

УДК 528.88
DOI 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515

Особенности многолетней динамики вегетационного индекса залежных земель на территории Центрального Черноземья

Терехин Э.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы 85
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Аннотация. Анализ многолетних изменений растительного покрова является одной из ключевых задач в оценке состояния залежных земель, особенно в регионах активного аграрного использования. В настоящее время одним из перспективных вариантов решения этой задачи выступает изучение рядов вегетационных индексов, измеряемых по спутниковым данным. В статье проанализирована динамика вегетационного индекса NDVI для залежных земель в областях Центрального Черноземья в период 2000–2018 гг. Исследование проведено на залежах с различными типами лесных насаждений. Установлено, что для оставленных аграрных земель с лиственными породами во всех изученных областях наблюдается положительная динамика вегетационного индекса. При этом значимость тенденции в разных областях региона различна. Для залежей с лиственными породами статистически значимые трендовые составляющие выявлены в областях, расположенных наиболее близко к лесной зоне. Для оставленных аграрных земель с хвойными и смешанными лесными насаждениями установлена статистически значимая, положительная динамика в большинстве изученных областей. Залежи с хвойными насаждениями характеризуются наибольшей интенсивностью роста межгодовых значений вегетационного индекса в исследуемый период. Коэффициент наклона трендовой линии NDVI достаточно существенно различается между областями ЦЧР для залежей как с лиственными, так и с хвойными породами. С учетом высокой корреляции вегетационного индекса и величины покрытия залежей древесной растительностью выявленные изменения характеризуют процесс лесовозобновления на оставленных аграрных землях.

Ключевые слова: залежные земли, многолетние ряды, вегетационные индексы, лесовозобновление, Центральное Черноземье, данные дистанционного зондирования.

Для цитирования: Терехин Э.А. 2021. Особенности многолетней динамики вегетационного индекса залежных земель на территории Центрального Черноземья. Региональные геосистемы, 45(4): 505–515. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515

Long-term Dynamics of the Vegetation Index for Abandoned Farmlands in the Central Chernozem Region of Russia

Edgar A. Terekhin

Belgorod National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Abstract. Analysis of long-term changes in vegetation is one of the key tasks in assessing the state of abandoned lands, especially in regions of active agricultural use. Estimating the satellite-derived time-series of vegetation indices is one of the options for solving this problem. The article analyzes NDVI vegetation index dynamic of abandoned lands in the Central Chernozem Region of Russia in the period 2000–2018. The research was carried out on abandoned farmlands with various types of forests. The positive dynamics of the vegetation index for the abandoned lands with deciduous tree species was revealed in all parts of the Region.



At the same time, the trend significance is different in the oblasts of the region. For the abandoned lands with deciduous trees, statistically significant trends were established in the areas located closest to the forest zone. The abandoned farmlands with coniferous and mixed forests are characterized by statistically significant, positive dynamics in most of the studied oblasts. The abandoned agrarian lands with coniferous forests are characterized by the highest intensity of the increase in the vegetation index values during the study period. The slope coefficient of the vegetation index trend differs significantly between the oblasts of the region for both abandoned lands with deciduous and coniferous species. Taking into account the high correlation between NDVI and the forest cover, the revealed changes characterize the reforestation on these lands.

Keywords: abandoned agricultural lands, long-term dynamics, vegetation indices, reforestation, Central Chernozem Region, remote sensing data.

For citation: Terekhin E.A. 2021. Long-term Dynamics of the Vegetation Index for Abandoned Farmlands in the Central Chernozem Region of Russia. *Regional Geosystems*, 45(4): 505–515 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515

Введение

Исследование многолетних изменений в растительном покрове выступает одной из ключевых задач географических исследований, связанных с оценкой динамических процессов в природной среде. В регионах активного аграрного использования, где значительная часть земель занята пашней, только некоторые участки ландшафтов могут быть использованы для анализа динамики естественной растительности. Залежные земли или оставленные аграрные угодья выступают одними из таких земель. С конца XX в. они получили достаточно широкое распространение в разных природных зонах европейской территории России [Левыкин и др., 2013; Ледовский, Ходячих, 2015; Королева и др., 2018], а также в Сибири [Шпедт, 2007; Вараксин и др., 2012]. Анализ изменений, происходящих на них вследствие сукцессий, позволяет получить представление о современных тенденциях динамики естественной растительности и природной среды. Сукцессии на залежных землях выступают процессами, приводящими к смене видового состава территории, динамике величины надземной биомассы и к изменению внешнего облика ландшафтов.

