

Сукцессионные процессы на залежах юга Среднерусской возвышенности по данным спутниковых съёмок

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 сукцессионных процессов, наблюдающихся на залежных землях лесостепной зоны юга Среднерусской возвышенности. На основе данных со 170 объектов, расположенных на территории Белгородской обл., с использованием разновременной спутниковой информации 2000–2018 гг. и материалов полевых исследований изучены особенности и типы изменений в растительном покрове залежей. Для основных типов формирования растительных сообществ на залежных землях изучены особенности многолетней динамики вегетационного индекса NDVI. Наиболее распространёнными в регионе являются травянистые залежи с формирующимися на них лесными насаждениями лиственного породного состава. Залежи с хвойными насаждениями приурочены к ареалам хвойных лесов. Увеличение сомкнутости древесных насаждений, формирующихся на залежах, более интенсивно протекает для угодий, зарастающих хвойными породами, чем лиственными. Для залежей с лиственными, хвойными и смешанными насаждениями установлена статистически значимая тенденция увеличения значений NDVI. Изучена зависимость между проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на залежных землях, и NDVI. Установлено, что для залежей с хвойными породами значения NDVI различны для разных градаций проективного покрытия кронами деревьев.

Ключевые слова: залежи, лесостепь, сукцессии, Среднерусская возвышенность, MODIS, Landsat, Sentinel, временные ряды, NDVI

Одобрена к печати: 21.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193

Введение

Исследование процессов формирования новых растительных сообществ на оставленных аграрных угодьях является одной из ключевых задач, решение которых позволит объективно оценить современные тенденции динамики растительного покрова. На залежных землях после прекращения аграрной деятельности начинаются процессы восстановления растительного и почвенного покровов, обусловленные отсутствием или минимизацией антропогенного воздействия (Голеусов, Лисецкий, 2009; Карелин и др., 2015). В связи с этим угодья, выведенные из сельскохозяйственного оборота, предоставляют уникальные возможности для анализа автогенных сукцессий, скорости их протекания, а также их типизации.

Территория юга Среднерусской возвышенности, преимущественно охватывающая Белгородскую обл., расположена в условиях умеренного климата и характеризуется интенсивным аграрным использованием. Пахотные земли занимают около 60 % территории (Терехин, 2016). В отличие от Нечерноземной зоны и ряда других областей Центрального Черноземья залежные земли здесь распространены в меньшей степени. Тем не менее с начала 1990-х гг. часть угодий была выведена из сельскохозяйственного оборота (Агроэкологическое..., 2008; Китов, Цапков, 2015; Китов и др., 2016). С учётом высокой антропогенной освоенности территории оставленные аграрные угодья являются одними из немногих типов объектов, на примере которых могут быть оценены современные региональные тенденции развития растительного покрова. В свете происходящих климатических изменений (Лебедева и др., 2017), следствием которых должны стать изменения и в растительности, решение данной задачи становится особенно актуальным.

По результатам геоботанических исследований, проведённых на оставленных аграрных угодьях юга лесостепной зоны, установлено, что на залежах распространяются как степные, так и лесные виды (Парахневич, 2008; Парахневич, Кирик, 2017). Согласно выполненным нами полевым исследованиям в 2009–2019 гг., аналогичные процессы протекают и на залежах лесостепи юга Среднерусской возвышенности. Они продолжают непрерывно и требуют изучения и оценки.

Изменения в состоянии растительности, наблюдающиеся на залежных землях, могут быть основной причиной изменения их спектрального отклика, который, в свою очередь, может быть изучен на основе многозональных спутниковых данных (Alcantara et al., 2012; Prishchepov et al., 2012; Yin et al., 2018). В связи с этим его количественная оценка представляет научный интерес для анализа и моделирования сукцессионных процессов, протекающих на угодьях, выведенных из сельскохозяйственного оборота.

Серии разновременных спутниковых данных дают возможность рассчитывать многолетние ряды спектральных показателей (Zhou et al., 2015), например вегетационных индексов, на основе которых может быть проведена реконструкция изменений, произошедших на залежах, начиная с момента прекращения их аграрного использования. Регулярно получаемые спутниковые данные, например MODIS, и информационные продукты на их основе дают возможность расчёта и анализа многолетних рядов спектральных характеристик для конкретных аграрных угодий, что позволяет моделировать долгосрочные изменения в растительном покрове (Терехин, 2015).

Цель настоящего исследования заключалась в оценке автогенных сукцессий, протекающих с начала 2000-х гг. по настоящее время на оставленных аграрных угодьях юга Среднерусской возвышенности. Основную рабочую гипотезу можно сформулировать следующим образом: увеличение сомкнутости древесной растительности, распространяющейся на залежах, влияет на их спектральный отклик и приводит к повышению значений индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс).

Задачами исследования являлись: определение типов растительных сообществ, формирующихся на залежах; оценка связи между спектральным откликом и изменениями в состоянии растительности; количественный анализ связи между проективным покрытием залежей кронами древесных сообществ, формирующихся на них, и значениями вегетационного индекса; анализ многолетних рядов NDVI для залежей с различными типами сукцессий.

Материалы и методика исследования

Исследование сукцессионных процессов, протекающих на залежах, было проведено на территории юга Среднерусской возвышенности, охватывающего Белгородскую обл. (рис. 1, см. с. 182).

В основу исследований были положены:

- материалы анализа разновременных спутниковых данных высокого пространственного разрешения из архивов открытого доступа, в первую очередь полученные из сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth);
- материалы полевых наблюдений, собранные в период 2009–2019 гг. на территории юга Среднерусской возвышенности;
- данные многозональной космической съёмки Landsat 2000–2018 гг.;
- многозональные снимки со спутника Sentinel-2 конца лета — начала осени 2018 г.;
- данные регулярно получаемой спутниковой съёмки с сенсора MODIS 2000–2018 гг.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе осуществили формирование экспериментальной выборки объектов, на основе которой был выполнен анализ сукцессионных процессов и изменений спектрального отклика, обусловленного ими. Для этого на основе совместного анализа разновременных спутниковых данных высокого пространственного

разрешения (1 м/пиксель), полученных из сервиса Google Планета Земля, многозональных снимков Landsat TM, ETM+ начала 2000-х гг. (30 м/пиксель) и материалов наземных обследований на территории Белгородской обл. было отобрано 170 объектов суммарной площадью 4005,4 га.

