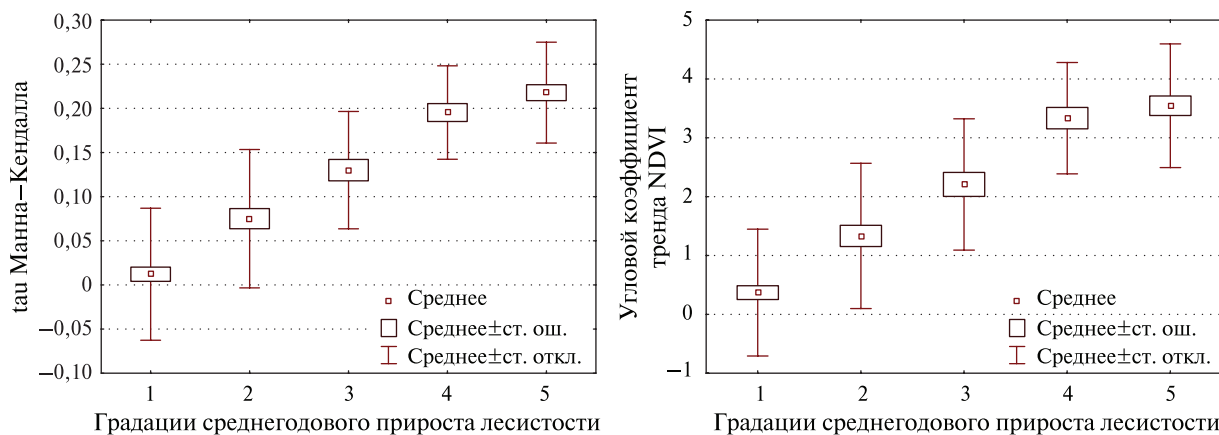


Рис. 3. Значения параметров tau Манна – Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI в 2000–2018 гг. для градаций среднегодового прироста лесистости залежей: 1 — 0,00–0,01; 2 — 0,01–0,02; 3 — 0,02–0,03; 4 — 0,03–0,04; 5 — 0,04–0,06

По результатам дисперсионного анализа установлено, что статистически значимые различия по значениям tau Манна – Кендалла и угловому коэффициенту линейного тренда NDVI наблюдаются для всех градаций среднегодовой величины прироста лесистости залежей, за исключением самых больших градаций. Полученные результаты подтверждают возможность использования значений обеих характеристик вегетационного индекса в качестве индикаторов скорости лесовозобновления на залежных землях.

Территориальный анализ, проведённый для среднегодовой величины прироста лесистости залежных земель, показал её последовательное изменение от максимальных значений на юге лесной зоны (подзона широколиственно-сосновых лесов) до практически нулевых значений в степной зоне — подзоне разнотравно-дерновинно-злаковых степей (рис. 4, см. с. 239). Лесовозобновление на залежных землях отражает, таким образом, зональные и внутризональные различия, проявляющиеся в данном случае в пределах изученной территории лесостепи. Пространственные различия в интенсивности лесовозобновления преимущественно субмеоридональные. Выраженных субширотных различий и пространственных трендов в интенсивности лесовозобновления на залежах в пределах европейской лесостепи и изученной части ЕТР не выявлено.

