

Многолетние изменения спектрально-отражательных признаков залежных земель в различных природно-климатических условиях европейской территории России в 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 многолетней динамики вегетационного индекса NDVI в период 2000–2018 гг. для залежных земель трёх природных зон и шести физико-географических подзон европейской территории России. Изученные подзоны характеризуют смену условий от лесной до степной природной зоны. Установлено, что территориальное изменение значений NDVI, усреднённых за период вегетации в пределах подзон, отражает изменение доли древесной растительности, присутствующей на залежах. Наибольшая величина покрытия залежей древесной растительностью и наиболее высокие современные значения спектрального индекса зафиксированы на юге лесной зоны — в подзоне широколиственно-сосновых лесов. Наименьшие значения обоих показателей характерны для степной зоны — подзоны дерново-злаковых степей. Для оставленных аграрных угодий лесостепной зоны выявлены значительные внутризональные различия в многолетней динамике вегетационного индекса. Современные значения NDVI выше его средних многолетних величин для залежей большинства изученных природных зон. Положительная, статистически значимая тенденция вегетационного индекса характеризует процесс формирования древесной растительности на оставленных аграрных угодьях. Статистически значимая динамика NDVI установлена для залежей лесной зоны и подзоны северной лесостепи. На юге лесостепной зоны и в зоне степи статистически значимых тенденций в изменении вегетационного индекса в последние десятилетия не выявлено.

Ключевые слова: залежные земли, европейская территория России, природные зоны, вегетационные индексы, спектрально-отражательные признаки, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 11.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122

Введение

Залежные земли выступают одним из элементов ландшафта в районах аграрного использования. Вследствие изменений в сельском хозяйстве, особенно происходящих с конца XX в., оставленные аграрные угодья получили распространение в различных природных зонах европейской территории России (ЕТР). В период 1990–2007 гг. вывод из оборота сельскохозяйственных земель в её пределах составил порядка 28,4 млн га (Люри и др., 2010). Исследование состояния залежных земель и изменений их растительного покрова актуально для многих регионов России (Жукова, Адрианова, 2013; Лежнин, 2016; Парахневич, Кирик, 2017). Оно необходимо для оценки изменений почвенно-растительного покрова и решения вопросов дальнейшего использования оставленных аграрных угодий (Черкасов и др., 2009).

Вследствие прекращения распашки на залежах начинают развиваться сукцессионные процессы, особенности которых обуславливаются сочетанием природно-климатических условий для конкретных территорий (Lisetskii et al., 2010). Вследствие этого исследование направленности и интенсивности протекания сукцессий на залежах позволяет получить представление о тенденциях развития растительного покрова конкретных природных зон, а также в их пределах.

Объективная оценка сукцессионных процессов и их пространственно-временных закономерностей требует непрерывности наблюдений за состоянием растительного покрова

залежных земель. Значительные перспективы развития этого направления связаны с использованием современных возможностей регулярно получаемой спутниковой съёмки. Единовременная фиксация спектрально-отражательных характеристик на значительных территориях, происходящая периодически, наряду с развитием методов атмосферной и радиометрической коррекции снимков в настоящее время предоставляет уникальные возможности для анализа многолетней динамики отражательных свойств залежных земель, которая, в свою очередь, может выступать индикатором происходящих на них изменений растительного покрова. Одновременно спутниковые данные во многих случаях позволяют достаточно достоверно выявлять и картографировать залежные земли (Estel et al., 2015; Joshi et al., 2016; Yin et al., 2018). В связи с этим оценка возможностей спектрально-отражательных характеристик в настоящее время выступает одним из ключевых направлений дистанционного выявления и анализа оставленных аграрных угодий.

В начале XXI в. наиболее значительным процессом изменения растительного покрова угодий, выведенных в конце 1990-х – начале 2000-х гг. из сельскохозяйственного оборота, выступает формирование на них ассоциаций древесной растительности, которое наблюдается на залежах лесной (Медведев и др., 2019; Москаленко, Бобровский, 2014; Никонов, Смирнов, 2014) и лесостепной (Терехин, 2020) природных зон.

Происходящие изменения оказывают влияние на спектрально-отражательные признаки оставленных аграрных угодий в некоторых участках спектра, а также на значения индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), которые могут служить критерием скорости формирования лесных насаждений на залежах (Терехин, Постернак, 2019). Индекс NDVI основан на спектральных признаках в красном и ближнем инфракрасном диапазонах (Tucker, 1979; Valor, Caselles, 1996). Он достаточно широко применяется для анализа растительности, но вопросы его использования для оценки сукцессионных процессов на залежах во многом остаются открытыми. К настоящему времени благодаря накоплению архивов регулярно получаемой съёмки MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Justice et al., 2002) появилась возможность анализа многолетних рядов NDVI за период времени, охватывающий интервал около двух десятилетий (Heck et al., 2019) с 2000 г. для залежей разных природных зон. Становится актуальным их исследование для описания изменений растительности оставленных аграрных угодий и особенностей формирования на них древесных сообществ в различных природно-климатических условиях.