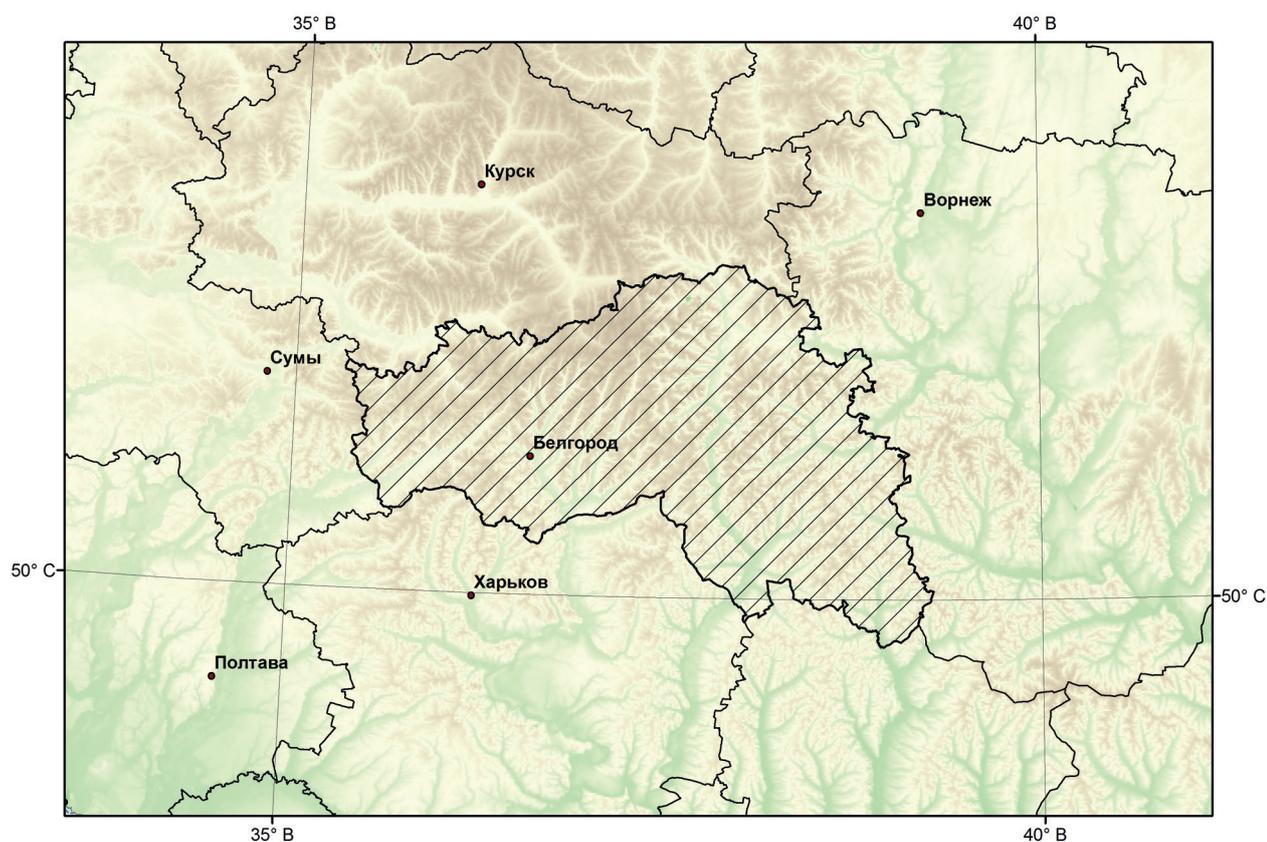


Рис. 1. Местоположение территории исследования

Выборка формировалась методом сплошного обследования территории региона на основе следующих критериев:

- залежи в выборке должны репрезентативно представлять основные региональные типы сукцессий и особенности формирования растительных сообществ;
- угодья должны быть пашней в 2000 г. и залежью по состоянию на осень 2018 г.;
- угодья должны находиться в состоянии залежи определённое непрерывное количество лет непосредственно перед 2018 г.

В результате были отобраны залежи с различными типами растительных сообществ, присутствующих на них по состоянию на 2018 г. и отражающих особенности сукцессий, которые наблюдаются на залежных землях региона.

Космические снимки из сервиса Google Планета Земля с пространственным разрешением 1 м/пиксель позволяют достоверно определять состояние угодья в определённый год, включая информацию о том, являлось ли оно залежью или пашней и какова степень его покрытия древесными насаждениями при их наличии.

Состояние угодий в начале 2000-х гг. определялось на основе снимков Landsat-TM, ETM+ (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov>), полученных на протяжении года и охватывающих все исследуемые объекты. Данные Landsat нами были использованы вследствие того, что покрытие детальными снимками из Google Планета Земля территории исследования по состоянию на 2000 г. было фрагментарным. Серия снимков Landsat, полученных

за вегетационный период, позволяет выявлять залежи по отсутствию на угодьях признаков распаханых почв, являющихся основным дешифровочным признаком пашни, на протяжении года.

На следующем этапе на основе отобранных залежей подготовили векторный слой контуров всех выявленных объектов. Его создание было выполнено в геоинформационной среде ArcGIS методом ручной оцифровки границ исследуемых угодий на основе многозональных снимков Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м/пиксель) конца лета — начала осени 2018 г. После этого на основе анализа снимков из Google Планета Земля и материалов полевых обследований для каждого оставленного угодья осуществили определение следующих параметров:

- состояние растительного покрова в 2018 г.: травянистые сообщества, доминирование травянистых сообществ с присутствием древесной растительности, доминирование древесной растительности с присутствием травянистых экосистем;
- тип древесных сообществ при их наличии: лиственный, хвойный, смешанный;
- проективное покрытие крон лесных сообществ (от 0 до 1);
- достоверно известный промежуток времени, в котором угодье непрерывно было залезью до 2018 г.

Проективное покрытие крон и его временная динамика выступали основными критериями, характеризующими степень распространения на залежах древесной растительности и скорость формирования лесных насаждений. В общей сложности на основе разновременных снимков из Google Планета Земля сверхвысокого пространственного разрешения было проведено 603 измерения величины проективного покрытия крон лесных насаждений. Оно измерялось по спутниковым данным (пространственное разрешение 1 м/пиксель) в долях от 0 до 1 от общей площади залежи.