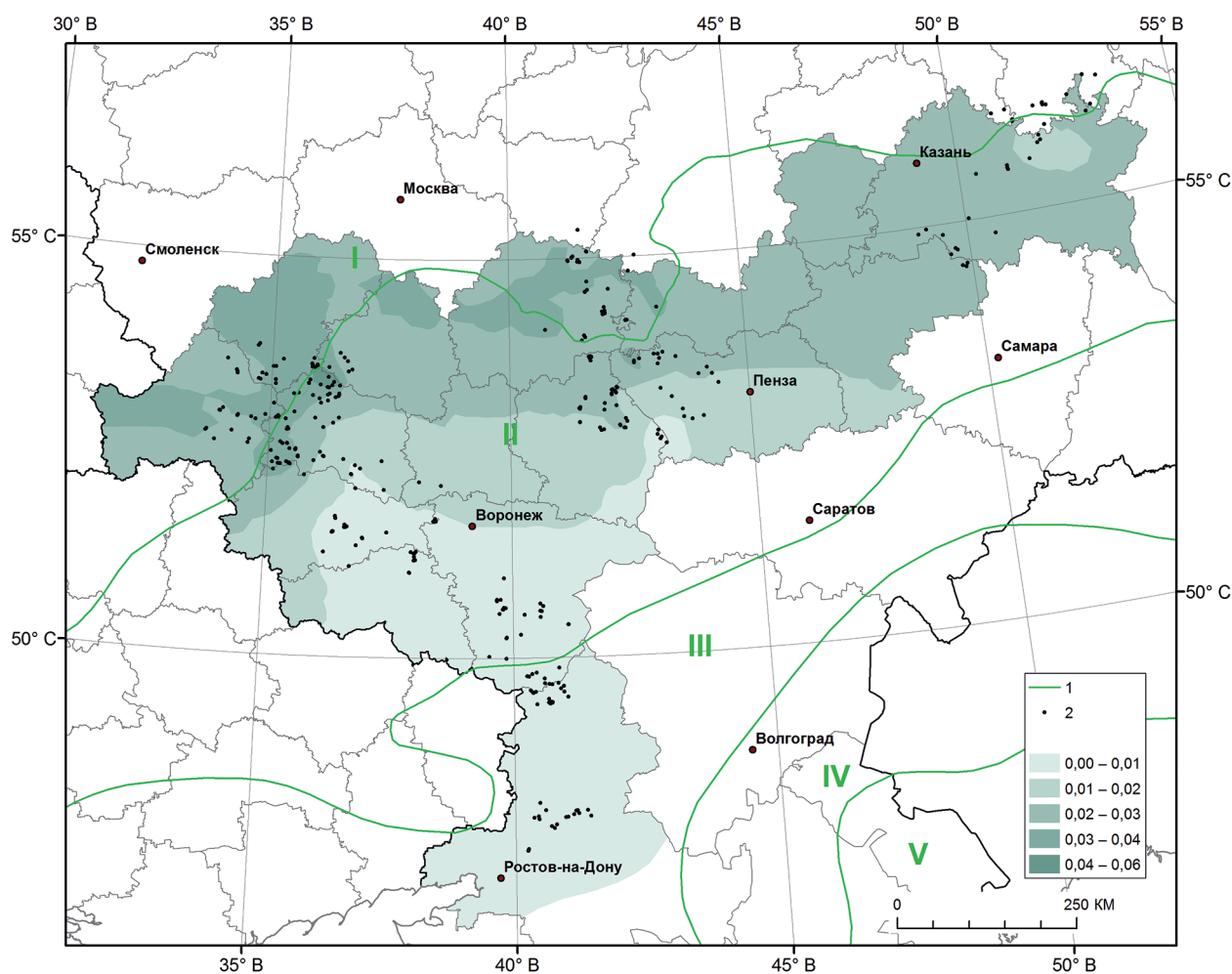


Рис. 4. Территориальное изменение среднегодовой величины прироста лесистости для залежей ЕТР в период 2000–2018 гг.: 1 — границы природных зон, 2 — изученные залежи; I — лесная зона, II — лесостепь, III — зона степей, IV — зона полупустынь, V — зона пустынь

Из полученной картосхемы следует, что наиболее существенные изменения в скорости лесовозобновления наблюдаются при переходе от южной границы лесной зоны до южной границы зоны лесостепи. Расстояние, на котором происходит снижение от практически максимальных до минимальных значений годового прироста лесистости залежей, находится в диапазоне 180–250 км. Наибольшее пространственное изменение величины среднегодового прироста лесистости на всей изученной территории происходит с северо-запада на юго-восток, т. е. в целом совпадает с направлением смены границ природных зон и физико-географических подзон.

Пространственное изменение величины  $\tau$  Манна–Кендалла (рис. 5, см. с. 240) характеризуется близкими территориальными особенностями, как и изменение среднегодовой величины прироста лесистости залежей. Интервалы градаций  $\tau$  на картосхеме получены исходя из результатов статистического анализа её параметров для градаций прироста лесистости залежей (см. табл. 3). Они в значительной степени аналогичны интервалам между средними значениями  $\tau$ , соответствующими градациям прироста лесистости залежей.