Цель исследования заключалась в изучении многолетней динамики вегетационного индекса NDVI в период 2000–2018 гг. для залежных земель европейской территории России, расположенных в природных условиях, изменяющихся от лесной зоны на севере до зоны степи на юге.

Материалы и методика исследования

Исследование проведено на примере залежей, расположенных в пределах европейской территории России от лесной зоны до зоны степи. Анализируемая совокупность угодий была сформирована таким образом, чтобы характеризовать последовательную смену природно-климатических условий. Исследуемые объекты располагались в трёх природных зонах и шести физико-географических подзонах. Подзоны являются таксономическими единицами более низкого уровня, чем природные зоны. Они характеризуют внутризональные различия в их пределах по соотношению тепла и влаги (Мильков, 1977; Прокаев, 1983), которые могут отражаться на региональных особенностях естественного растительного покрова, а также сукцессионных процессах. В лесной зоне были изучены залежи подзоны широколиственно-хвойноподтаёжных лесов и подзоны широколиственно-сосновых лесов. В лесостепной зоне объекты располагались в подзоне северной лесостепи и подзоне типичной и южной лесостепи, т. е. полностью охватывали лесостепь с севера на юг. В степной зоне изученные угодья находились в подзоне разнотравно-дерновинно-злаковых степей и подзоне дерновинно-злаковых степей. Изученные подзоны последовательно сменяли друг друга с севера на юг.

Подбор залежей для исследования осуществлён методом анализа территорий разных природных зон на основе спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения (1 м/пиксель), полученных из веб-сервисов открытого доступа, преимущественно Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Наборы разновременных снимков соответствующей детальности предоставляют возможность выявления залежных земель по ряду прямых дешифровочных признаков, таких как отсутствие следов распашки и сельскохозяйственной обработки или особенности структуры на изображениях, которые формирует их растительный покров.

Для обеспечения корректного сравнения многолетних рядов вегетационного индекса залежей разных природных зон анализируемые объекты подбирали с учётом ряда критериев: 1) угодья должны были быть выведены из севооборота в начале 2000-х гг. и с этого времени по 2018 г. непрерывно находиться в состоянии залежи; 2) на залежных землях в анализируемый период должны отсутствовать признаки нарушений растительного покрова вследствие антропогенной деятельности; 3) оставленные аграрные угодья должны располагаться в аналогичных геоморфологических условиях и условиях увлажнения.

Отсутствие признаков распашки и нарушений растительного покрова определяли на основе совместного анализа разновременных снимков из Google Earth и данных Landsat периода 2000–2018 гг. Учитывая ограничения пространственного разрешения снимков MODIS и информационных продуктов на их основе, для анализа спектрально-отражательных характеристик отбирали угодья не меньше 30 га. Вследствие того, что спектрально-отражательные признаки лиственных и хвойных пород несколько различны и их анализ в одной выборке может дать некорректные результаты, для исследования отбирали только залежи с лиственными породами и оставленные аграрные угодья без древесной растительности. В общей сложности было отобрано 366 участков залежных земель, представляющих различные природно-климатические условия ЕТР (*табл. 1*)

Таблица 1. Характеристики проанализированных залежных земель

Природная зона	Физико-географическая подзона	Число объектов	Площадь, га
Лесная	Подзона широколиственно-хвойноподтаёжных лесов	32	2331,5
	Подзона широколиственно-сосновых лесов	42	2132,5
Лесостепная	Подзона северной лесостепи	106	6858,1
	Подзона типичной и южной лесостепи	109	6183,3
Степная	Подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей	45	2816,9
	Подзона дерновинно-злаковых степей	32	3332,8
Всего		366	23655,1

С использованием возможностей геоинформационных систем для каждой залежи был подготовлен векторный контур, полученный методом оцифровки угодья по спутниковым данным, на основе которых производили их выявление. Таким способом был получен геоинформационный слой оставленных аграрных угодий. Для каждого из них была определена площадь, принадлежность к определённой природной зоне и физико-географической подзоне, наличие древесной растительности либо её отсутствие, измерена современная (2018) величина покрытия древесной растительностью. С использованием подготовленного векторного слоя в дальнейшем были оценены спектрально-отражательные характеристики залежных земель.

Оценку породного состава лесных насаждений, формирующихся на залежах (лиственный, хвойный или смешанный), осуществляли на основе спутниковых данных Landsat-8 OLI летнего периода 2018 г., подобранных для всех анализируемых объектов. Залежи с лиственным породным составом выявляли на основе визуального анализа снимков в комбинации каналов инфракрасного и красного диапазонов. Преимущественно использовали вариант синтеза

SWIR2–SWIR1–RED (SWIR — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный; RED — *англ.* красный), охватывающий диапазоны 2,1–2,3; 1,56–1,66; 0,64–0,68 мкм. Величину покрытия залежей древесной растительностью определяли на основе спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения, полученных из Google Earth.