Протекающие на залежах сукцессионные процессы при отсутствии антропогенного вмешательства происходят непрерывно на протяжении периода активной вегетации. Соответственно, чем выше частота проводимых оценок состояния растительности, тем выше их объективность. В настоящее время значительные возможности для решения этой проблемы предоставляют регулярно получаемые многозональные спутниковые данные.

Спектрально-отражательные характеристики, извлекаемые из спутниковых снимков, могут быть использованы для распознавания залежных земель [Prishchepov et al., 2012; Yoon, Kim, 2020]. Вместе с этим значительные перспективы связаны и с анализом сукцессионных процессов на основе данных дистанционного зондирования. Применение информационных продуктов, создаваемых на основе снимков, прошедших атмосферную и радиометрическую коррекцию [Justice et al., 2002], позволяет проводить сравнение спектрально-отражательных характеристик, измеренных в разные временные срезы [Барталев, Лупян, 2013; Lopresti et al., 2015; Pasolli et al., 2015; He et al., 2018].

Вместе с этим применение спутниковой информации для решения подобных задач обуславливает необходимость предварительных количественных оценок между параметрами растительности и спектрально-отражательными характеристиками. Ранее на основе исследования залежных земель лесостепной зоны установлены особенности зависимостей между величиной покрытия оставленных аграрных земель древесной растительностью и спектрально-отражательными свойствами, включая вегетационный индекс NDVI [Терехин, 2020]. На примере Центрального Черноземья было показано, что многолетние изме-

нения вегетационного индекса могут выступать индикатором лесовозобновления на залежных землях [Терехин, 2021]. Тем не менее, остается актуальным оценка многолетних рядов вегетационного индекса в границах отдельных областей Центрального Черноземья. Обусловлено это тем, что в этом случае появляется возможность анализа различной информации, что в перспективе может позволить более полно подойти к описанию внутри-региональных различий в естественной динамике растительности на залежах.

Цель исследования заключалась в анализе многолетних рядов вегетационного индекса NDVI (2000–2018 гг.) для залежных земель, расположенных в разных областях Центрально-Черноземного региона.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на территории Центрального Черноземья, включая Орловскую область. В пределах анализируемой территории условия меняются от северной лесостепи на северо-западе и северо-востоке до степной зоны на юге [Физико-географическое районирование..., 1961].

Получение объективных представлений о динамике вегетационного индекса NDVI в областях региона предполагало формирование выборки залежных земель, учитывающей их региональные особенности и характеристики спутниковых данных, на основе которых осуществлялась оценка значений вегетационного индекса.

В связи с этим подбор залежных земель проводился с учетом ряда критериев. Во-первых, в анализируемой выборке должны были репрезентативно представлены залежные земли с основными типами лесных насаждений, формирующихся на них: лиственными, хвойными, смешанными. Во-вторых, анализируемые угодья стремились подбирать таким образом, чтобы они были выведены из сельскохозяйственного оборота в начале 2000-х гг. и оставаться в состоянии залежи как минимум до 2018 г. Площадь анализируемых земель должна быть не менее 20 га для обеспечения возможности оценки спектрально-отражательных характеристик с учетом пространственного разрешения используемых спутниковых данных MODIS. Угодья подбирали таким образом, чтобы они располагались примерно в аналогичных геоморфологических условиях. Формирование выборки осложнялось тем, что залежи на территории региона представлены неравномерно.

Выявление угодий, а также соответствие их обозначенным критериям было осуществлено на основе спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения (1 м), полученных из интернет-архивов открытого доступа, в первую очередь из Google Earth, а также с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения Landsat (источник данных <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

В общей сложности было выявлено и изучено 474 оставленных аграрных угодья суммарной площадью свыше 31000 га (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Характеристики проанализированных залежных земель, использованных
для анализа многолетней динамики NDVI
Parameters of the analyzed abandoned lands used to assess the NDVI dynamics

Область	Число объектов	Площадь средняя, га	Площадь общая, га
Белгородская область	63	39,6	2494,0
Воронежская область	84	54,3	4559,1
Курская область	66	61,5	4059,5
Липецкая область	28	51,3	1435,7
Орловская область	84	55,0	4621,3
Тамбовская область	149	92,9	13846,2
Всего	474	65,4	31015,8

Для каждого угодья был подготовлен векторный контур и сформирован перечень информации, включающий данные о площади, особенностях покрытия древесной растительностью на конечную анализируемую дату, типе формирующегося лесного насаждения (лиственный, хвойный, смешанный).