Из сопоставления картосхем на рис. 4 и 5 видно, что отсутствие процессов лесовозобновления, т. е. околонулевая величина среднегодового прироста лесистости залежей, соответствует аналогичным или отрицательным значениям  $\tau$  Манна–Кендалла. Переход от максимальных до минимальных (околонулевых) значений  $\tau$  Манна–Кендалла происходит примерно на таком же расстоянии, что и аналогичный переход для среднегодовой величины прироста лесистости залежей.

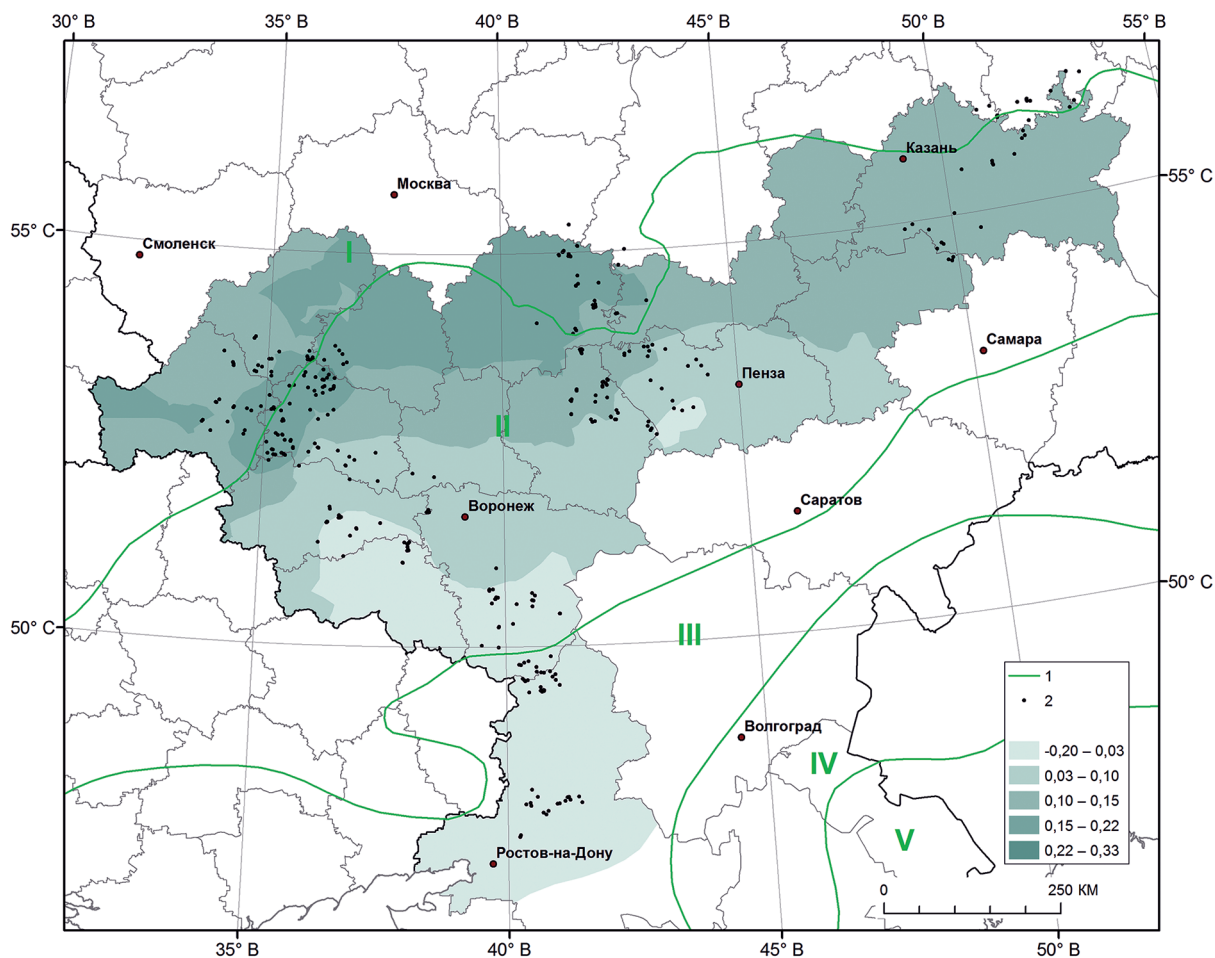


Рис. 5. Территориальное изменение критерия  $\tau$  Манна–Кендалла, рассчитанного на основе многолетних рядов NDVI 2000–2018 гг. для одновозрастных залежей ЕТР: 1 — границы природных зон, 2 — изученные залежи; I — лесная зона, II — лесостепь, III — зона степей, IV — зона полупустынь, V — зона пустынь