В качестве анализируемой спектральной характеристики залежей был выбран вегетационный индекс NDVI, основанный на коэффициентах спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном каналах. Значения индекса были рассчитаны с использованием информационных продуктов MOD13Q1 (Didan, 2015). Они представляют 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса NDVI, вычисляемые на основе атмосферно и радиометрически откорректированных снимков MODIS с пространственным разрешением 250 м/пиксель. На текущий момент это единственный тип спутниковых данных, позволяющий проанализировать многолетнюю динамику спектрально-отражательных признаков для конкретных угодий за период около двух десятилетий с начала 2000 г. Интервал исследований охватывал 2000–2018 гг., т. е. практически максимально возможный временной диапазон с начала работы сенсора MODIS. Для каждой залежи был рассчитан многолетний ряд NDVI, включающий его значения периода вегетации (с начала апреля по конец октября) каждого анализируемого года, т. е. охватывающего по 13 временных срезов в каждый год. Для подавляющего большинства залежей, таким образом, временной ряд NDVI насчитывал 247 значений. Их вычисляли методом зональной статистики, т. е. определяли среднее значение индекса в пределах контура оставленного аграрного угодья.

На основе полученных данных были оценены статистические параметры вегетационного индекса для каждой природной зоны и подзоны, осуществлено их сравнение с современными характеристиками растительного покрова залежных земель. После этого рассчитали и проанализировали с использованием программы Statistica средний многолетний ряд NDVI для залежей каждой анализируемой физико-географической подзоны. Для них была рассчитана линия тренда и оценена значимость трендовой составляющей временного ряда. Её анализ был осуществлён с использованием непараметрического критерия Манна–Кендалла (в программной среде R), который является индикатором монотонной статистически значимой тенденции.

Результаты и их обсуждение

Оценка современных значений вегетационного индекса залежных земель на уровне природных зон показала (*табл. 2*), что их изменение при переходе от одной зоны к другой аналогично изменению современной величины покрытия оставленных аграрных угодий древесной растительностью, которая уменьшается от лесной зоны до зоны степи. При этом значения вегетационного индекса 2018 г. во всех природных зонах выше их средней многолетней величины NDVI периода 2000–2018 гг.

Таблица 2. Характеристики величины покрытия залежных земель древесной растительностью (в долях от 0 до 1) и NDVI в природных зонах ЕТР

Природная зона	Величина покрытия древесной растительностью в 2018 г.		NDVI в 2018 г.		NDVI среднемноголетний 2000–2018 гг.	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Лесная	0,52	0,25	0,66	0,16	0,60	0,15
Лесостепная	0,35	0,31	0,63	0,15	0,59	0,14
Степная	0,04	0,07	0,46	0,06	0,45	0,06

С учётом достаточно высокой корреляции значений индекса с долей древесной растительности, присутствующей на залежах (Терехин, 2020), выявленная особенность выступает

признаком тенденции формирования древесных сообществ на оставленных аграрных угодьях этих природных зон, преимущественно лесной и лесостепной.

NDVI оставленных аграрных угодий характеризует различия между природными зонами не только по абсолютной величине, но и по стандартному отклонению. В лесной и лесостепной зонах, где доля древесной растительности на залежах варьирует значительно выше, чем в степи, стандартные отклонения вегетационного индекса более высоки.

Различия залежных земель по характеристикам растительного покрова и особенностям тенденций его динамики могут проявляться не только на уровне природных зон, но и в их пределах, и анализ этого вопроса представляет более значительный научный интерес, так как проблема индикации внутризональных различий растительного покрова на основе спектрально-отражательных признаков во многом остаётся открытой. Проведённая оценка показала, что среди изученных подзон наиболее высокой долей древесной растительности и одновременно наиболее высокими значениями вегетационного индекса характеризуются залежи, расположенные в подзоне широколиственно-сосновых лесов (*табл. 3*). Она относится к южной части лесной зоны. Начиная с неё, при движении на юг до подзоны дерновинно-злаковых степей наблюдается последовательное снижение величины покрытия залежей древесной растительностью и значений вегетационного индекса. Подзоны в *табл. 3* расположены в последовательной смене с севера на юг.

Таблица 3. Характеристики величины покрытия залежей ЕТР древесной растительностью (в долях от 0 до 1) и NDVI в 2018 г.