На следующем этапе был осуществлен подбор и анализ спутниковых данных. Оценка многолетних рядов NDVI была выполнена с использованием информационных продуктов MOD13Q1, создаваемых на основе регулярно получаемых снимков MODIS с пространственным разрешением 250 м/пиксель. Вегетационный индекс NDVI основан на коэффициентах отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Ключевое преимущество этого показателя связано с возможностью его вычисления по регулярно получаемым спутниковым данным, накопление архивов которых ведется уже не одно десятилетие, что позволяет оценивать многолетние ряды его значений. В связи с этим он был выбран для анализа.

Данные MOD13Q1 содержат 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса, полученные на основе снимков, прошедших атмосферную и радиометрическую коррекцию. На текущий момент данные с сенсора MODIS выступают единственным типом спутниковой информации, позволяющим для конкретных угодий проанализировать многолетние ряды NDVI, охватывающие сотни измерений, полученных с высокой периодичностью. Вместе с этим они предоставляют возможность анализа изменений в состоянии растительности в течение периода вегетации [Pan et al., 2012; Pringle et al., 2012; le Maire et al., 2014].

Временной интервал охватывал данные с 2000 г., т.е. с начала работы сенсора MODIS, по 2018 г. На каждый год подбирались серии изображений, полностью охватывающие период вегетационной активности с начала апреля по конец октября, по 13 временных срезов в год. В общей сложности было подобрано и проанализировано 247 изображений MOD13Q1, которые позволили для каждой залежи рассчитать многолетний ряд с соответствующим числом измерений.

На заключительном этапе был выполнен статистический анализ временных рядов вегетационного индекса, включающий оценку коэффициента наклона трендовой линии, оценку значимости трендовой составляющей. Она была проведена на основе непараметрического теста Манна-Кендалла, являющегося индикатором статистически значимой тенденции. Учитывая, что спектрально-отражательные характеристики залежей с различными типами лесных насаждений отличаются [Терехин, 2020], оценка многолетних рядов NDVI была выполнена отдельно для каждого типа оставленных аграрных угодий.

Результаты и их обсуждение

Оценка многолетней динамики вегетационного индекса NDVI для залежных земель с формирующимися древесными сообществами лиственного породного состава показала, что по его характеристикам в областях Центрального Черноземья наблюдаются отличия по ряду параметров (рис. 1). Эти отличия связаны с наклоном трендовой линии в период 2000–2018 гг. и ее статистической значимостью.

Согласно полученным данным, наибольший наклон тренда NDVI выявлен для залежей Орловской области, наименьший – для Воронежской области. Учитывая, что комплекс ландшафтных условий залежей был примерно одинаков, полученные результаты отражают региональные различия, связанные с изменением природных условий в регионе от северной лесостепи на северо-западе Орловской области до южной лесостепи и степной зоны на юге Воронежской области. Территориальные изменения в спектрально-отражательных характеристиках залежей проявляются при пространственно-временном картографировании коэффициента наклона тренда NDVI [Терехин, 2021] и при сравнении этого показателя на уровне отдельных областей (рис. 1).