Пространственные закономерности, аналогичные территориальному изменению среднегодовой величины прироста лесистости на залежах, отражает и пространственное изменение углового коэффициента линейного тренда NDVI (рис. 6, см. с. 241). Градации для него установлены на основе интервалов между средними значениями углового коэффициента линейного тренда NDVI для анализируемых градаций величины прироста лесистости залежей (табл. 3).

Аналогично величине  $\tau$  Манна–Кендалла отрицательные и околонулевые значения углового коэффициента линейного тренда NDVI соответствуют территориям, для которых характерно отсутствие или низкие темпы лесовозобновления. Преимущественно это южная часть лесостепи и степная зона.

Следует отметить, что угловой коэффициент линейного тренда вегетационного индекса характеризуется несколько более трудоёмкой процедурой вычисления в сравнении с показателем абсолютной величины  $\tau$  Манна–Кендалла. В то же время из полученных данных следует, что оба показателя могут быть использованы для оценки пространственных особенностей лесовозобновления на оставленных аграрных угодьях.

В целом с учётом анализа параметров  $\tau$  Манна–Кендалла и углового коэффициента линейного тренда NDVI для залежей разных подзон ЕТР (см. рис. 1), а также статистического и пространственного анализа обоих показателей можно сделать вывод о большей эффективности  $\tau$  Манна–Кендалла как индикатора среднегодовой величины прироста лесистости залежных земель. В то же время с учётом достаточно высокой корреляции с ней и индикации общих территориальных закономерностей оба параметра многолетней динамики NDVI могут



быть использованы для пространственной оценки интенсивности лесовозобновления на залежных землях. Эти же критерии отражают зональные и внутризональные различия на европейской территории России.