Следующий этап исследования состоял в расчёте многолетних рядов июньских (середина июня) и августовских (середина августа) значений вегетационного индекса NDVI 2000—2017 гг. для каждого анализируемого угодья. Для их вычисления были использованы информационные продукты MOD13Q1 (Didan, 2015), полученные с ресурса <https://earthexplorer.usgs.gov/>. MOD13Q1 являются 16-дневными композитными изображениями вегетационного индекса NDVI с пространственным разрешением 250 м/пиксель. Они создаются на основе снимков MODIS, прошедших атмосферную и радиометрическую коррекцию, и на текущее время выступают единственным источником, позволяющим рассчитывать многолетние ряды индекса с несколькими десятками срезов за год начиная с 2000 г. для конкретных объектов. Значения NDVI для отдельных угодий были вычислены методом зональной статистики, т.е. способом расчёта его усреднённых величин в пределах контуров анализируемых залежей.

Вегетационный индекс NDVI основан на коэффициентах отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра. Он может быть применён для выявления изменений в зелёной фитомассе (Wall et al., 2008; Zhu, Liu, 2015). При формировании древесных сообществ на залежах увеличение площади древесной растительности и рост её растительной массы могут выступать основными факторами, определяющими в конкретный год показания индекса. Таким образом, была сформирована экспериментальная выборка, включающая, с одной стороны, характеристики залежей и величины проективного покрытия крон на определённые годы, а с другой — соответствующие им значения вегетационного индекса. В связи с ограничениями пространственного разрешения снимков MODIS для статистического анализа были использованы угодья площадью не менее 15—20 га. При этом для анализа старались отбирать залежи геометрически максимально правильной, не вытянутой формы, чтобы большинство пикселей располагалось внутри их контуров.

Для верификации зависимостей между проективным покрытием крон и NDVI, оценённым по данным MODIS, провели параллельное исследование связи между этими параметрами по данным Landsat TM, OLI с пространственным разрешением 30 м/пиксель. В связи с более низкой периодичностью получения снимков Landsat, составляющей 16 дней, расчёт многолетних рядов вегетационного индекса одного месяца не представляется возможным.

Обусловлено это наличием облачности на многих снимках. В то же время анализ связи между проективным покрытием крон и NDVI не требует многолетних серий спектральных характеристик. Для выполнения исследования достаточно формирование выборки с присутствием в ней залежей с разной степенью покрытия кронами и соответствующих им значений спектральных показателей, измеренных в одну и ту же фенофазу. Для оценки связи между проективным покрытием и NDVI удалось подобрать безоблачные снимки, полученные 10 августа 2007 г. и 24 августа 2018 г. (Path 177, Row 24). Оба снимка прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию, после чего с их помощью были рассчитаны значения вегетационного индекса. Далее на их основе методом зональной статистики вычислили значения индекса для конкретных угодий.

Заключительный этап исследования состоял в статистическом анализе полученных данных в программах STATISTICA и R. В рамках этой части исследования были изучены особенности многолетних рядов вегетационного индекса для залежей с различными типами сукцессий. Для выявления и оценки статистической значимости трендов в динамике NDVI использовали тест Манна – Кендалла, который представляет собой непараметрический критерий для определения монотонной, статистически значимой тенденции. На следующем этапе статистического анализа выполнили количественную оценку связи между величинами проективного покрытия крон и соответствующих им значений NDVI для каждого изученного типа сукцессионных процессов.

Результаты и их обсуждение

На основе анализа данных космической съёмки высокого пространственного разрешения и материалов полевых обследований установлено, что залежные земли региона можно разделить на четыре группы по типу формирующихся на них растительных сообществ:

- травянистые залежи с распространяющимися на них лиственными породами;
- травянистые залежи с распространяющимися на них хвойными породами;
- травянистые залежи с распространяющимися на них смешанными лесными насаждениями;
- травянистые залежи без древесных пород.

Для изучения их особенностей экспериментальную выборку формировали таким образом, чтобы в ней репрезентативно были представлены залежи всех типов (табл. 1). Для каждого из них были изучены особенности динамики спектрально-отражательных свойств. Их оценка включала анализ многолетней динамики вегетационного индекса NDVI, анализ изменения его величин вследствие увеличения проективного покрытия крон древесных насаждений, формирующихся на залежах.

Таблица 1. Характеристики проанализированных залежных земель

Типы залежей	Количество	Площадь средняя, га	Площадь суммарная, га	Число измерений доли древесных растений
Травянистые с лиственными породами	74	18,6	1380,0	265
Травянистые с хвойными породами	45	25,5	1147,6	200
Травянистые со смешанными лесными насаждениями	30	35,2	1056,5	138
Травянистые без древесных пород	21	20,0	421,4	—
Всего	170	23,5	4005,4	603

Залежи с распространяющимися на них лиственными породами

Данный тип залежей территориально представлен в регионе в наибольшей степени. При этом не установлено выраженных закономерностей в его пространственном распространении на территории региона. Такие залежи представлены в большинстве административных районов области. В аналитической выборке они составили 43,5 % от общего числа проанализированных объектов. Основной особенностью этого типа залежей является доминирование травяных пространств над участками, покрытыми древесной растительностью. Из 31 залежи, для которых удалось определить проективное покрытие крон в 2018 г., 25 характеризовалось его величиной от 0,01 до 0,25 и только три залежи имели проективное покрытие свыше 0,6. Оценка многолетних рядов июньских и августовских значения NDVI показала, что в период 2000–2017 гг. наблюдалась статистически значимая тенденция к увеличению межгодовых значений индекса (рис. 2), которая прерывалась в отдельные засушливые годы, как, например, в 2010 г.

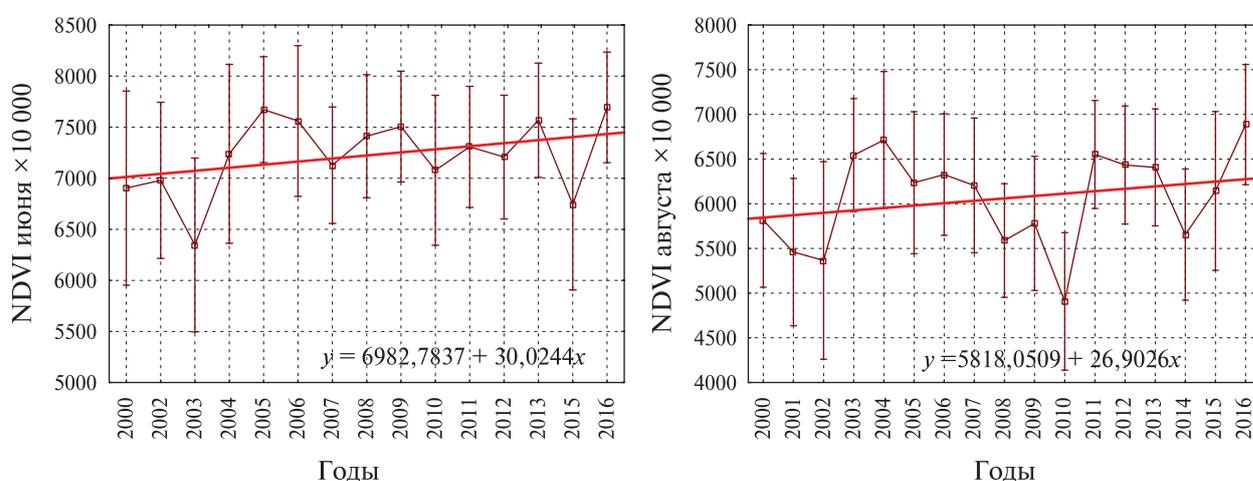


Рис. 2. Многолетняя динамика июньских и августовских значений NDVI для залежей с распространяющимися на них лиственными древесными породами

Статистическая значимость ($p = 0,0000$) положительной тенденции межгодовых значений NDVI как августовских ($\tau = 0,149$), так и июньских ($\tau = 0,085$) установлена по результатам теста Манна – Кендалла. Основной причиной роста межгодовых значений индекса могло выступать постепенное увеличение биомассы растительных сообществ залежей, происходящее вследствие увеличения доли древесных насаждений, формирующихся на них.

Оценка связи между покрытием крон древесных насаждений и NDVI, измеренным по данным MOD13Q1, показала (рис. 3, см. с. 186), что наибольший рост значений индекса наблюдается в период по достижению величин проективного покрытия 20 %.

При этом многие залежи даже с небольшой долей древесных сообществ характеризовались высокими значениями вегетационного индекса. Соответствующие особенности установлены на основе анализа как июньских, так и августовских значений NDVI.

Анализ показал, что логарифмическая зависимость описывает связь между проективным покрытием и NDVI с наиболее высоким коэффициентом детерминации (R^2). В то же время он характеризовался небольшими величинами и составил 0,11 для июньских и 0,10 для августовских значений. Обусловлено это может быть слабой представленностью в выборке (и фактически на территории исследования) залежей с высокими значениями проективного покрытия кронами древесной растительности лиственного породного состава и определённым вкладом в значения NDVI в отдельных случаях травянистой растительности, присутствующей на залежах.

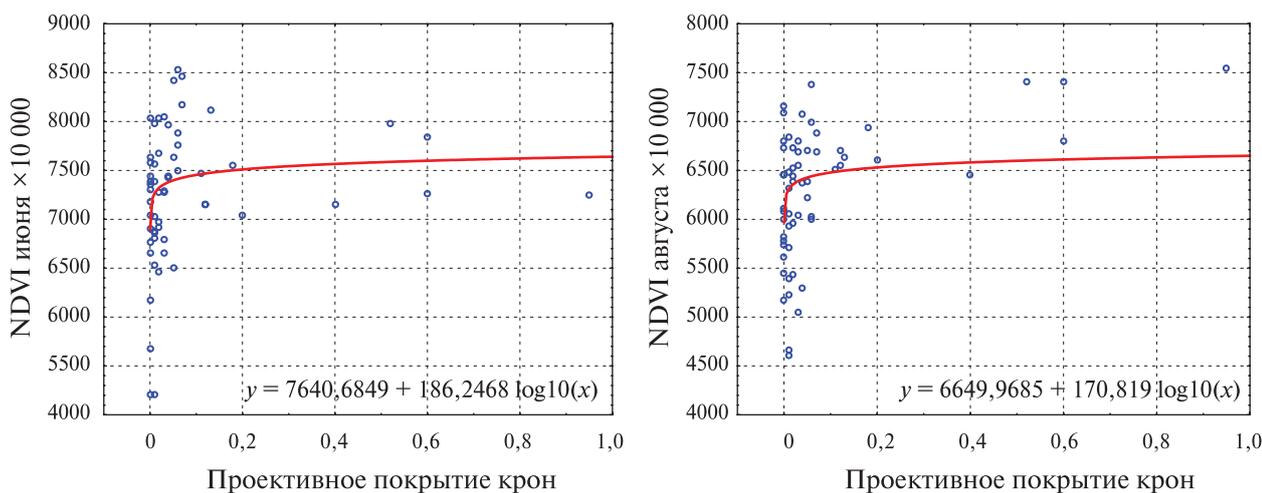


Рис. 3. Зависимость между проективным покрытием крон древесной растительности и значениями вегетационного индекса июня и августа для залежей, на которых распространяются лиственные породы

Залежи с распространяющимися на них хвойными породами

Особенностями этого типа залежных земель являются приуроченность к ареалам концентрации хвойных лесов и более высокая по сравнению с предыдущим типом степень покрытия древесными сообществами по состоянию на 2018 г. Из 22 залежей, для которых удалось определить проективное покрытие крон в 2018 г., шесть характеризовались его величиной от 0,01 до 0,25 и 11 залежей имели проективное покрытие свыше 0,5. Подавляющая часть таких залежей сконцентрирована на северо-востоке Белгородской обл.

По результатам теста Манна – Кендалла установлена статистическая значимость положительной тенденции NDVI для июньских ($\tau = 0,302$) и августовских ($\tau = 0,386$) значений на уровне значимости многим меньше 0,05 для залежей с формирующимися хвойными лесными насаждениями. С учётом того, что все анализируемые залежи были пашней в 2000 г., можно утверждать, что для залежей с хвойными породами характерна более высокая скорость зарастания лесом, чем для залежей с лиственными насаждениями (см. рис. 2). Этот факт следует также из графиков, характеризующих увеличение межгодовых значений вегетационного индекса (рис. 4) и более высоких значений tau-статистики Кендалла.

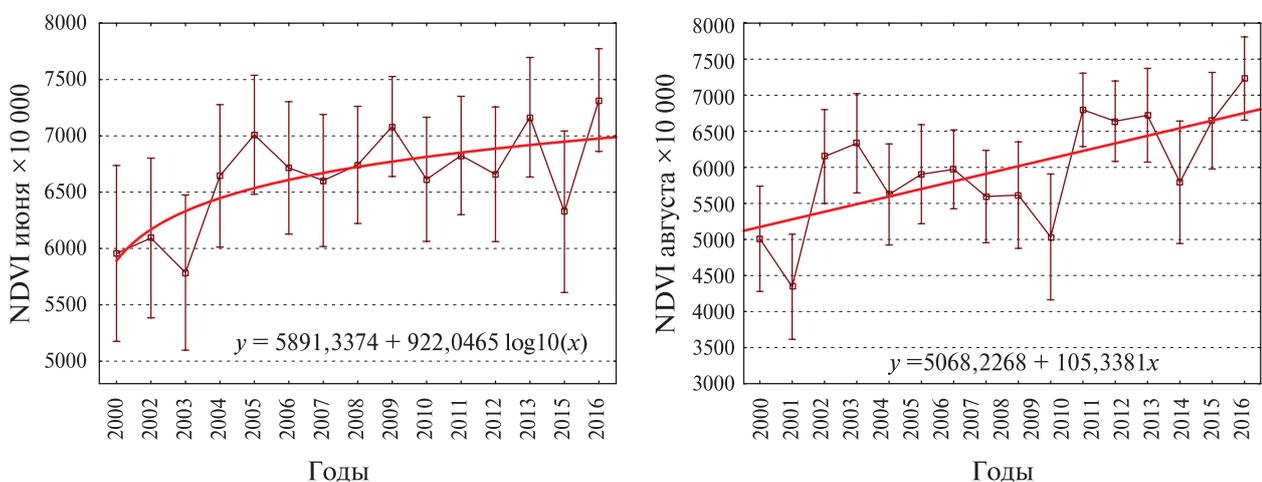


Рис. 4. Многолетняя динамика июньских и августовских значений NDVI для залежей с формирующимися хвойными насаждениями

Согласно результатам анализа космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, для залежей с формирующимися хвойными насаждениями характерно более интенсивное увеличение доли древесной растительности в годы, следующие за началом процесса лесовозобновления, чем для залежей с лиственными породами.

Оценка связи между покрытием крон древесных сообществ и величинами вегетационного индекса NDVI, измеренным по данным MOD13Q1, показала (рис. 5), что для июньских значений она наилучшим образом описывается логарифмической зависимостью (коэффициент детерминации $R^2 = 0,28$), а для августовских значений — линейной ($R^2 = 0,37$) или логарифмической ($R^2 = 0,31$) функцией.

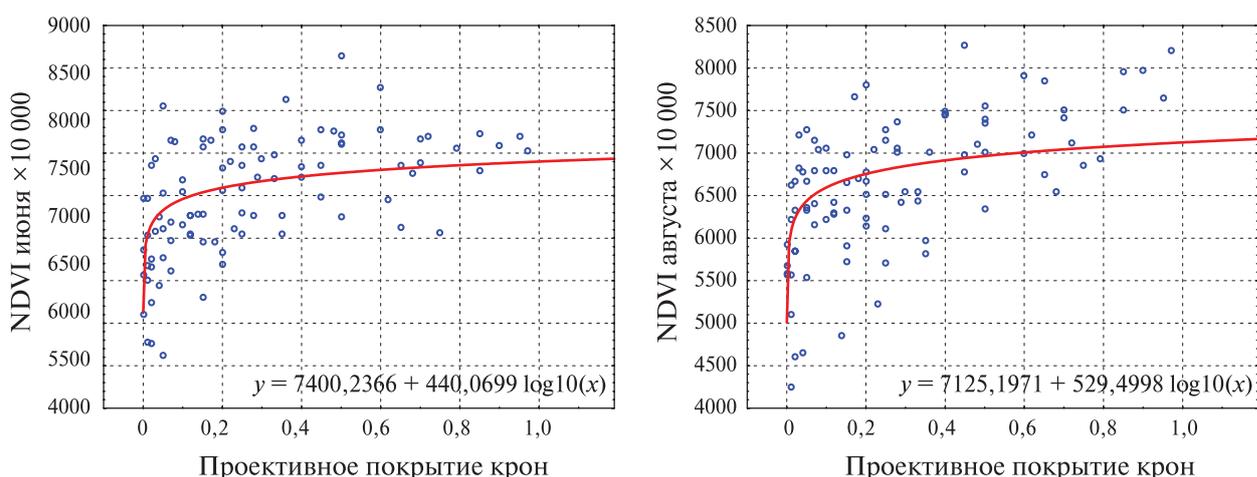


Рис. 5. Зависимость между проективным покрытием крон древесной растительности и значениями вегетационного индекса июня и августа для залежей, на которых распространяются хвойные породы

Наиболее интенсивно рост величин индекса наблюдается до достижения формирующимся лесным насаждением величин проективного покрытия крон 0,4–0,5.

Залежи с распространяющимися на них смешанными лесными насаждениями

Залежи этого типа, также как и залежи с формирующимися хвойными насаждениями, приурочены к ареалам распространения хвойных (сосновых) лесов. Практически все они сосредоточены на северо-востоке области. Многолетняя динамика вегетационного индекса у них во многом аналогична динамике NDVI залежей с хвойными насаждениями (рис. 6, см. с. 188). Наличие положительной многолетней динамики вегетационного индекса по результатам теста Манна–Кендалла установлено для июньских ($\tau = 0,216$) и августовских ($\tau = 0,295$) значений индекса на уровне значимости многим меньше 0,05.

Из 24 залежей, для которых удалось определить проективное покрытие крон в 2018 г., 19 характеризовались его величиной от 0,01 до 0,25 и только одна залежь имела проективное покрытие свыше 0,5. То есть по степени покрытия древесной растительностью по состоянию на 2018 г. этот тип больше похож на залежи, зарастающие лиственными породами. Оценка зависимости между проективным покрытием крон и NDVI, измеренным по данным MOD13Q1 (рис. 7, см. с. 188), показала, что линейное уравнение описывает её с наиболее высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 0,21$ и $R^2 = 0,30$).

В то же время из графиков видно, что с увеличением в выборке залежей с высокими значениями проективного покрытия кронами деревьев она должна приближаться к логарифмической или степенной.

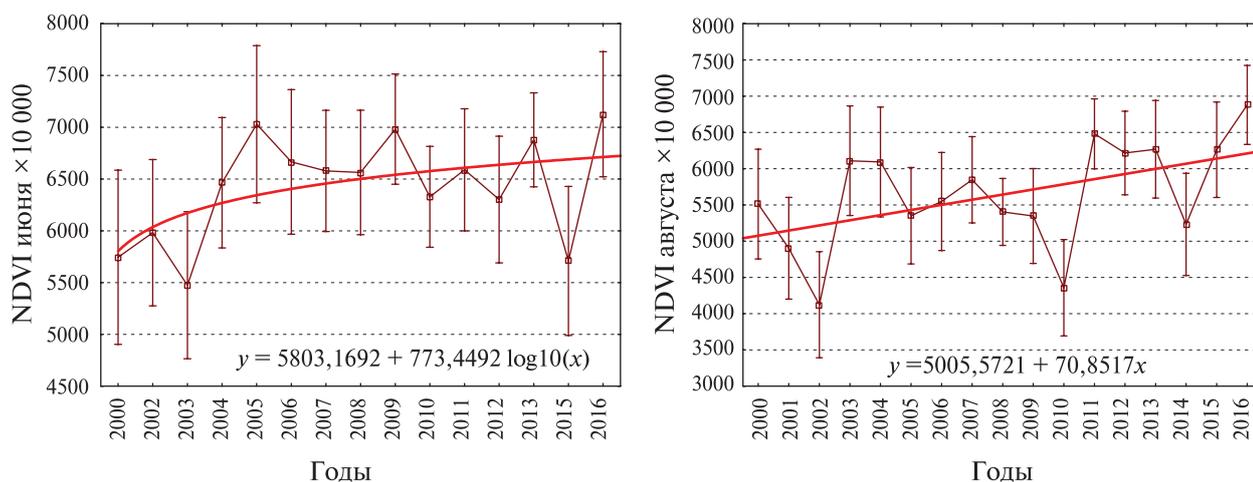


Рис. 6. Многолетняя динамика июньских и августовских значений NDVI для залежей с формирующимися древесными сообществами смешанного породного состава

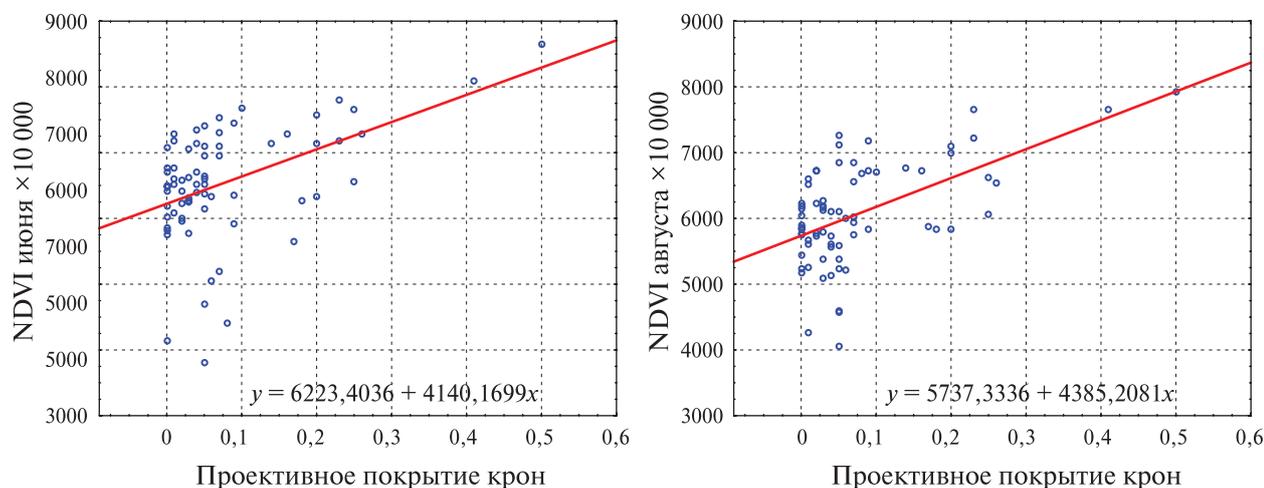


Рис. 7. Зависимость между проективным покрытием кроны древесной растительности и значениями вегетационного индекса июня и августа для залежей, на которых распространяются насаждения смешанного состава

Травянистые залежи без древесных пород

Для данного типа залежей не установлено статистически значимого тренда NDVI (рис. 8, см. с. 189). Для июньских значений $\tau = 0,006$ на уровне значимости 0,177, для августовских значений $\tau = 0,069$ на уровне значимости 0,087. Обусловлено это тем, что их травянистые сообщества характеризуются определённой стационарностью спектрально-отражательных характеристик.

Динамика межгодовых значений NDVI в этом случае больше позволяет определять засушливость июня или августа, так как от этого зависит объём зелёной растительной массы травяных сообществ. Наиболее сухой 2010 г., а также жаркий 2008 г. наглядно отображаются по значениям вегетационного индекса.

Статистическая оценка средних значений вегетационного индекса, измеренных по данным MOD13Q1 и соответствующих различным градациям проективного покрытия залежей кронами древесных растений (0–20 %, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 %), показала следующее. Для залежей с хвойными насаждениями установлено статистически значимое отличие NDVI (уровень значимости 0,05) для градаций с низкими и высокими значениями проективного покрытия (табл. 2), а также определённая тенденция к их увеличению по мере перехода от одной градации к другой.

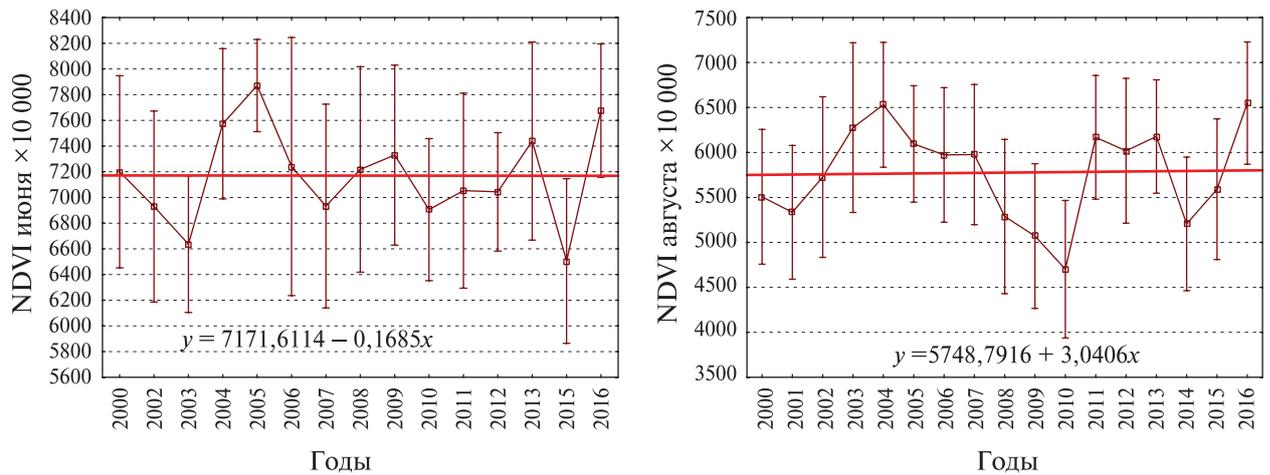


Рис. 8. Многолетняя динамика июньских и августовских значений NDVI для залежей с травяными экосистемами без древесной растительности

Таблица 2. Значения вегетационного индекса, соответствующие различным классам проективного покрытия залежей хвойной древесной растительностью

Проективное покрытие древесной растительностью, %	Июнь		Август	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
0–20	0,665	0,07	0,628	0,08
20–40	0,719	0,05	0,654	0,06
40–60	0,746	0,03	0,722	0,05
60–80	0,755	0,06	0,735	0,04
80–100	0,757	0,02	0,786	0,03

Для категорий залежей с лиственными породами таких значимых отличий не обнаружено, что может быть обусловлено тем, что залежи аналогичных возрастов, т.е. не старше 18 лет, практически полностью покрыты древесной растительностью лиственного породного состава, в регионе встречаются значительно реже. В связи с этим по ним не удалось сформировать такую репрезентативную выборку, как для залежей с хвойными породами.