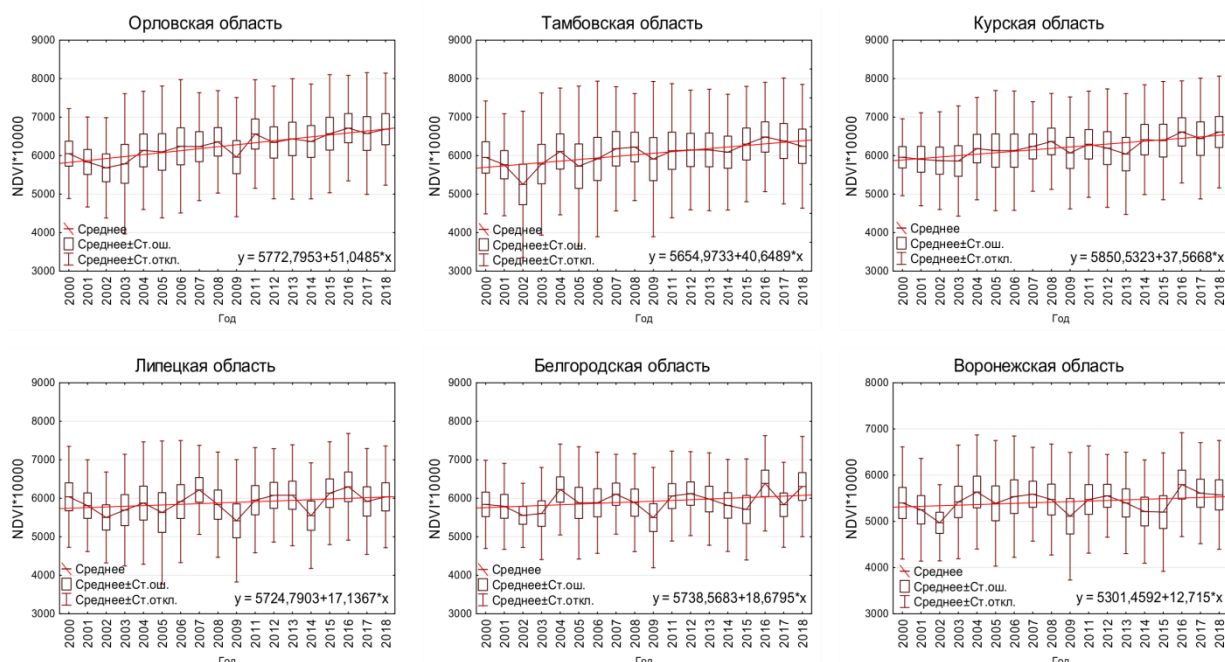


Рис. 1. Динамика вегетационного индекса NDVI залежных земель в областях Центрального Черноземья в 2000–2018 гг. Залежи с лиственными породами
Fig. 1. Dynamics of the NDVI vegetation index for abandoned lands in the Central Chernozem Region in 2000–2018. Abandoned lands with deciduous tree species

Статистическая значимость тренда NDVI, оцененная по критерию Манна-Кендалла, показала, что значимые изменения индекса в исследуемый период произошли в Орловской и Курской областях. В эту же категорию (уровень значимости 0,05) можно отнести и Тамбовскую область.

Учитывая достаточно тесную связь вегетационного индекса с долей древесной растительности на залежах, из полученных данных следует, что для этих областей характерна наибольшая интенсивность лесовозобновления на оставленных аграрных угодьях.

Следует отметить, что положительная динамика вегетационного индекса на залежных землях с лиственными древесными сообществами наблюдается во всех областях Центрального Черноземья. Положительные абсолютные значения коэффициента наклона тренда NDVI и положительные величины tau (по тесту Манна-Кендалла) зафиксированы в каждой из них (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Параметры величины tau Манна-Кендалла, характеризующей наличие статистически значимого тренда NDVI в областях ЦЧР для залежей с лиственными древесными сообществами
Parameters for Mann-Kendall tau of NDVI trends for abandoned lands with deciduous forests

Регион	Абсолютное значение	Уровень значимости
Белгородская область	0,05	0,25
Воронежская область	0,03	0,53
Курская область	0,13	0,00
Липецкая область	0,03	0,49
Орловская область	0,15	0,00
Тамбовская область	0,08	0,05

Величина tau между областями существенно различается, а тренд значим в половине из них, что можно интерпретировать как следствие различий в скорости лесовозобновления на залежах.

Для залежных земель с хвойными лесными насаждениями характерным отличием от залежей с лиственными древесными сообществами выступает меньшая величина вариации NDVI, наблюдающаяся для годовых значений (рис. 2). Положительная динамика вегетационного индекса выявлена во всех областях Центрального Черноземья.