Физико-географическая подзона и природная зона	Величина покрытия древесной растительностью		NDVI	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Подзона широколиственно-хвойноподтаёжных лесов, лесная зона	0,47	0,21	0,62	0,16
Подзона широколиственно-сосновых лесов, лесная зона	0,57	0,27	0,69	0,17
Подзона северной лесостепи, лесостепная зона	0,51	0,29	0,66	0,16
Подзона типичной и южной лесостепи, лесостепная зона	0,17	0,22	0,59	0,13
Подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей, степная зона	0,07	0,08	0,51	0,09
Подзона дерновинно-злаковых степей, степная зона	0	0	0,42	0,07

В подзоне широколиственно-хвойноподтаёжных лесов, расположенной севернее подзоны широколиственно-сосновых лесов, величина покрытия залежей древесными сообществами и значения NDVI несколько ниже. Значения NDVI залежных земель в 2018 г. характеризуют его средний показатель за вегетационный период с начала апреля по конец октября.

Максимальная средняя величина вегетационного индекса, таким образом, выступает индикатором наиболее высокой доли древесной растительности на залежах, а его стандартное отклонение — критерием вариации величины покрытия залежей древесной растительностью. Характеристики NDVI, соответственно, показали различия не только на зональном уровне, но и на уровне физико-географических подзон, из чего следует, что процесс формирования древесных сообществ на оставленных аграрных угодьях имеет внутрорегиональные особенности, а значения вегетационного индекса могут выступать их индикатором.

Среднемноголетние характеристики NDVI вегетационного сезона залежей ЕТР в период 2000–2018 гг. также наиболее высоки для подзоны широколиственно-сосновых лесов (*табл. 4*). Вместе с этим современные значения NDVI (2018) для залежей большинства изученных подзон выше среднемноголетних, что выступает косвенным признаком положительной тенденции вегетационного индекса в период 2000–2018 гг., обусловленной формированием древесных сообществ на залежах ЕТР, которые увеличивают их надземную фитомассу.

Таблица 4. Среднемноголетние характеристики NDVI залежных земель различных природных зон в период 2000–2018 гг.

Физико-географическая подзона	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Подзона широколиственно-хвойноподтаёжных лесов, лесная зона	0,58	0,25	0,83	0,14
Подзона широколиственно-сосновых лесов, лесная зона	0,63	0,20	0,84	0,15
Подзона северной лесостепи, лесостепная зона	0,61	0,21	0,84	0,15
Подзона типичной и южной лесостепи, лесостепная зона	0,57	0,22	0,77	0,13
Подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей, степная зона	0,49	0,11	0,73	0,10
Подзона дерновинно-злаковых степей, степная зона	0,41	0,24	0,65	0,10

Более полное представление о тенденциях изменения растительного покрова залежных земель даёт анализ их многолетних рядов NDVI, построенных на основе значений вегетационного периода (начало апреля – конец октября). С учётом того, что коэффициент корреляции величины покрытия древесной растительностью и NDVI для залежей с лиственными породами достигает 0,74 на уровне значимости 0,05 (Терехин, 2020), многолетняя динамика вегетационного индекса позволят сделать выводы о направленности и скорости процесса формирования древесной растительности на оставленных аграрных угодьях. Непосредственная оценка динамики доли древесной растительности на залежах за такой период не представляется возможной, так как она требует подбора снимков сверхвысокого пространственного разрешения за каждый год периода 2000–2018 гг. для каждой залежи. Многолетние изменения NDVI, возможности оценки которого значительно выше, позволяют её проанализировать.

Наличие положительной, статистически значимой тенденции в динамике вегетационного индекса залежных земель в период 2000–2018 гг. установлено для обеих изученных подзон лесной зоны и подзоны северной лесостепи (табл. 5), т.е. для трёх самых северных подзон, анализируемых в исследовании. Для более южных подзон лесостепной зоны и зоны степи статистически значимой тенденции в динамике вегетационного индекса не выявлено. Абсолютная величина статистики tau (по тесту Манна – Кендалла) выступает критерием интенсивности изменения значений вегетационного индекса.

Из полученных данных видно, что подзона северной лесостепи по параметрам трендовой составляющей вегетационного индекса более близка к подзонам лесной зоны, чем к остальным подзонам лесостепи. Южные подзоны лесостепи по этим же параметрам, наоборот, более близки к подзонам степной зоны. То есть по характеристикам выраженности трендовой составляющей NDVI залежных земель лесостепная природная зона достаточно контрастна в своих пределах. Значимость трендовой составляющей снижается при движении на юг к самой южной подзоне дерновинно-злаковых степей.

Таблица 5. Параметры статистики tau Манна – Кендалла для многолетних рядов NDVI залежей различных природных зон европейской территории России

Природная зона	Физико-географическая подзона	Значение tau	Уровень значимости
Лесная	Подзона широколиственно-хвойноподтаёжных лесов	0,182	0,00
	Подзона широколиственно-сосновых лесов	0,165	
Лесостепная	Подзона северной лесостепи	0,178	0,00
	Подзона типичной и южной лесостепи	0,048	0,25
Степная	Подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей	–0,023	0,59
	Подзона дерновинно-злаковых степей	0,015	0,72