Таким образом, установлено наличие значимых многолетних трендов NDVI на залежах с древесной растительностью и их отсутствие на залежах без древесных пород. В то же время многолетние значения вегетационного индекса демонстрируют значительную вариабельность, а зависимости между сомкнутостью и значениями NDVI, измеренными по данным MOD13Q1, характеризуются невысокими величинами коэффициента детерминации. Предположительно, это связано с низким пространственным разрешением данных MODIS (250 м/пиксель) и не очень большим размером залежей, вследствие чего смешанные пиксели оказывают заметное влияние на значения индекса. Для проверки этого предположения был проведён эксперимент с использованием данных более высокого пространственного разрешения Landsat TM, OLI.

Оценка связи между покрытием кроны древесных насаждений и величинами вегетационного индекса NDVI, измеренными по августовским снимкам Landsat, показала (рис. 9, см. с. 190), что для залежей с лиственными породами она может быть описана логарифмической или степенной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,56$, а для залежей с хвойными породами с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,65$.

Аналитическая выборка залежей с лиственными породами включала 33 единицы, с хвойными породами — 39 единиц. Из рис. 9 видно, что в отличие от аналогичных зависимостей,

рассчитанных по данным MODIS (см. рис. 3, 5), связь между проективным покрытием крон и NDVI, измеренным по Landsat, прослеживается намного чётче. Важно отметить, что описанные зависимости характерны для залежей, максимальный возраст которых составляет 17–18 лет. Соответственно, примерно таким же является и наибольший возраст лесных насаждений, формирующихся на них.

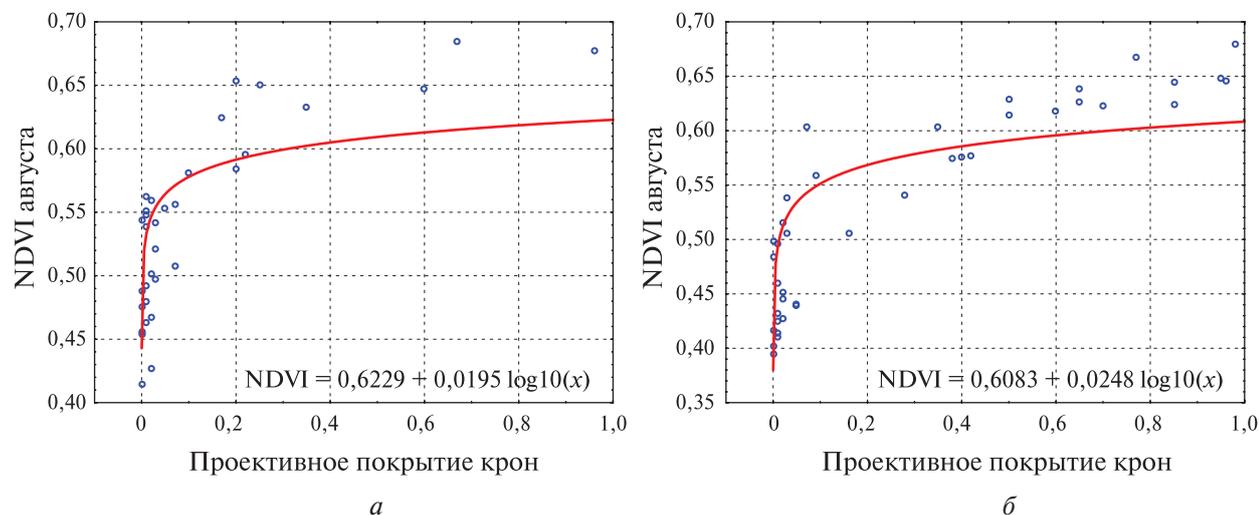


Рис. 9. Зависимость между проективным покрытием крон древесной растительности, распространяющейся на залежах, и значениями вегетационного индекса, измеренными по данным Landsat, для залежей с лиственными (а) и хвойными (б) породами

Полученные данные о соотношении значений NDVI, измеренных по Landsat, и сомкнутости древесных сообществ позволили более убедительно продемонстрировать наличие зависимости между этими показателями и тем самым получить подтверждение исходной гипотезы. Зависимости между величиной проективного покрытия (сомкнутости) крон и значениями NDVI, измеренными по данным MODIS (MOD13Q1) и Landsat, имеют близкий вид и могут быть наиболее полно описаны логарифмической или степенной кривой. При этом уравнения, основанные на значениях NDVI, вычисленных с использованием снимков Landsat, характеризуются более высокими коэффициентами детерминации в сравнении с аналогичными уравнениями, построенными на основе данных MOD13Q1.

Выводы

С использованием материалов разновременной космической съёмки и полевых наблюдений изучены особенности сукцессионных процессов, наблюдающихся на залежных землях юга Среднерусской возвышенности. Выделено четыре основных вида формирования растительных сообществ на залежных землях. Для каждого из них изучены особенности многолетней динамики вегетационного индекса NDVI и зависимость между проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на них, и величинами вегетационного индекса. Увеличение сомкнутости лесных насаждений, формирующихся на залежах, как правило, более интенсивно протекает для залежей с хвойными породами. При этом залежи с лиственными породами в регионе представлены в большей степени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-20018.

Литература

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота. М.: Росинформагротех, 2008. 64 с.
2. Голушов П. В., Лисецкий Ф. Н. Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
3. Карелин Д. В., Люри Д. И., Горячкин С. В., Лунин В. Н., Кудиков А. В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366.
4. Китов М. В., Цанков А. Н. Изменения площадей залежных земель на европейской территории России за период 1990–2013 гг. // Науч. вед. Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2015. Т. 32. № 15(212). С. 163–171.
5. Китов М. В., Григорьева О. И., Цанков А. Н. О результатах оценки площади залежных земель в Белгородской области // Степной бюл. 2016. № 46. С. 29–35.
6. Лебедева М. Г., Крымская О. В., Чендев Ю. Г. Изменения условий атмосферной циркуляции и региональные климатические характеристики на рубеже XX–XXI вв. (на примере Белгородской области) // Науч. вед. Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2017. № 18(267). С. 157–163.
7. Парахневич Т. М. Особенности динамики восстановительных сукцессий на разновозрастных залежах // Вестн. Воронежского гос. аграрного ун-та. 2008. № 3–4(18–19). С. 13–18
8. Парахневич Т. М., Кирик А. И. Структура и динамика растительного покрова на разновозрастных залежах // Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та. 2017. № 4(67). С. 43–50.
9. Терехин Э. А. Анализ многолетней динамики вегетационного индекса для посевных площадей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 48–58.
10. Терехин Э. А. Геоинформационный подход к мониторингу и оценке состояния посевных площадей с применением спутниковых данных (на примере Белгородской области) // Науч. вед. Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2016. № 18(239). С. 148–155.
11. Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A. V., Radeloff V. C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 124. P. 334–347.
12. Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.
13. Prishchepov A. V., Radeloff V. C., Dubinin M., Alcantara C. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 126. P. 195–209.
14. Wall L., Larocque D., Leger P. M. The early explanatory power of NDVI in crop field modeling // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 2211–2225.
15. 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.
16. Zhou J., Jia L., Menenti M. Reconstruction of global MODIS NDVI time series: performance of harmonic analysis of time series (hants) // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 163. P. 217–228.
17. Zhu X., Liu D. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 102. P. 222–231.

Satellite-based estimation of successional processes on abandoned farmland of south Central Russian Upland

E. A. Terekhin

*Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

The results of the succession processes analysis on abandoned arable lands of the forest-steppe zone of the Central Russian Upland are presented. Using data from 170 objects located in the Belgorod region, the features and types of changes in the vegetation cover of abandoned arable lands are studied.

The results are obtained using multi-temporal satellite data of 2000–2018 and ground truth measurements. The peculiarities of the NDVI vegetation index long-term dynamics is studied for the main types of formation of plant communities on the abandoned arable lands. Grassy fallows with deciduous trees are most common in the region. The abandoned arable lands with coniferous species are confined to the places of coniferous forests. The increase of tree communities crown closure on the fallows proceeds more intensively for abandoned arable lands that are overgrown with conifers than deciduous species. A statistically significant increasing NDVI trend is established for abandoned arable lands with deciduous, coniferous and mixed stands. The relationship between the cover of fallows with the crowns of tree stands and NDVI is studied. Coniferous fallows are characterized by different NDVI values for various gradations of crowns projective cover.

Keywords: abandoned arable lands, forest-steppe, successions, Central Russian Upland, MODIS, Landsat, Sentinel, time series, NDVI

Accepted: 21.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193

References

1. *Agroekologicheskoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya zemel' Rossii* (Agroecological state and prospects for the use of the lands of Russia, that left the active crop rotation), Moscow: Rosinformagrotekh, 2008, 64 p.
2. Goleusov P. V., Lisetskii F. N., *Vosproizvodstvo pochv v antropogennykh landshaftakh lesostepi* (Soil reproduction in anthropogenic landscapes of forest-steppe), Moscow: GEOS, 2009, 210 p.
3. Karelin D. V., Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Lunin V. N., Kudikov A. V., *Izmenenie pochvennoi emissii dioksida ugleroda v khode postagrogennoi suksessii v chernozemnoi lesostepi* (Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe), *Pochvovedenie*, 2015, No. 11, pp. 1354–1366.
4. Kitov M. V., Tsapkov A. N., *Izmeneniya ploshchadei zaleznykh zemel' na evropeiskoi territorii Rossii za period 1990–2013 gg.* (Assessment of the area of fallow land in the Belgorod region and other regions of European Russia for the period 1990–2013 years), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2015, Vol. 32, No. 15(212), pp. 163–171.
5. Kitov M. V., Grigorieva O. I., Tsapkov A. N., *O rezul'tatakh otsenki ploshchadi zaleznykh zemel' v Belgorodskoi oblasti* (On results of estimation of square of fallow lands in Belgorod province), *Stepnoi byulleten'*, 2016, No. 46, pp. 29–35.
6. Lebedeva M. G., Krymskaya O. V., Chendev Yu. G., *Izmeneniya uslovii atmosfernoii tsirkulyatsii i regional'nye klimaticheskie kharakteristiki na rubezhe XX–XXI vv. (na primere Belgorodskoi oblasti)* (Changes in the atmospheric circulation conditions and regional climatic characteristics at the turn of XX–XXI centuries (on example of Belgorod region)), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2017, No. 18(267), pp. 157–163.
7. Parakhnevich T. M., *Osobennosti dinamiki vosstanovitel'nykh suksessii na raznovozrastnykh zaleznykh* (Features of the dynamics of restorative successions on uneven-aged fallows), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2008, No. 3–4(18–19), pp. 13–18.
8. Parakhnevich T. M., Kirik A. I., *Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova na raznovozrastnykh zaleznykh* (The structure and dynamics of vegetation on the different age abandoned fields), *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, No. 4(67), pp. 43–50.
9. Terekhin E. A., *Analiz mnogoletnei dinamiki vegetatsionnogo indeksa dlya posevnykh ploshchadei* (Analysis of vegetation index long-term dynamics for crop areas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 48–58.
10. Terekhin E. A., *Geoinformatsionnyi podkhod k monitoringu i otsenke sostoyaniya posevnykh ploshchadei s primeneniem sputnikovykh dannykh (na primere Belgorodskoi oblasti)* (Geoinformation approach to monitoring and assessment of crop areas using remote sensing data (a case study of Belgorod oblast)), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2016, No. 18(239), pp. 148–155.
11. Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A. V., Radeloff V. C., *Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data*, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 124, pp. 334–347.
12. Didan K., *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V006 [Data set]*, NASA EOSDIS LP DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.
13. Prishchepov A. V., Radeloff V. C., Dubinin M., Alcantara C., *The effect of Landsat ETM+/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe*, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 126, pp. 195–209.

14. Wall L., Larocque D., Leger P. M., The early explanatory power of NDVI in crop field modeling, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, pp. 2211–2225.
15. 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.
16. Zhou J., Jia L., Menenti M., Reconstruction of global MODIS NDVI time series: performance of harmonic analysis of time series (hants), *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 217–228.
17. Zhu X., Liu D., Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 102, pp. 222–231.