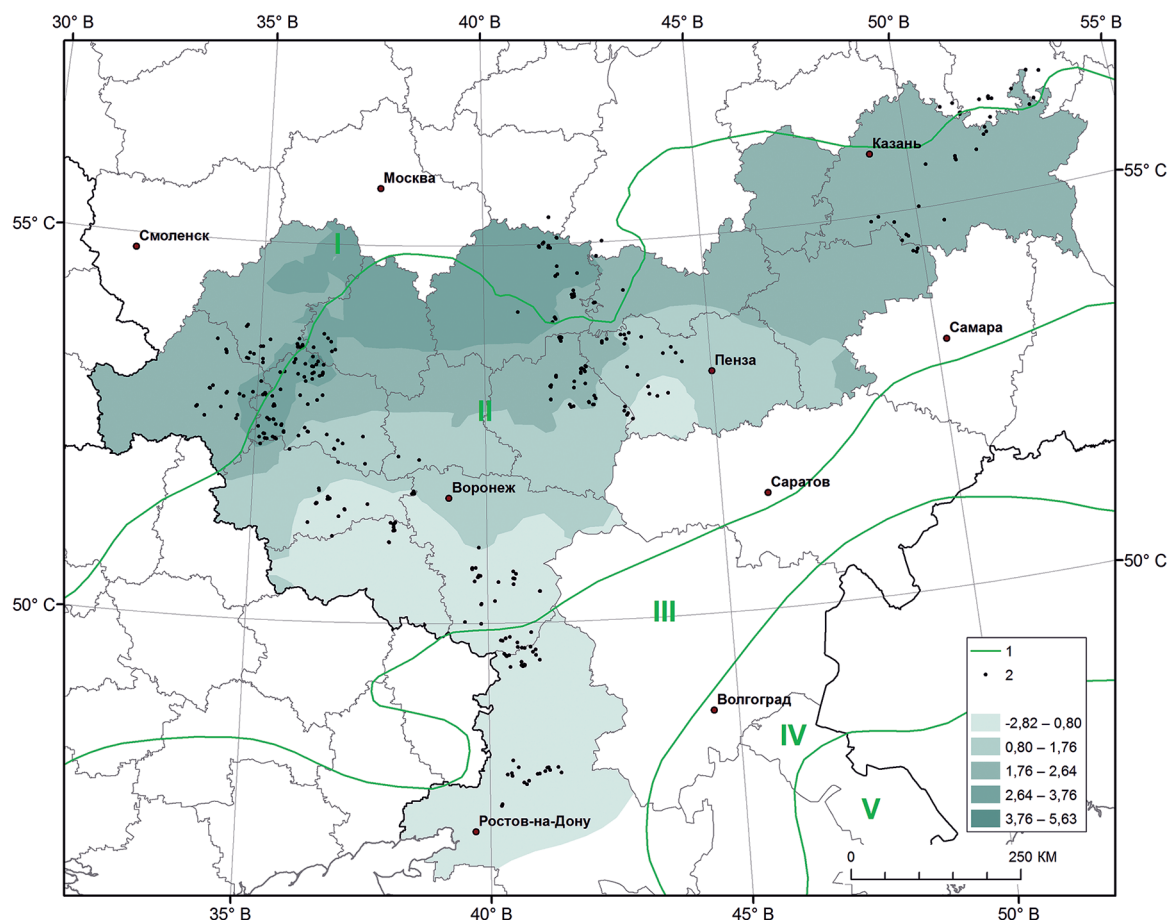


Рис. 6. Территориальное изменение углового коэффициента линейного тренда NDVI, рассчитанного на основе многолетних рядов NDVI 2000–2018 гг. для одновозрастных залежей ЕТР: 1 — границы природных зон, 2 — изученные залежи; I — лесная зона, II — лесостепь, III — зона степей, IV — зона полупустынь, V — зона пустынь

## Выводы

Интенсивность лесовозобновления на залежных землях европейской территории России от южной части лесной зоны до зоны степи характеризуется существенными зональными и внутризональными различиями. На основе материалов разновременной спутниковой съёмки установлено, что наиболее высокая среднегодовая величина прироста лесистости залежей в первые два десятилетия XXI в. выявлена на юге лесной зоны — в подзоне широколиственно-сосновых лесов. Индикаторами интенсивности лесовозобновления на залежных землях могут выступать величина критерия  $\tau$  Манна–Кендалла и угловой коэффициент линейного тренда NDVI, рассчитанные на основе многолетних рядов его значений вегетационного периода. В пределах ЕТР оба показателя характеризуются пространственными особенностями, аналогичными территориальному изменению среднегодовой величины прироста лесистости залежей. Параметры обоих показателей статистически значимо различаются для большинства её градаций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-67-46017.

## Литература

1. Баева Ю. И., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Овсепян Л. А., Телеснина В. М., Цветкова Ю. Д. Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. 2017. № 88. С. 47–74. DOI: 10.19047/0136-1694-2017-88-47-74.
2. Владыченский А. С., Телеснина В. М., Чалая Т. А. Влияние поступления растительного опада на биологическую активность почв южной тайги // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17: Почвоведение 2012. № 1. С. 3–10.
3. Иванов А. И., Иванова Ж. А., Соколов И. В. Вторичное освоение неиспользуемых угодий // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 2. С. 48–52. DOI: 10.31857/S2500-2627-2020-2-48-52.
4. Курганова И. Н., Телеснина В. М., Лопес де Гереню В. О., Личко В. И., Караванова Е. И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303. DOI: 10.31857/S0032180X21030102.
5. Люри Д. И., Горячкин С. В., Караванова Е. 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.
6. 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.
7. Терехин Э. А. (2021a) Многолетние изменения спектрально-отражательных признаков залежных земель в различных природно-климатических условиях европейской территории России в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 111–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122.
8. Терехин Э. А. (2021b) Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-797.
9. Шевырнов А. П., Письман Т. И., Кононова Н. А., Ботвич И. Ю., Ларько А. А., Высоцкая Г. С. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51. DOI: 10.31857/S020596140003367-4.
10. Bonan G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests // Science. 2008. V. 320. No. 5882. P. 1444–1449. DOI: 10.1126/science.1155121.
11. Estel S., Kuemmerle T., Levers C., Baumann M., Hostert P. Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series // Environmental Research Letters. 2016. V. 10. No. 2. Art. No. 024015. 11 p. DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/024015.
12. Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C. Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach // Forest Ecology and Management. 2021. V. 499. Art. No. 119565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>.
13. Goga T., Feranec J., Bucha T., Rusnák M., Sačkov I., Barka I., Kopecká M., Papčo J., O'ahel' J., Szatmári D., Pazúr R., Sedliak M., Pajtík J., Vladovič J. A Review of the Application of Remote Sensing Data for Abandoned Agricultural Land Identification with Focus on Central and Eastern Europe // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 23. Art. No. 2759. 19 p. <https://doi.org/10.3390/rs11232759>.
14. Heck E., de Beurs K. M., Owsley B. C., Henebry G. M. Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V. 156. P. 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011>.
15. Levers C., Schneider M., Prishchepov A. V., Estel S., Kuemmerle T. Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe // Science of The Total Environment. 2018. V. 644. P. 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.326>.
16. Lisetskii F., Stolba V. F., Marinina O. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea // Geoderma. 2015. V. 239–240. P. 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.006>.
17. Löw F., Prishchepov A. V., Waldner F., Dubovyk O., Akramkhanov A., Biradar C., Lamers J. P. A. Mapping Cropland Abandonment in the Aral Sea Basin with MODIS Time Series // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 2. 24 p. <https://doi.org/10.3390/rs10020159>.
18. Nordén B., Olsen S. L., Haug S., Rusch G. Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // Forest Ecology and Management. 2021. V. 489. Art. No. 119045. 21 p. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>.

19. Robinson P. N., Allred W. B., Jones O. M., Moreno A., Kimball S. J., Naugle E. D., Erickson A. T., Richardson D. A. A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 8. Art. No. 863. 14 p. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>.
20. Wang M., Wu J., Lafleur P. M., Luan J. Investigation of the climatological impacts of agricultural management and abandonment on a boreal bog in western Newfoundland, Canada // *Science of The Total Environment*. 2020. V. 711. Art. No. 134632. 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134632>.
21. Yin H., Brandão A., Buchner J., Helmers D., Iuliano B. G., Kimambo N. E., Lewińska K. E., Razenkova E., Rizayeva A., Rogova N., Spawn S. A., Xie Y., Radeloff V. C. Monitoring cropland abandonment with Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 246. Art. No. 111873. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111873>.
22. Zhu X., Xiao G., Zhang D., Guo L. Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI // *Science of The Total Environment*. 2021. V. 755. Art. No. 142651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142651>.

## Estimation of reforestation on abandoned agricultural lands in European Russia using long-term changes in spectral response

E. A. Terekhin

*Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia*  
E-mail: [terekhin@bsu.edu.ru](mailto:terekhin@bsu.edu.ru)

Reforestation is a significant natural change in the vegetation cover of abandoned agricultural lands in European Russia. The results describing the territorial differences in reforestation on abandoned lands typical of the forest, forest-steppe and steppe natural zones of European Russia were presented. Differences in reforestation are observed between natural zones and within them — within the boundaries of physical-geographical subzones. The highest intensity of reforestation was recorded in the south of the forest zone — in the subzone of broad-leaved-pine forests. The Mann – Kendall tau value and the slope coefficient of NDVI linear trend, calculated on the basis of long-term series of values, can be indicators of spatial differences in reforestation. Both indicators are closely correlated with the average annual gain in forest cover. The range of variation in the Mann – Kendall tau values and the slope coefficient of the NDVI linear trend can be used to describe differences in the annual gain of abandoned land forest cover. Both indicators show spatial differences in the reforestation between the natural zones and within their boundaries.