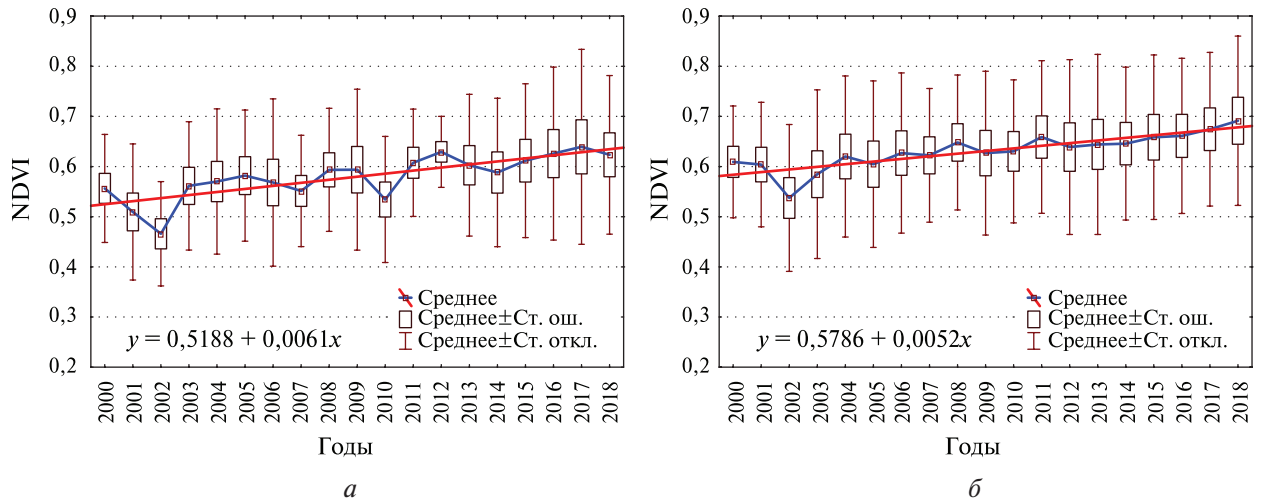


Рис. 1. Многолетние ряды вегетационного индекса NDVI для залежей лесной зоны: а — подзона широколиственно-хвойноподтаёжных лесов; б — подзона широколиственно-сосновых лесов

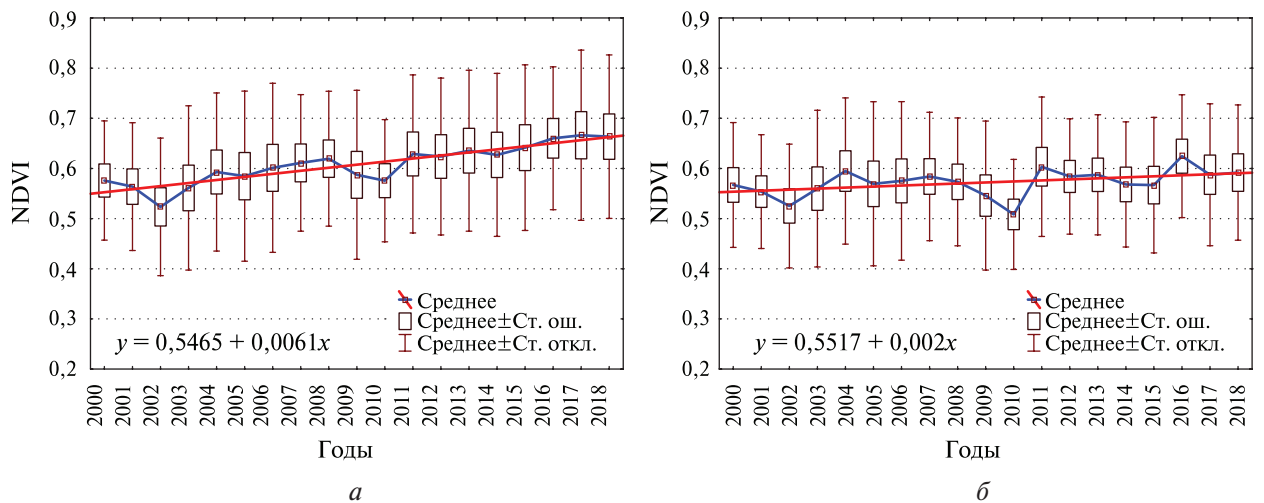


Рис. 2. Многолетние ряды вегетационного индекса NDVI для залежей лесостепной зоны: а — подзона северной лесостепи; б — подзона типичной и южной лесостепи