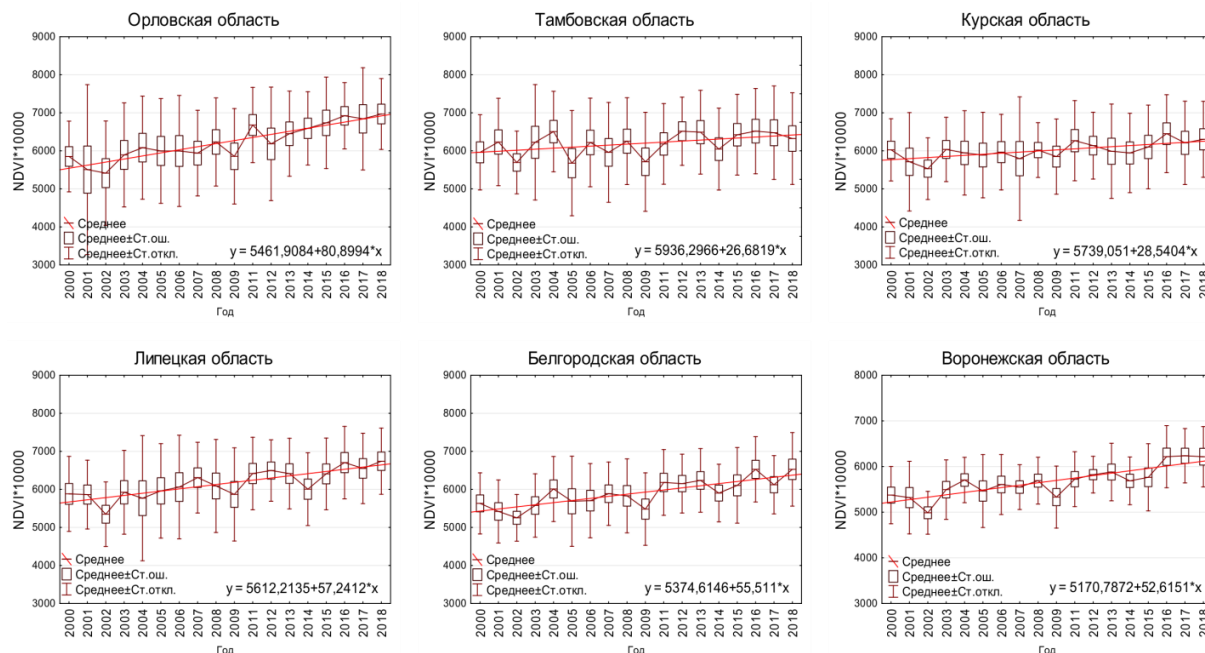


Рис. 2. Динамика вегетационного индекса NDVI залежных земель в областях Центрального Черноземья в 2000–2018 гг. Залежи с хвойными породами
Fig. 2. Dynamics of the NDVI vegetation index for abandoned lands in the Central Chernozem Region in 2000–2018. Abandoned lands with coniferous tree species

Для залежей этого типа наибольшая интенсивность роста межгодовых значений вегетационного индекса в период 2000–2018 гг. зафиксирована для Орловской области, т.е. северо-западной части региона, располагающейся значительной частью в условиях северной лесостепи на границе с лесной зоной.

Другой отличительной особенностью оставленных аграрных угодий с хвойными лесными насаждениями является статистическая значимость трендовой линии NDVI практически во всех областях Центрального Черноземья (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Параметры величины tau Манна-Кендалла, характеризующей наличие статистически значимого тренда NDVI в областях ЦЧР для залежей с хвойными древесными сообществами
Parameters for Mann-Kendall tau of NDVI trends for abandoned lands with coniferous forests

Регион	Абсолютное значение	Уровень значимости
Белгородская область	0,22	0,00
Воронежская область	0,28	0,00
Курская область	0,11	0,01
Липецкая область	0,18	0,00
Орловская область	0,23	0,00
Тамбовская область	0,07	0,09

Абсолютные значения τ для залежей с хвойными породами отличаются также более высокими абсолютными значениями. Полученные результаты можно интерпретировать как более высокую интенсивность процесса лесовозобновления на залежах с хвойными породами, чем с лиственными. Следует отметить, что коэффициент корреляции NDVI с величиной покрытия древесной растительностью для залежей этого типа составляет 0,91 при уровне значимости 0,05 [Терехин, 2020]. Более высокая интенсивность лесовозобновления на залежах с хвойными породами может быть обусловлена биологическими особенностями сосны обыкновенной, которая отличается неприхотливостью и высокой интенсивностью роста.

Залежи со смешанными лесными насаждениями, как и предыдущие типы залежей, характеризуются положительной динамикой вегетационного индекса, являющейся индикатором процессов формирования древесных сообществ (рис. 3).