**Keywords:** abandoned agricultural lands, reforestation, European Russia, vegetation indices, remote sensing

Accepted: 22.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-233-244

### References

1. Baeva Yu. I., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Ovsepyan L. A., Telesnina V. M., Tsvetkova Yu. D., Change in aggregate structure of various soil types during the succession of abandoned lands, *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva*, 2017, No. 88, pp. 47–74 (in Russian), DOI: 10.19047/0136-1694-2017-88-47-74.
2. Vladychenskii A. S., Telesnina V. M., Chalaya T. A., Plant leaf-fall influence on biological activity of south taiga post-agrogenic soils, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17: Pochvovedenie*, 2012, No. 1, pp. 3–10 (in Russian).
3. Ivanov A. I., Ivanova Zh. A., Sokolov I. V., Secondary development of unused land, *Russian Agricultural Sciences*, 2020, Vol. 46, No. 3, pp. 274–278, <https://doi.org/10.3103/S1068367420030076>.
4. 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 Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 337–351, DOI: 10.1134/S1064229321030108.

5. Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Karavaeva N. A., Denisenko E. A., Nefedova T. G., *Dinamika sel'skokhozyaivennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (Dynamics of agricultural lands of Russia in XX century and postagrogenic restoration of vegetation and soils), Moscow: GEOS, 2010, 416 p. (in Russian).
6. 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.
7. Terekhin E. A. (2021a), Long-term changes in spectral response of abandoned agricultural lands in various climate and environmental conditions of European Russia in the early 21<sup>st</sup> century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 111–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122.
8. Terekhin E. A. (2021b), Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series, *Computer Optics*, 2021, Vol. 45, No. 2, pp. 245–252 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
9. Shevyrnogov A. P., Pisman T. I., Kononova N. A., Botvich I. Yu., Larko A. A., Vysotskaya G. S., Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Krasnoyarsk forest steppe according to ground and satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 6, pp. 39–51 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596140003367-4.
10. Bonan G. B., Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests, *Science*, 2008, Vol. 320, No. 5882, pp. 1444–1449, DOI: 10.1126/science.1155121.
11. Estel S., Kuemmerle T., Levers C., Baumann M., Hostert P., Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 10, No. 2, Art. No. 024015, 10 p., DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/024015.
12. Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C., Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modeling approach, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 499, Art. No. 119565, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>.
13. Goga T., Feranec J., Bucha T., Rusnák M., Sačkov I., Barka I., Kopecká M., Papčo J., O'ahel' J., Szatmári D., Pazúr R., Sedliak M., Pajtík J., Vladovič J., A Review of the Application of Remote Sensing Data for Abandoned Agricultural Land Identification with Focus on Central and Eastern Europe, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 23, Art. No. 2759, 19 p., <https://doi.org/10.3390/rs11232759>.
14. Heck E., de Beurs K. M., Owsley B. C., Henebry G. M., Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, Vol. 156, pp. 121–134, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011>.
15. Levers C., Schneider M., Prishchepov A. V., Estel S., Kuemmerle T., Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe, *Science of The Total Environment*, 2018, Vol. 644, pp. 95–111, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.326>.
16. Lisetskii F., Stolba V. F., Marinina O., Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea, *Geoderma*, 2015, Vol. 239–240, pp. 304–316, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.006>.
17. Löw F., Prishchepov A. V., Waldner F., Dubovyk O., Akramkhanov A., Biradar C., Lamers J. P. A., Mapping Cropland Abandonment in the Aral Sea Basin with MODIS Time Series, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 2, 24 p., <https://doi.org/10.3390/rs10020159>.
18. Nordén B., Olsen S. L., Haug S., Rusch G., Recent forest on abandoned agricultural land in the boreone-moral zone Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 489, Art. No. 119045, 21 p., <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>.
19. Robinson P. N., Allred W. B., Jones O. M., Moreno A., Kimball S. J., Naugle E. D., Erickson A. T., Richardson D. A., A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 8, Art. No. 863, 14 p. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>.
20. Wang M., Wu J., Lafleur P. M., Luan J., Investigation of the climatological impacts of agricultural management and abandonment on a boreal bog in western Newfoundland, Canada, *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 711, Art. No. 134632, 10 p., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134632>.
21. Yin H., Brandão A., Buchner J., Helmers D., Iuliano B. G., Kimambo N. E., Lewińska K. E., Razenkova E., Rizayeva A., Rogova N., Spawn S. A., Xie Y., Radeloff V. C., Monitoring cropland abandonment with Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 246, Art. No. 111873, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111873>.
22. Zhu X., Xiao G., Zhang D., Guo L., Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI, *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 755, Art. No. 142651, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142651>.