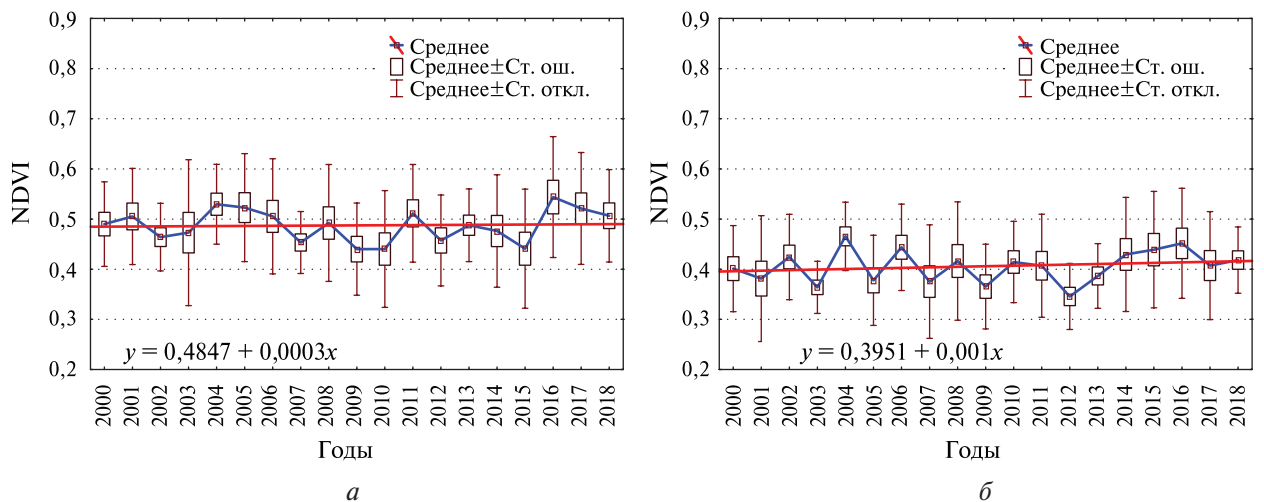


Рис. 3. Многолетние ряды вегетационного индекса NDVI для залежей степной зоны: а — подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей; б — подзона дерновинно-злаковых степей

Положительная, статистически значимая тенденция вегетационного индекса для залежей лесной зоны подтверждает, в свою очередь, тенденцию развития на них древесной растительности и формирования лесных насаждений. Коэффициент наклона трендовой линии для более северной подзоны широколиственно-хвойноподтаёжных лесов несколько выше (рис. 1а, см. с. 117), чем для более южной подзоны широколиственно-сосновых лесов (рис. 1б). При этом абсолютные значения NDVI во все изученные годы более высоки для оставленных аграрных угодий подзоны широколиственно-сосновых лесов.

Соответствующие различия могут быть обусловлены, с одной стороны, более высокой скоростью формирования древесной растительности на залежах подзоны широколиственно-хвойноподтаёжных лесов и с другой — различиями в породном составе формирующихся древесных сообществ. На залежах подзоны широколиственно-хвойноподтаёжных лесов часто формируются лесные насаждения мелколиственного породного состава (в основном берёза), а на залежах подзоны широколиственно-сосновых лесов наряду с мелколиственными лесами развиваются и широколиственные насаждения. С учётом того, что надземная биомасса и продуктивность широколиственных лесных насаждений выше, чем мелколиственных (Базилевич, 1993), этот фактор может выступать причиной более высоких абсолютных значений вегетационного индекса.

Для залежей северной лесостепи (рис. 2а, см. с. 117) характерна положительная, статистически значимая динамика вегетационного индекса, во многом похожая на аналогичную динамику NDVI подзоны широколиственно-сосновых лесов. Многолетняя динамика вегетационного индекса для залежей подзоны типичной и южной лесостепи (рис. 2б) характеризуется наличием положительной, но статистически незначимой трендовой составляющей.

Интенсивность роста NDVI, таким образом, выступающая индикатором скорости формирования древесных сообществ на залежах, показывает, что в северной части лесостепной зоны этот процесс происходит быстрее, чем в её южных пределах. Следовательно, по этому критерию наблюдаются внутризональные различия. Из графиков на рис. 2а и б видно, что в начале 2000-х гг. особенности динамики NDVI залежей всех подзон лесостепи были примерно аналогичны, но во втором десятилетии XXI в. начинают наблюдаться нарастающие различия. Они могут быть обусловлены усиливающейся тенденцией формирования древесных сообществ на оставленных аграрных угодьях. В подзоне северной лесостепи эта тенденция проявляется более выражено, чем в подзонах типичной и южной лесостепи. Следует отметить, что современные (2018) различия в величине покрытия древесной растительностью залежей подзон лесостепи достаточно существенные (Терехин, 2020) и вместе с этим они характеризуются определённым территориальным трендом в пределах Среднерусской лесостепи, что подтверждает предположение о различной скорости протекания процессов формирования древесных сообществ на залежах разных подзон этой природной зоны.

Многолетняя динамика вегетационного индекса для залежей степной зоны характеризуется отсутствием статистически значимой тенденции. При этом в более северной подзоне разнотравно-дерновинно-злаковых степей (рис. 3а, см. с. 117) абсолютные значения NDVI во все изученные годы выше, чем для более южной подзоны дерновинно-злаковых степей (рис. 3б).