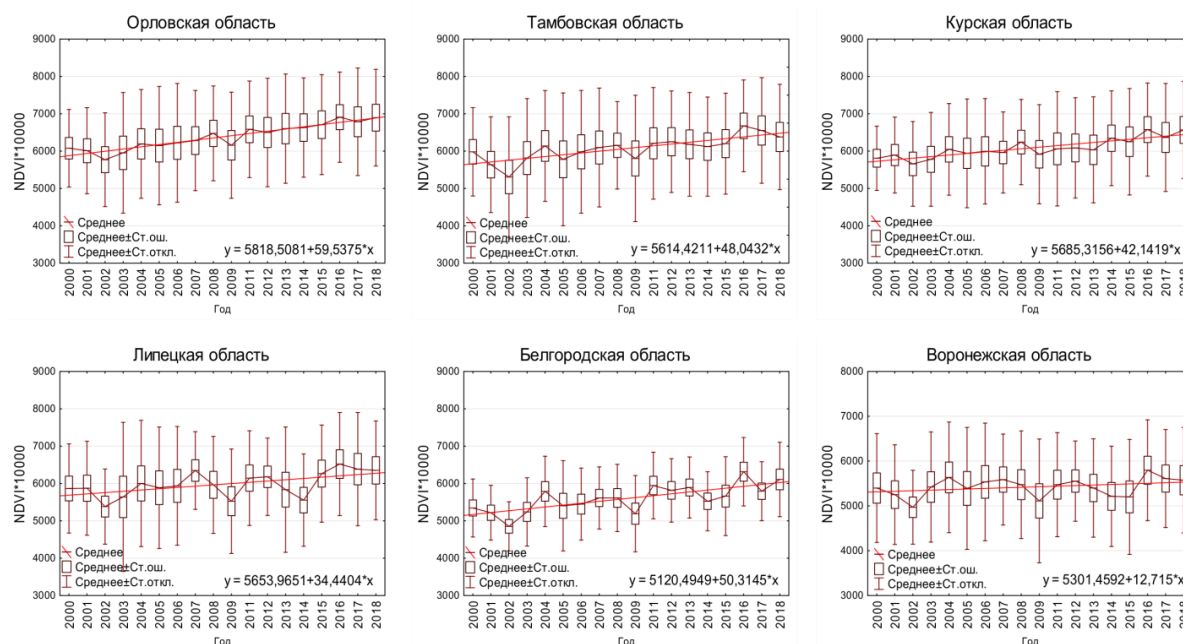


Рис. 3. Динамика вегетационного индекса NDVI залежных земель в областях Центрального Черноземья в 2000–2018 гг. Залежи со смешанными лесными насаждениями
Fig. 3. Dynamics of the NDVI vegetation index for abandoned lands in the Central Chernozem Region in 2000–2018. Abandoned lands with mixed forest stands

Залежные земли со смешанными лесными насаждениями во всех областях Центрального Черноземья характеризуются наличием статистически значимого тренда (по тесту Манна-Кендалла). При этом абсолютные значения τ преимущественно больше, чем для залежей с лиственными породами, но меньше, чем для залежей с хвойными насаждениями (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Параметры величины τ Манна-Кендалла, характеризующей наличие статистически значимого тренда NDVI в областях ЦЧР для залежей со смешанными насаждениями
Parameters for Mann-Kendall τ of NDVI trends for abandoned lands with mixed forests

Регион	Абсолютное значение	Уровень значимости
Белгородская область	0,19	0,00
Воронежская область	0,10	0,02
Курская область	0,16	0,00
Липецкая область	0,09	0,04
Орловская область	0,18	0,00
Тамбовская область	0,12	0,00

Для залежей со смешанными лесными насаждениями не наблюдается таких выраженных различий между областями Центрального Черноземья, как для залежей с лиственными породами. Вместе с этим следует отметить, что территориально в ЦЧР залежи со смешанными и хвойными насаждениями представлены значительно меньше, чем залежи с лиственными древесными сообществами.

Оценка коэффициента наклона трендовой линии NDVI в областях Центрального Черноземья наглядно показывает, что в большинстве областей этот показатель наиболее высок для залежей с хвойными породами. Далее идут залежи со смешанными и лиственными древесными сообществами (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Коэффициенты наклона трендовой линии NDVI, характеризующей скорость увеличения
вегетационного индекса залежных земель в 2000–2018 гг.

NDVI trend slopes characterizing the rate of vegetation index increase for abandoned
agricultural lands in 2000–2018

Область	Тип формирующихся лесных насаждений		
	Лиственные	Хвойные	Смешанные
Белгородская область	18,7	55,5	48,0
Воронежская область	12,7	53,2	50,1
Курская область	37,5	28,5	29,2
Липецкая область	17,1	57,2	42,1
Орловская область	51,0	80,8	34,4
Тамбовская область	40,6	16,9	59,5
В среднем по региону	32,1	50,0	42,2

Значительные различия между областями ЦЧР по величине наклона трендовой линии NDVI можно интерпретировать как различия в интенсивности лесовозобновления на залежных землях региона.

Заключение

Изучена динамика вегетационного индекса NDVI для залежных земель Центрального Черноземья в период 2000–2018 гг. Многолетние ряды индекса вычислены на основе информационных продуктов MOD13Q1. Для залежей с формирующимися лесными насаждениями лиственного, хвойного и смешанного породного состава в исследуемый период выявлена положительная динамика спектрального показателя. С учетом высокой корреляции NDVI с долей древесной растительности, присутствующей на залежах, установленная динамика является индикатором процессов лесовозобновления, протекающих на них. Для залежей с лиственными породами статистически значимые тренды NDVI выявлены в областях, наиболее близко расположенных к лесной зоне: Орловской, Курской и Тамбовской. Для залежей с хвойными и смешанными лесными насаждениями статистически значимые тренды вегетационного индексы установлены в большинстве областей региона.

Список литературы

1. Барталев С.А., Лупян Е.А. 2013. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 10 (1): 197–214.
2. Вараксин Г.С., Вайс А.А., Байкалов Е.М. 2012. Зарастание древесной растительностью земель сельскохозяйственного назначения. Вестник КРАСГАУ, 5 (68): 201–205.

3. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. 2018. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat. Лесоведение, 2: 83–96. DOI: 10.7868/S0024114818020018.
4. Левыкин С.В., Чибилев А.А., Казачков Г.В., Яковлев И.Г., Грудинин Д.А. 2013. Проблемы восстановления зональных степных экосистем на постцелинном пространстве России и Казахстана. Степной Бюллетень, 37: 5–8.
5. Ледовский Н.В., Ходячих И.Н. 2015. Эколого-фитоценотическая характеристика разновозрастных залежей степной зоны Южного Урала. Вестник Оренбургского государственного университета, 10 (185): 341–343.
6. Терехин Э.А. 2020. Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 17 (5): 142–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
7. Терехин Э.А. 2021. Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI. Компьютерная оптика, 45: 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
8. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. 1961. Под ред. Ф.Н. Милькова. Воронеж, Изд-во Воронежского университета, 263 с.
9. Шпедт А.А., Александрова С.В. 2007. Экономическая оценка почв залежных и пахотных земель в условиях Красноярского края. Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 6: 62–65.
10. He M., Kimball S.J., Maneta P.M., Maxwell D.B., Moreno A., Beguería S., Wu X. 2018. Regional Crop Gross Primary Productivity and Yield Estimation Using Fused Landsat-MODIS Data. Remote Sensing, 10 (3): 372. DOI: 10.3390/rs10030372.
11. Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. Remote Sensing of Environment, 83 (1–2): 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
12. le Maire G., Dupuy S., Nouvellon Y., Loos R.A., Hakamada R. 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. Remote Sensing of Environment, 152: 136–149. DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.015.
13. Lopresti M.F., Di Bella C.M., Degioanni A.J. 2015. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. Information Processing in Agriculture, 2 (2): 73–84. DOI: 10.1016/j.inpa.2015.06.001.
14. Pan Y., Li L., Zhang J., Liang S., Zhu X., Sulla-Menashe D. 2012. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. Remote Sensing of Environment, 119: 232–242. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.011.
15. Pasolli L., Asam S., Castelli M., Bruzzone L., Wohlfahrt G., Zebisch M., Notarnicola C. 2015. Retrieval of Leaf Area Index in mountain grasslands in the Alps from MODIS satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 165: 159–174. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.027.
16. Pringle M.J., Denham R.J., Devadas R. 2012. Identification of cropping activity in central and southern Queensland, Australia, with the aid of MODIS MOD13Q1 imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 19: 276–285. DOI: 10.1016/j.jag.2012.05.015.
17. Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Dubinin M., Alcantara C. 2012. The effect of Landsat ETM+/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe. Remote Sensing of Environment, 126: 195–209. DOI: 10.1016/j.rse.2012.08.017.
18. Yoon H., Kim S. 2020. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 166: 201–212. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021.