С учётом того, что залежи степной зоны характеризуются отсутствием либо очень незначительной долей (не более 7 %) древесной растительности, определяющим фактором в различии значений вегетационного индекса, по всей видимости, выступают отличия в травяном покрове изученных залежных земель и объёме накапливаемой ими надземной фитомассы. Она для разнотравно-дерновинно-злаковых степей ЕТР выше, чем для более южных и более сухих дерновинно-злаковых степей (Базилевич, 1993; Тишков и др., 2013).

В целом графики многолетней динамики вегетационного индекса кроме особенностей тренда наглядно продемонстрировали последовательное снижение абсолютных значений вегетационного индекса при движении на юг от подзоны широколиственно-сосновых лесов до подзоны дерновинно-злаковых степей. Таким образом, многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI, изученная для оставленных аграрных угодий в период 2000–2018 гг., показала выраженные различия не только между природными зонами, но и таксономическими

единицами более низкого уровня — физико-географическими подзонами. Многолетние ряды индекса, вычисленные для залежей изученной территории ЕТР, в связи с этим могут выступать инструментом анализа различий естественного растительного покрова на зональном и внутризональном уровнях.

Выводы

На основе анализа временных рядов вегетационного индекса 2000–2018 гг., вычисленных для залежных земель, расположенных в различных природно-климатических условиях европейской территории России, установлено, что особенности многолетней динамики NDVI характеризуют отличия на уровне природных зон и более низком таксономическом уровне — физико-географических подзон. При движении на юг от подзоны широколиственно-сосновых лесов до подзоны дерновинно-злаковых степей наблюдается снижение абсолютных средне-многолетних значений NDVI, усреднённых за вегетационные периоды изученных лет. В этом же направлении происходит снижение современной величины вегетационного индекса и величины покрытия залежей древесными сообществами. Современные значения вегетационного индекса выше его среднемноголетних величин периода 2000–2018 гг. для большинства изученных подзон. Для южной части лесной зоны и подзоны северной лесостепи выявлена положительная, статистически значимая динамика вегетационного индекса залежных земель. Для южной части лесостепи и степной зоны она отсутствует.

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

Литература

1. *Базилевич Н. И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Жукова Е. Ю., Андрианова Е. А.* Характеристика растительности залежных земель окрестностей г. Черногорска республики Хакасия // Вестн. Хакасского гос. ун-та им. Н. Ф. Катанова. 2013. № 3. С. 9–13.
3. *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.
4. *Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В.* Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 3. С. 1–12. DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12.
5. *Мильков Ф. Н.* Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 149 с.
6. *Москаленко С. В., Бобровский М. В.* Возобновление деревьев на бывших пахотных землях в заповеднике «Калужские засеки» // Бюл. Брянского отд-ния Русского ботанического общества. 2014. № 1. С. 48–54.
7. *Никонов М. В., Смирнов И. А.* Некоторые особенности зарастания агроландшафтов на земле Новгородской // Вестн. Новгородского гос. ун-та им. Ярослава Мудрого. 2014. № 76. С. 58–60.
8. *Парахневич Т. М., Кирик А. И.* Структура и динамика растительного покрова на разновозрастных залежах // Вестн. аграр. науки. 2017. № 4(67). С. 43–50. DOI: 10.15217/48484.
9. *Прокаев В. И.* Физико-географическое районирование. М.: Просвещение, 1983. 176 с.
10. *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.
11. *Терехин Э. А., Постернак Т. С.* Процессы лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири и их анализ с применением данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 161–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-161-172.
12. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Царевская Н. Г., Титова С. В.* Роль лесостепных ландшафтов России в создании первичной продукции и в депонировании углерода // 3-я Всероссийская науч. конф.

- «Проблемы изучения и восстановления ландшафтов лесостепной зоны: историко-культурные и природные территории»: сб. материалов конф. Тульская обл. 3–8 июня 2013. Тула: Гос. военно-ист. и природный музей-заповедник «Куликово поле», 2013. С. 9–17.
13. Черкасов Г. Н., Масютенко Н. П., Кузнецов А. В. Эволюция залежных земель и перспективы их использования в Центральном Черноземье // Земледелие. 2009. № 7. С. 9–11.
 14. Didan K. MOD13Q1 — MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid. 2015. V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
 15. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 163. P. 312–325. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.028.
 16. Heck E., de Beurs K. M., Owsley B. C., Henebry G. M. Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V. 156. P. 121–134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011.
 17. Joshi N., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Jepsen M. R., Baumann M., Hostert P., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T. A., Ryan C. M., Reiche J., Waske B. A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 1. P. 70. DOI: 10.3390/rs8010070.
 18. 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 Sensing of Environment. 2002. V. 83. No. 1-2. P. 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
 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 / ed. N. T. Prochazka. N. Y.: Nova Science Publishers, 2010. P. 51–84.
 20. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. No. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
 21. 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.
 22. Yin H., Prishchepov A. V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V. C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 210. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.050.

Long-term changes in spectral response of abandoned agricultural lands in various climate and environmental conditions of European Russia in the early 21st century

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

This paper describes the satellite-derived long-term dynamics of NDVI vegetation index in 2000–2018 for abandoned agricultural lands in 6 geographical subzones of European Russia. The studied natural subzones successively replace each other from north to south from the forest zone to the steppe zone. The studied subzones characterize the change in natural conditions from the forest to the steppe natural zone. The spatial change in the NDVI values averaged over the growing season is similar to the change in the share of forest vegetation in abandoned agricultural lands. The largest forest cover and the highest vegetation index were found in the south of the forest zone - in the subzone of broad-leaved pine forests. The lowest values of both indicators are typical for the steppe zone, the subzone of bunch-grass steppes. The abandoned agricultural lands of the forest-steppe zone are characterized by the most significant intrazonal differences in the vegetation index dynamics. The current values of the vegetation index are higher than its average long-term values for the abandoned lands of all the studied natural zones. A positive statistically significant trend in the vegetation index characterizes the formation

of forest vegetation on abandoned agricultural lands. Statistically significant dynamics of NDVI was established for the forest zone and the subzone of the northern forest-steppe. There were no statistically significant trends in the vegetation index in the south of the forest-steppe zone and in the steppe zone.

Keywords: abandoned agricultural lands, European Russia, natural zone, vegetation indices, spectral response, remote sensing

Accepted: 11.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122

References

1. Bazilevich N. I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (Biological productivity of ecosystems in Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 293 p. (in Russian).
2. Zhukova E. Yu., Andrianova E. A., Vegetation characteristics of the city of Chernogorsk environs fallow lands in the Republic of Khakassia, *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. F. Katanova*, 2013, No. 3, pp. 9–13 (in Russian).
3. Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Karavaeva N. A., Denisenko E. A., Nefedova T. G., *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh 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).
4. Medvedev A. A., Telnova N. O., Kudikov A. V., Highly detailed remote sensing monitoring of tree overgrowth on abandoned agricultural lands, *Voprosy lesnoi nauki*, 2019, Vol. 2, No. 3, pp. 1–12 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12.
5. Milkov F. N., *Prirodnye zony SSSR* (Natural zones of the USSR), Moscow: Mysl', 1977, 149 p. (in Russian).
6. Moskalenko S. V., Bobrovsky M. V., Renewal of trees on the abandoned arable lands in the State Nature Reserve "Kaluzhskie Zaseki", *Byulleten' Bryanskogo otdeleniya Russkogo botanicheskogo obshchestva*, 2014, No. 1, pp. 48–54 (in Russian).
7. Nikonov M. V., Smirnov I. A., Some peculiarities of farmland overgrowing in Novgorod region, *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo*, 2014, No. 76, pp. 58–60 (in Russian).
8. Parakhnevich T. M., Kirik A. I., The structure and dynamics of vegetation on the different age abandoned fields, *Vestnik agrarnoi nauki*, 2017, No. 4(67), pp. 43–50 (in Russian), DOI: 10.15217/48484.
9. Prokaev V. I., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie* (Physico-geographical zoning), Moscow: Prosveshchenie, 1983, 176 p. (in Russian).
10. 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.
11. Terekhin E. A., Posternak T. S., Reforestation on abandoned arable lands in the south of Western Siberia and its analysis using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 161–172 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-161-172.
12. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Tsarevskaya N. G., Titova S. V., The role of forest-steppe landscapes in formation of primary production and deponation of carbon, *3-ya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Problemy izucheniya i vosstanovleniya landshaftov lesostepnoi zony: istoriko-kul'turnye i prirodnye territorii"* (Problems of studying and restoring landscapes of the forest-steppe zone: historical, cultural and natural territories, Proc. Conf.), 3–8 June 2013, Tula: State military and nature museum and reserve "Kulikovo pole", 2013, pp. 9–17 (in Russian).
13. Cherkasov G. N., Masyutenko N. P., Kuznetsov A. V., Evolution of fallow lands and perspectives of it use in Central Chernozem region, *Zemledelie*, 2009, No. 7, pp. 9–11 (in Russian).
14. Didan K., *MOD13Q1 — MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid*, 2015, V006, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
15. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P., Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 312–325, DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.028.
16. 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, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011.
17. Joshi N., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Jepsen M. R., Baumann M., Hostert P., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T. A., Ryan C. M., Reiche J., Waske B., A review of the application of optical and

- radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 1, pp. 70, DOI: 10.3390/rs8010070.
18. 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 Sensing of Environment*, 2002. Vol. 83, No. 1–2, pp. 3–15, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
 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*, N. T. Prochazka (ed.), New York: Nova Science Publishers, 2010, pp. 51–84.
 20. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, No. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
 21. 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.
 22. Yin H., Prishchepov A. V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V. C., Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, pp. 12–24, DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.050.