References

1. Bartalev S.A., Loupian E.A. 2013. R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute. Current problems in remote sensing of the Earth from space, 10 (1): 197–214 (in Russian).



2. Varaksin G.S., Vais A.A., Baikarov E.M. 2012. Agricultural land colonization by tree vegetation. *Bulletin of KrasGAU*, 5 (68): 201–205 (in Russian).
3. Koroleva N.V., Tikhonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriluk E.A., Pugachevskiy A.V. 2018. 25 Years of Reforestation on Non-forest Lands in Smolenskoye Poozerye National Park Assessed from LANDSAT. *Lesovedenie*, 2: 83–96 (in Russian). DOI: 10.7868/S0024114818020018
4. Levykin S.V., Chibilev A.A., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G., Grudin D.A. 2013. Problemy vosstanovleniya zonalnykh stepnykh ekosistem na posttselinnom prostranstve Rossii i Kazakhstana [Spontaneous restoration of steppe on abandoned croplands within virgin lands developed in Russia and Kazakhstan during the mid-20th century]. *Steppe bulletin*, 37: 5–8.
5. Ledovskiy N.V., Khodyachikh I.N. 2015. Ekologo-fitotsenoticheskaya kharakteristika raznovozrastnykh zalezhey stepnoy zony Yuzhnogo Urala [Ecological and phytocenological characteristic of southern urals uneven deposits of steppe zone]. *Vestnik Orenburg State University*, 10 (185): 341–343.
6. Terekhin E.A. 2020. Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 17 (5): 142–156 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142–156.
7. Terekhin E.A. 2021. Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series. *Computer Optics*, 45: 245–252 (in Russian). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
8. Fiziko-geograficheskoe rayonirovaniye tsentral'nykh chernozemnykh oblastey [Physical and geographical zoning of the central chernozem regions]. 1961. Ed. F.N. Mil'kov. Voronezh, Publ. Voronezhskiy universitet, 263 p.
9. Shpedt A.A., Aleksandrova S.V. 2007. Ekonomicheskaya otsenka pochv zaleznykh i pakhotnykh zemel v usloviyakh Krasnoyarskogo kraya [Economic assessment of soils of fallow and arable lands in the conditions of the Krasnoyarsk Krai]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 6: 62–65.
10. He M., Kimball S.J., Maneta P.M., Maxwell D.B., Moreno A., Beguería S., Wu X. 2018. Regional Crop Gross Primary Productivity and Yield Estimation Using Fused Landsat-MODIS Data. *Remote Sensing*, 10 (3): 372. DOI: 10.3390/rs10030372.
11. Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1–2): 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
12. le Maire G., Dupuy S., Nouvellon Y., Loos R.A., Hakamada R. 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 152: 136–149. DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.015.
13. Lopresti M.F., Di Bella C.M., Degioanni A.J. 2015. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. *Information Processing in Agriculture*, 2 (2): 73–84. DOI: 10.1016/j.inpa.2015.06.001.
14. Pan Y., Li L., Zhang J., Liang S., Zhu X., Sulla-Menashe D. 2012. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. *Remote Sensing of Environment*, 119: 232–242. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.011.
15. Pasolli L., Asam S., Castelli M., Bruzzone L., Wohlfahrt G., Zebisch M., Notarnicola C. 2015. Retrieval of Leaf Area Index in mountain grasslands in the Alps from MODIS satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 165: 159–174. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.027.
16. Pringle M.J., Denham R.J., Devadas R. 2012. Identification of cropping activity in central and southern Queensland, Australia, with the aid of MODIS MOD13Q1 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 276–285. DOI: 10.1016/j.jag.2012.05.015.
17. Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Dubinin M., Alcantara C. 2012. The effect of Landsat ETM+/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe. *Remote Sensing of Environment*, 126: 195–209. DOI: 10.1016/j.rse.2012.08.017.
18. Yoon H., Kim S. 2020. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166: 201–212. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Терехин Эдгар Аркадьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела геоинформатики Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов, доцент кафедры природопользования и земельного кадастра Института наук о Земле Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Edgar A. Terekhin, PhD in Geography, Senior Researcher, Department of Geoinformatics, Federal Regional Center for Aerospace and Ground Monitoring of Objects and Natural Resources, Associate Professor, Department of Natural Resources and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia