

## Процессы лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири и их анализ с применением данных дистанционного зондирования

Э. А. Терехин<sup>1</sup>, Т. С. Постернак<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, 308015, Россия  
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия  
E-mail: posternakts@gmail.com*

В статье приведены результаты анализа процессов лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири с применением данных дистанционного зондирования. На основе информации со 152 объектов, расположенных на территории Томской и Кемеровской областей, выполнена количественная оценка связи между возрастом мелколиственных лесных насаждений, формирующихся на залежах, и коэффициентами спектральной яркости. Отражательные характеристики изучены для залежей с лесными насаждениями возрастом от 8 до 17 лет. Повышение возраста лесных сообществ обуславливает снижение коэффициентов отражения в средней инфракрасной области и величины их стандартных отклонений. Для залежей, зарастающих лесной растительностью, изучены особенности многолетней динамики вегетационного индекса NDVI. Установлено, что рост межгодовых значений вегетационного индекса июня и августа происходит по логарифмической зависимости. Наибольший рост наблюдается в первые пять лет после начала процесса лесовозобновления. Логарифмической зависимостью может быть описана также связь между сомкнутостью лесных насаждений и летними значениями вегетационного индекса. Повышение сомкнутости лесных насаждений, формирующихся на залежах, сопровождается снижением стандартных отклонений для коэффициентов отражения в инфракрасной области и для значений вегетационного индекса.

**Ключевые слова:** залежи, лес, лесовозобновление, спутниковые снимки, Landsat, MODIS, многолетняя динамика, Западная Сибирь, вегетационный индекс

Одобрена к печати: 29.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-161-172

### Введение

Изучение состояния растительного покрова аграрных земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота, является одним из ключевых условий принятия решений по их дальнейшему использованию (Агроэкологическое..., 2008). В связи с этим проблема изучения растительности залежей является актуальной для многих регионов России (Жукова, Андрианова, 2013; Королева и др., 2018; Новикова, 2009; Парахневич, Кирик, 2017).

На залежных землях после прекращения аграрной деятельности начинаются процессы восстановления почвенно-растительного покрова в условиях отсутствия антропогенного воздействия. Формирование новых растительных ассоциаций на оставленных угодьях обуславливает изменение их спектрально-отражательных свойств (Терехин, 2017; Estel et al., 2015; Yin et al., 2018), изучение которых может быть использовано для анализа восстановительных сукцессий. При этом к настоящему времени оно во многом остаётся неизученным.

В этой связи актуальной становится проблема количественного анализа спектрального отклика таких территорий и его многолетней динамики, оценка которой позволит совершенствовать подходы к мониторингу залежных земель. Проблема оценки их состояния актуальна и для юга Западной Сибири (Черноусова, 2016), включая подзону мелколиственных лесов. Территория региона относится к зоне «рискованного земледелия» вследствие значительных сезонных и суточных колебаний температуры, что подтверждает необходимость оценки

состояния используемых и выведенных из сельскохозяйственного оборота аграрных земель (Каличкин, 2016). Участки бывшей пашни, на которых наблюдаются процессы лесовозобновления, выступают объектами, позволяющими количественно оценить и проанализировать особенности процесса распространения древесной растительности на залежах, протекающего в климатических условиях юга Западной Сибири.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении процессов распространения древесной растительности и особенностей лесовозобновления на залежах юга Томской и северной части Кемеровской областей с использованием разновременных спутниковых данных. Задачами исследования являлись количественная оценка спектрально-отражательных свойств разновозрастных залежей и анализ многолетней динамики отражательных свойств, обусловленной изменениями в их растительном покрове.

### Материалы и методика исследования

Экспериментальное изучение процессов лесовозобновления на залежных землях было выполнено на примере юга Томской и прилегающих районов Кемеровской областей на площади 9541,3 км<sup>2</sup> (рис. 1). Территория исследования располагалась в условиях континентального климата у южной границы таёжной зоны в подзоне мелколиственных лесов (Евсеева, 2001). Значительную часть здесь занимают лесные массивы, среди которых пахотные земли, включая участки оставленной пашни, распространены достаточно большими группами.

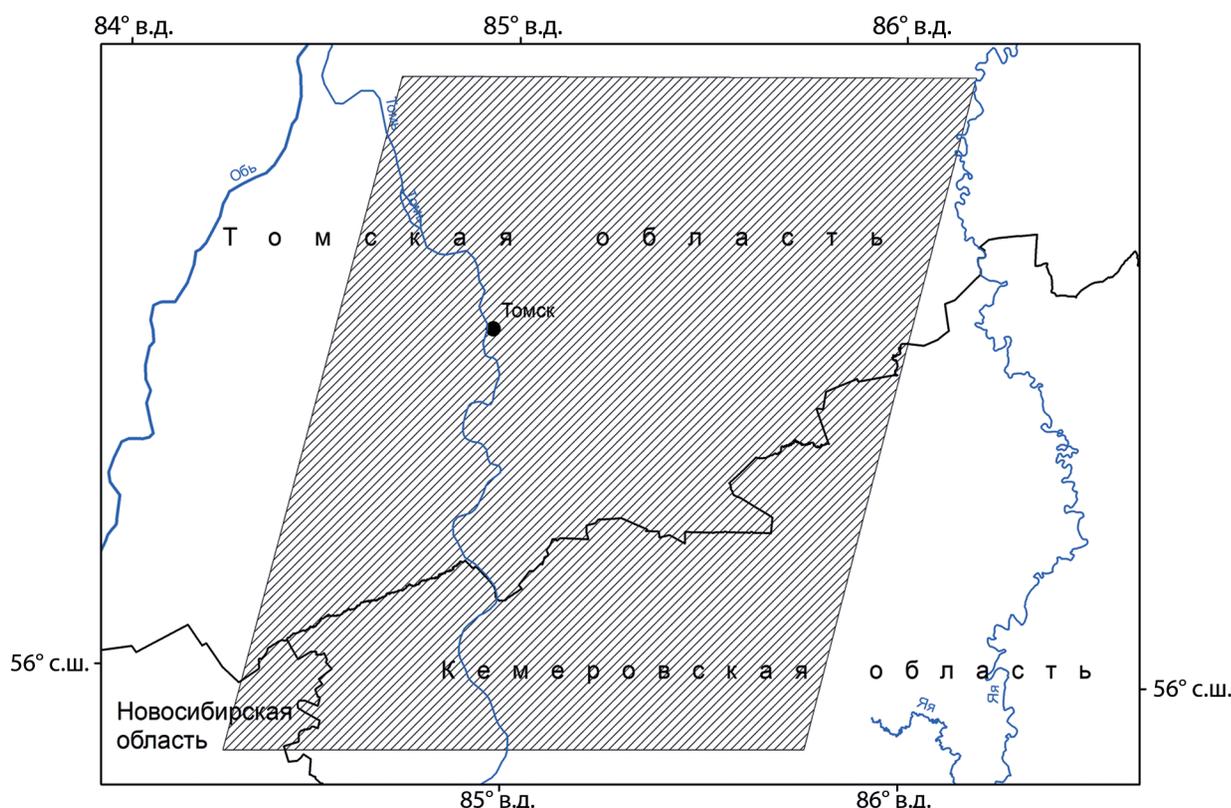


Рис. 1. Местоположение территории исследования

В процессе сукцессий на залежных землях исследуемой территории распространяются преимущественно мелколиственные породы, среди которых доминирует берёза (Лойко и др., 2010). Вследствие этого в настоящей статье мы анализировали наиболее типичный для региона тип восстановления лесных экосистем на залежах — возобновление лиственных насаждений после прекращения пахотных работ.

Первый этап состоял в формировании репрезентативной выборки объектов, которая позволила бы оценить основные особенности изменения растительного покрова на оставленных аграрных угодьях.

На основе совместного анализа детальных разновременных изображений из сервиса Google Планета Земля (пространственное разрешение 1 м/пиксель) и многозональных снимков Landsat (разрешение 30 м/пиксель), полученных в период 2000–2017 гг. в пределах исследуемой территории, было отобрано 152 объекта, каждый из которых подбирался на основе группы критериев. Объекты для исследования отбирались таким образом, чтобы каждый из них был пашней по состоянию на 2000 г. и залежью, покрытой более чем на 40–50 % лесом, в 2017 г. Все объекты должны были располагаться в примерно аналогичных геоморфологических условиях и условиях увлажнения, что определялось на основе анализа данных SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org>) и оценки удалённости угодий от речных систем. Минимальный размер объектов должен был позволять объективно оценить их спектрально-отражательные свойства исходя из пространственного разрешения спутниковых изображений, по которым рассчитывали спектральные показатели. С учётом того, что наименьшее пространственное разрешение используемых спутниковых данных (MODIS) составляло 250 м/пиксель, для анализа подбирались объекты площадью не менее 15–20 га (2,5–3 пикселей снимка).

Изображения метрового пространственного разрешения из сервиса Google Планета Земля позволяли достаточно достоверно выявлять факт наличия и степень распространения древесной растительности на залежи. Подборка разновременных снимков соответствующей детальности даёт возможность определять и возраст залежей. Разновременные изображения также использовались нами для анализа степени покрытия залежи древесной растительностью. С помощью зимних снимков, на которых лиственные и хвойные породы чётко разделяются между собой, проводилась верификация типа древесной растительности на залежи (мелколиственный или хвойный).

Снимки Landsat (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) по детальности уступают изображениям из сервиса Google Планета Земля, но их преимущество заключается в том, что они могут быть использованы для количественного анализа спектрально-отражательных характеристик.

Таблица 1. Параметры основных многозональных снимков Landsat, используемых для выявления процессов лесовозобновления

| Дата получения | Сектор в системе WRS-2 | Сенсор |
|----------------|------------------------|--------|
| 25.06.2000     | 147/020                | ETM+   |
| 15.05.2000     | 147/020                | ETM+   |
| 12.08.2000     | 147/020                | ETM+   |
| 04.09.2000     | 148/021                | ETM+   |
| 25.06.2000     | 147/021                | ETM+   |
| 23.08.2016     | 148/021                | OLI    |
| 04.06.2016     | 148/020                | OLI    |
| 16.06.2017     | 147/021                | OLI    |

Для оценки изменения спектрально-яркостных свойств залежей нами были использованы снимки Landsat (path 147, row 21) от 25.06.2000 и 16.06.2017 (табл. 1). Path (колонка) и row (ряд) определяют местоположение снимков Landsat на земной поверхности в специально используемой системе WRS-2 (Worldwide Reference System). Кроме того, набор снимков Landsat за соответствующие годы применялся для параллельного анализа (наряду с изображениями из Google Планета Земля) состояния исследуемых угодий в эти периоды. Группа из снимков Landsat, полученных за вегетационный сезон (например 2000 г.), позволяет достаточно достоверно определить степень использования угодья под пашню либо его отсутствие. Данные

Landsat были нами проанализированы в различных вариантах синтеза для повышения достоверности оценки. Для Landsat TM, ETM+ в первую очередь это 7–5–3 (диапазоны 2,09–2,35; 1,55–1,75; 0,63–0,69 мкм), 4–3–2 (диапазоны 0,75–0,9; 0,63–0,69; 0,525–0,605 мкм) и 3–2–1 (диапазоны видимой зоны спектра).

Для каждой залежи методом анализа разновременных детальных снимков из сервиса Google Планета Земля (пространственное разрешение 1 м/пиксель) оценивался их возраст, что впоследствии позволило изучить спектрально-отражательные свойства залежей разных возрастов. Сформированная выборка объектов включала залежи с лесными насаждениями возрастом от 8 до 17 лет. Для более молодых залежей репрезентативную выборку сформировать не удалось.

Для группы залежей, на которые удалось подобрать наиболее полный набор разновременных изображений из сервиса Google Планета Земля, охватывающий детальные снимки (пространственное разрешение 1 м/пиксель) периода 2000–2017 гг., была осуществлена оценка проективного покрытия древесной растительностью. Проективное покрытие (сомкнутость) определялось как доля покрытия кронами деревьев поверхности залежи в разные годы. На основе этих данных выполнили количественный анализ зависимости вегетационного индекса NDVI от величины проективного покрытия крон.

Второй этап исследования состоял в подготовке векторного слоя анализируемых объектов. Его формирование осуществили в программе ArcGIS методом оцифровки каждой залежи по мозаикам снимков высокого пространственного разрешения (2 м/пиксель), взятых с ресурса ArcGIS World Imagery в летний период 2017 г., и по снимкам Sentinel-2, полученным в 2017 г. Создание векторной основы анализируемых угодий позволило рассчитать основные статистические параметры всех исследуемых объектов.

Суммарная площадь проанализированных залежей составила 5208,2 га при средней площади 41,0 га. Максимальный размер — 234 га, минимальный — 15,1 га при стандартном отклонении 31,8 га. Доминировали залежи с площадью от 20 до 60 га (рис. 2).

Третий этап экспериментального исследования состоял в анализе спектрально-отражательных характеристик изучаемых залежей. Для каждого объекта рассчитывали следующие спектральные показатели:

- коэффициенты отражения в ближней (NIR-диапазон, 0,75–0,90 мкм) и средней инфракрасной области (SWIR-диапазон, 1,55–1,75 мкм) на начальную и конечную анализируемые даты, т. е. на 2000 и 2017 гг.;
- многолетний ряд июньских и августовских значений вегетационного индекса NDVI в период 2000–2017 гг.

Коэффициенты отражения (коэффициенты спектральной яркости, КСЯ) в каналах NIR и SWIR на 2000 и 2017 гг. рассчитали на основе снимков Landsat ETM+ от 25 июня 2000 г. и Landsat OLI от 16 июня 2017 г. Снимки были подобраны на один и тот же месяц, чтобы минимизировать влияние фенологических отличий.

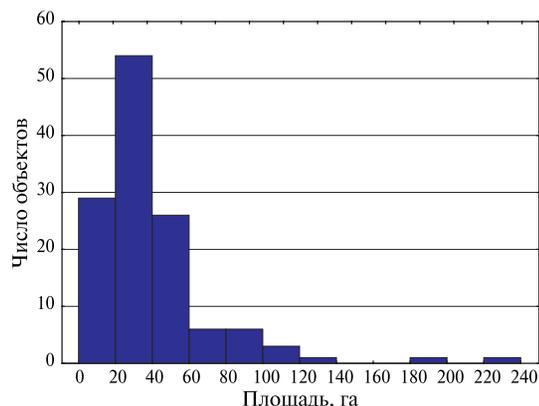


Рис. 2. Гистограмма площадей анализируемых объектов

Используемые изображения прошли радиометрическую калибровку (Chander et al., 2009), в результате которой они были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости, что являлось необходимым условием количественного сравнения разновременных отражательных характеристик. Спектральные диапазоны сенсоров Landsat ETM+ и OLI немного различаются между собой по охвату длин волн. В то же время, как показали исследования (Li et al., 2014), рассчитанные по ним спектральные параметры характеризуются очень тесной корреляцией, в связи с чем данные с них можно сопоставлять на количественном уровне. Ближний

и средний инфракрасный каналы Landsat были отобраны для анализа, поскольку они являются наиболее информативными для изучения динамических процессов в растительном покрове, включая анализ сукцессий (Белова, Ершов, 2015; Жирин и др., 2016).

Ряды многолетних значений вегетационного индекса NDVI были вычислены и проанализированы в связи с тем, что для объективного анализа изменений в состоянии растительного покрова залежей необходима ежегодная оценка спектральных характеристик, измеренных в один и тот же сезон. Такие непрерывные данные за период 2000–2017 гг. можно получить только на основе информационных продуктов MOD13Q1 с пространственным разрешением 250 м/пиксель. MOD13Q1 являются 16-дневными композитными изображениями вегетационных индексов, которые сформированы на основе ежедневно получаемых снимков MODIS (Didan, 2015). По детальности они уступают снимкам Landsat, но их преимущество заключается в высокой периодичности. В настоящее время они являются единственным типом спутниковой информации, позволяющей анализировать многолетние ряды спектральных характеристик за соответствующий промежуток времени.

Вегетационный индекс NDVI рассчитывается на основе коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной зоне. Он может быть использован для выявления изменений в зелёной фитомассе (Wall et al., 2008; Yue et al., 2013). Увеличение площади древесной растительности на залежи и рост её растительной массы должны выступать основными факторами, определяющими в конкретный год значения вегетационного индекса. Учитывая ограничения пространственного разрешения данных MOD13Q1, для анализа использовались только залежи площадью не менее 15–20 га. При подборе объектов производили оценку наложения векторного слоя на спутниковые данные.

Из сформированной выборки, в которой присутствовали объекты разных возрастов, для анализа многолетней динамики вегетационного индекса нами была отобрана самая многочисленная группа залежей, зарастающих лесом на протяжении 13 лет. Для них были рассчитаны и проанализированы многолетние ряды июньских и августовских значений вегетационного индекса.

Ранее установлено, что августовские значения индекса (Терехин, 2017) могут быть использованы для количественной оценки лесовозобновления. Обусловлено это тем, что в данное время года травяной покров, присутствующий на залежах, начинает подсыхать и ключевой вклад в значения вегетационного индекса вносит находящаяся на них древесная растительность. Если на бывшей пашне наблюдается продолжающийся процесс лесовозобновления, то площадь древесной растительности постепенно растёт из года в год, и интенсивность этого процесса может быть изучена на основе ряда многолетних значений NDVI, оценённых в данный период года. С другой стороны, в связи с тем, что состояние травянистого покрова может зависеть от особенностей увлажнения на протяжении вегетационного периода, нами были проанализированы также июньские значения индекса, чтобы проследить его многолетнюю динамику на основе величин, полученных в разные месяцы. Объективно существующая динамика индекса должна наблюдаться как на его июньских, так и на августовских значениях.

Все спектральные показатели рассчитывали для конкретных угодий методом зональной статистики, т. е. способом усреднения характеристик отражения в пределах контуров бывшей пашни. Для каждого объекта рассчитали ряд NDVI в период 2000–2017 гг., включающий его ежегодные значения середины июня (10–26 июня) и второй половины августа (13–29 августа). Вследствие отсутствия безоблачных композитных изображений на некоторые даты из анализа были исключены июньские значения 2001 г. и августовские значения 2003, 2008 и 2012 гг.

На следующем этапе был выполнен статистический анализ полученных данных. Он включал оценку коэффициентов отражения NIR- и SWIR-диапазонов 2000 и 2017 гг., рассчитанных по данным Landsat для исследуемых объектов, а также сравнение между собой величин КСЯ для разновозрастных залежей (от 8 до 17 лет). После этого были проанализированы основные особенности многолетней динамики сезонных значений вегетационного индекса и влияние динамики проективного покрытия древесной растительностью на отражательные признаки залежных земель.

## Результаты и их обсуждение

Анализ разновременных спутниковых данных, полученных в период 2000–2017 гг., позволил установить, что процессы лесовозобновления наблюдаются на подавляющем большинстве выведенных из сельскохозяйственного оборота пахотных земель.

Статистическая оценка коэффициентов отражения в ближней и средней инфракрасной областях, проведённая на основе анализа критерия Вилкоксона, показала, что для анализируемых объектов за 18 лет произошло статистически значимое снижение коэффициентов спектральной яркости в SWIR-зоне и статистически значимое увеличение КСЯ в NIR-области. Значимое снижение с 0,22 до 0,16 отражательной способности в SWIR-диапазоне и её рост в NIR-диапазоне является следствием увеличения лесистости, сопровождающегося формированием сомкнутых лесных сообществ (Терехин, Чендев, 2018). Таким образом, следствием формирования лесных сообществ на залежах стало значимое изменение зональных коэффициентов отражения.

Оценка коэффициентов спектральной яркости 2017 г., проведённая для залежей, на которых возраст формирующихся лесных сообществ составлял от 8 до 17 лет, показала, что наблюдается достаточно чётко выраженная тенденция снижения величины КСЯ в SWIR-области по мере увеличения возраста залежи (рис. 3). То есть залежи с более молодыми лесными насаждениями характеризуются более высокими SWIR-коэффициентами отражения, чем залежи с лесными сообществами большего возраста. Для NIR-коэффициентов отражения разновозрастных залежей (от 8 до 17 лет) таких выраженных тенденций не обнаружено. Обусловлено это может быть тем, что отражение в ближнем инфракрасном диапазоне растёт пропорционально увеличению основной растительной ткани (мезофилла), а для разновозрастных лесных сообществ в анализируемой выборке эти различия незначительны.

Из графика на рис. 3 видно, что снижение SWIR-коэффициентов отражения происходит по зависимости, форма которой близка к экспоненциальной кривой. Коэффициенты отражения SWIR-диапазона 8-летних залежей статистически значимо отличаются от аналогичных характеристик всех более возрастных залежей. В то время как коэффициенты отражения SWIR-диапазона залежей других возрастов различаются между собой менее выражено.

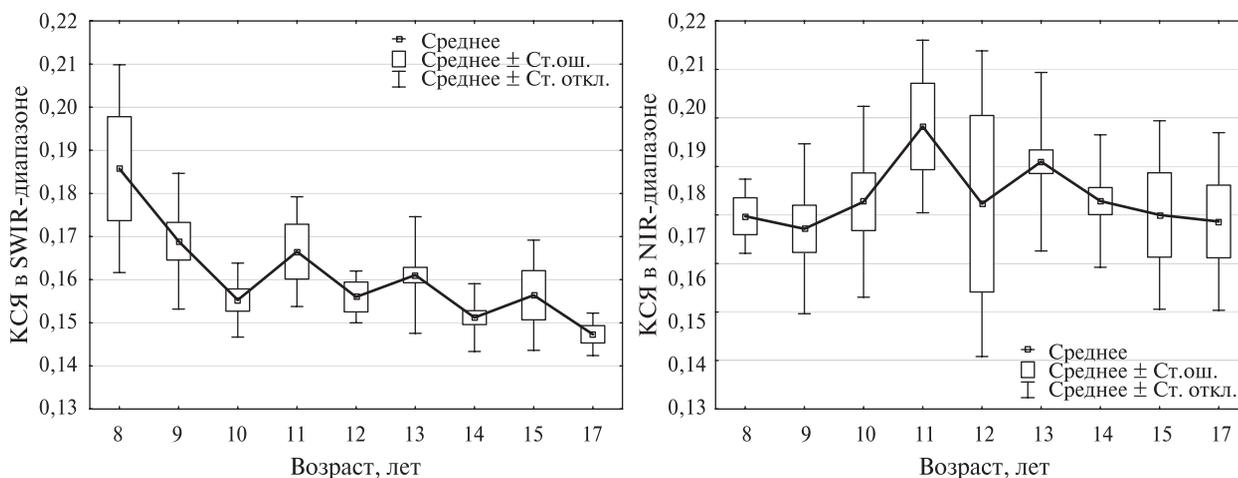


Рис. 3. Значения коэффициентов спектральной яркости SWIR- и NIR-диапазонов для залежей, отличающихся по возрасту лесных экосистем, формирующихся на них

Другим признаком формирующихся сомкнутых сообществ является снижение величины стандартного отклонения для SWIR-коэффициентов отражения по мере увеличения возраста залежи (табл. 2).

Если для залежей с лесными сообществами, имеющими возраст 8 лет, величина стандартного отклонения составила 0,024, то для залежей с 17-летними лесными насаждениями оно

равнялось 0,005. Снижение стандартного отклонения для КСЯ является следствием повышения однородности растительного покрова залежей, заключающегося в том, что к 17-му году после начала процесса лесовозобновления основную часть залежи занимает лесное насаждение, а доля не покрытых лесом участков минимальна.

Таблица 2. Характеристики отражательной способности SWIR-диапазона для залежей с разным возрастом формирующихся на них лесных насаждений

| Возраст, лет | Среднее | Стандартное отклонение |
|--------------|---------|------------------------|
| 8            | 0,186   | 0,024                  |
| 9            | 0,169   | 0,016                  |
| 10           | 0,155   | 0,009                  |
| 11           | 0,167   | 0,013                  |
| 12           | 0,156   | 0,006                  |
| 13           | 0,161   | 0,014                  |
| 14           | 0,151   | 0,008                  |
| 15           | 0,156   | 0,013                  |
| 17           | 0,147   | 0,005                  |

Анализ многолетней динамики июньских и августовских значений вегетационного индекса, проведённый для самой многочисленной группы залежей (возраст лесных насаждений равен 13 годам по состоянию на 2017 г.), позволил выявить тенденцию к их увеличению на протяжении анализируемого периода (рис. 4).

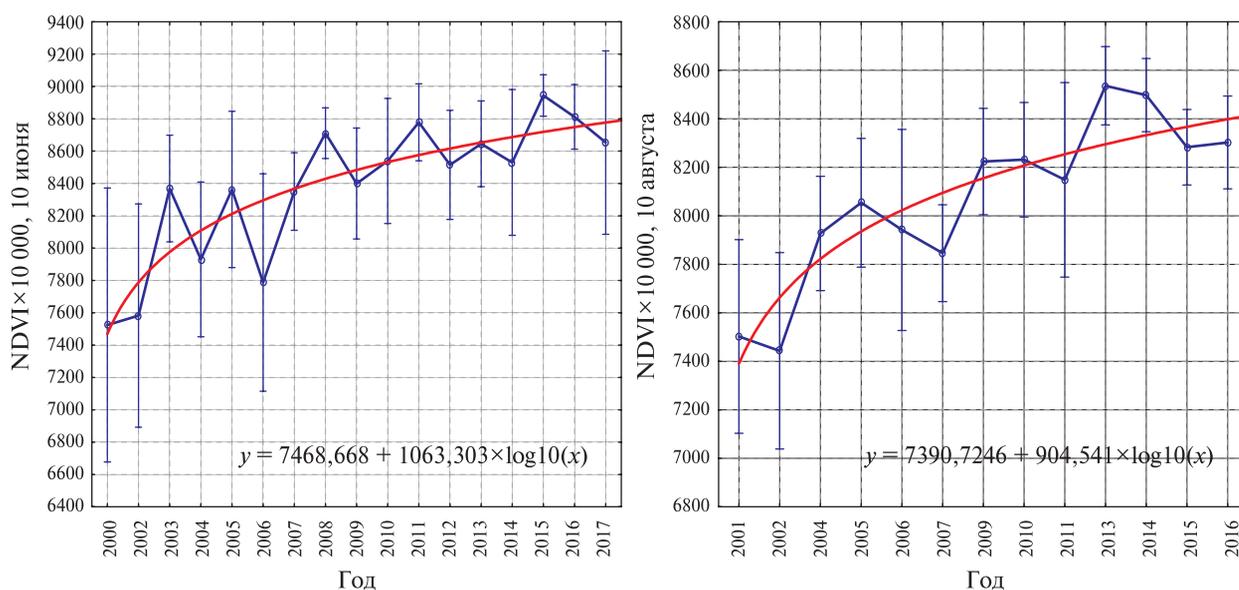


Рис. 4. Многолетняя динамика июньских и августовских значений NDVI (средние и стандартные отклонения) для залежей с лесными насаждениями возрастом 13 лет по состоянию на 2017 г.

Таким образом, рост межгодовых значений вегетационного индекса залежей можно считать региональной закономерностью. На графиках на рис. 4 видно, что динамика июньских и августовских значений имеет близкую форму и может быть аппроксимирована логарифмической или степенной зависимостью (табл. 3, 4).

Логарифмическая зависимость отражает основные моменты изменения вегетационного индекса, прежде всего касающиеся его наибольшего роста в первые годы с начала распространения древесной растительности на залежи и постепенного снижения увеличения его интенсивности в последующие годы.

Таблица 3. Характеристики регрессионных зависимостей, описывающих изменение NDVI июньских значений по мере распространения древесной растительности на залежах

| Вид зависимости      | Уравнение                       | Коэффициент детерминации $R^2$ |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Линейная             | $y = 68,08x + 7701$             | 0,677                          |
| Логарифмическая      | $y = 481,9\ln(x) + 7366$        | 0,724                          |
| Степенная            | $y = 7392, x^{0,059}$           | 0,728                          |
| Полином 2-го порядка | $y = -4,495x^2 + 155,9x + 7384$ | 0,742                          |

Примечание:  $x$  — индекс NDVI, умноженный на 10 000; уровень значимости — 0,05.

Таблица 4. Характеристики регрессионных зависимостей, описывающих изменение NDVI августовских значений по мере распространения древесной растительности на залежах

| Вид зависимости      | Уравнение                       | Коэффициент детерминации $R^2$ |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Линейная             | $y = 59,88x + 7491$             | 0,784                          |
| Логарифмическая      | $y = 466,6\ln(x) + 7090$        | 0,845                          |
| Степенная            | $y = 7128, x^{0,058}$           | 0,850                          |
| Полином 2-го порядка | $y = -4,357x^2 + 143,6x + 7188$ | 0,854                          |

Примечание:  $x$  — индекс NDVI, умноженный на 10 000; уровень значимости — 0,05.

За этот же период времени установлено снижение стандартных отклонений как для июньских, так и для августовских значений NDVI.

Рост значений вегетационного индекса, наблюдающийся особенно в первые годы после начала процесса лесовозобновления, обусловлен рядом причин. Во-первых, вследствие прекращения распашки исчезают невысокие значения NDVI, формирующиеся оголёнными почвами. Во-вторых, рост индекса обусловлен увеличением зелёной фитомассы угодья из-за формирования древесного подроста. В это время лесовозобновление может наблюдаться более интенсивно благодаря присутствию в почвах бывших аграрных угодий ранее внесённых удобрений.

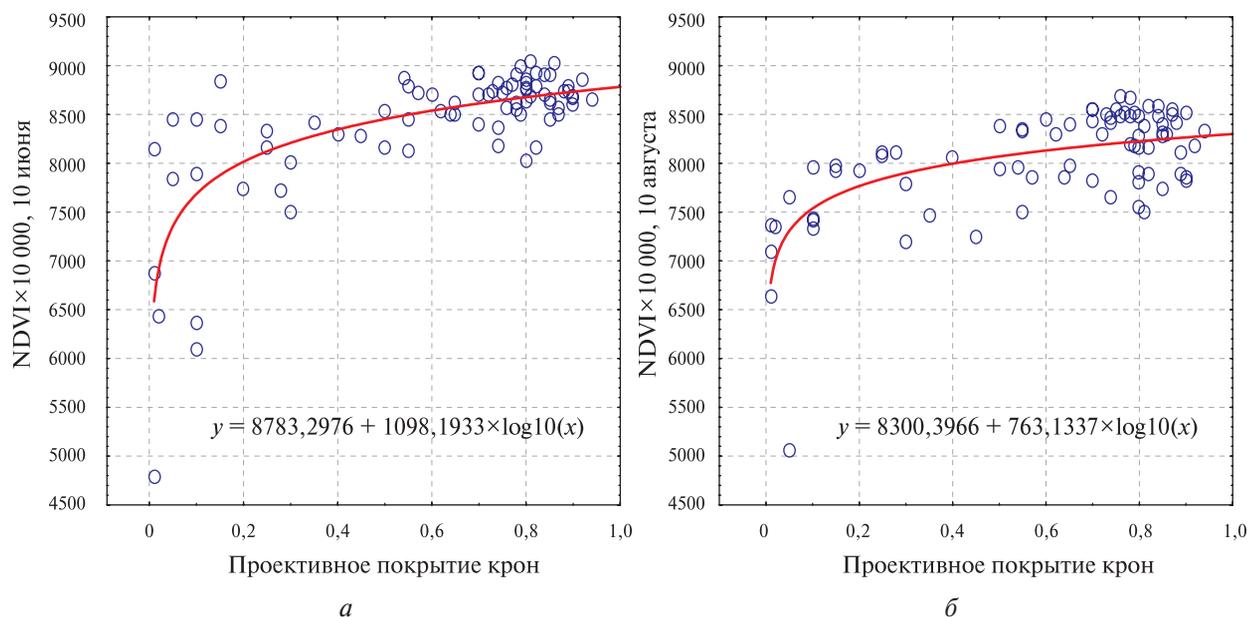


Рис. 5. Зависимость между проективным покрытием крон древесной растительности, распространяющейся на залежах, и значениями вегетационного индекса июня (а) и августа (б)

Количественный анализ проективного покрытия залежей древесной растительностью и величин вегетационного индекса показал, что связь между этими параметрами также может быть описана логарифмической зависимостью (рис. 5, см. с. 168).

Логарифмическая зависимость описывает связь между проективным покрытием и NDVI июня с коэффициентом детерминации 0,55. Для значений NDVI августа данная зависимость характеризуется коэффициентом детерминации 0,43 (при уровне значимости 0,05). Наиболее интенсивно рост значений вегетационного индекса наблюдается в период до достижения проективным покрытием крон величины 0,3–0,4.

Таким образом, формирование сомкнутых лесных сообществ мелколиственного породного состава на залежных землях, типичных для подтайги Западной Сибири, характеризуется увеличением значений вегетационного индекса NDVI по логарифмической кривой. Наиболее интенсивно оно наблюдается в первые годы после начала процесса лесовозобновления. На фоне этого отмечается снижение стандартного отклонения NDVI, что является следствием повышения однородности растительного покрова залежей.

С другой стороны, распространение древесной растительности на залежах ведёт к существенному снижению коэффициентов спектральной яркости среднего инфракрасного диапазона с одновременным уменьшением величины их стандартного отклонения.

Одной из причин, способствующих процессам лесовозобновления на залежных землях, могли выступать благоприятные климатические условия на юге тайги и в подтаёжной зоне в начале XXI в. Согласно проведённым исследованиям (Филандышева, Ромашова, 2018), в подтайге Западно-Сибирской равнины зафиксировано увеличение летнего сезона и уменьшение почти на две недели зимнего периода. С начала 1940-х гг. как на станции «Томск», так и на станции «Тюмень» наблюдается положительная тенденция среднегодовых температур с одинаковыми коэффициентами линейных трендов (Ромашова и др., 2017), в связи с чем такое изменение можно считать региональной особенностью. Обозначенные факторы должны привести к увеличению периода биологической активности в регионе, что может, в свою очередь, обеспечить условия для процессов лесовозобновления.

## Выводы

В результате исследования установлено, что в период 2000–2017 гг. на залежах, типичных для зоны подтайги Западной Сибири, наблюдаются процессы лесовозобновления, которые характеризуются достаточно высокими темпами. Они определяются увеличением межгодовых июньских и августовских значений вегетационного индекса NDVI по логарифмической кривой. Наибольший рост значений вегетационного индекса отмечен в первые годы после начала процесса лесовозобновления. Рост лесных насаждений на залежах сопровождается снижением SWIR-коэффициентов отражения. Снижение инфракрасных коэффициентов спектральной яркости по мере увеличения возраста лесных насаждений установлено на основе анализа залежей с лесными сообществами возрастом 8–17 лет. Формирование сомкнутых лесных насаждений и повышение проективного покрытия залежей древесными сообществами сопровождается снижением стандартного отклонения инфракрасных коэффициентов отражения и сезонных значений вегетационного индекса, что является следствием повышения однородности растительного покрова.

Исследование выполнено в рамках внутривузовского гранта Белгородского государственного национального исследовательского университета для поддержки создания и развития научных структурных подразделений — центров превосходства.

## Литература

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 64 с.

2. Белова Е. И., Ершов Д. В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
3. Евсеева Н. С. География Томской области (Природные условия и ресурсы). Томск: Изд-во Томского ун-та, 2001. 223 с.
4. Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.
5. 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.
6. Каличкин В. К. Природно-ресурсный потенциал растениеводства Томской области // Сборник материалов и докладов Первого Агрономического собрания Томской области / Департамент по социально-экономическому развитию села Томской области. Томск, 2016. С. 12–28.
7. Королева Н. В., Тихонова Е. В., Ершов Д. В., Салтыков А. Н., Гаврилюк Е. А., Пугачевский А. В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96.
8. Лойко С. В., Герасько Л. И., Куликова О. Р. Сукцессии растительности на дерново-подзолистых почвах подтайги Томь-Яйского междуречья // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2010. № 4(12). С. 32–43.
9. Новикова Л. А. Восстановление растительности на залежах «Кунчеровской лесостепи» // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2009. № 6(112). С. 281–285.
10. Парахневич Т. М., Кирик А. И. Структура и динамика растительного покрова на разновозрастных залежах // Вестн. аграрной науки. 2017. № 4(67). С. 43–50.
11. Ромашова Т. В., Филандышева Л. Б., Юркова К. Д. Анализ динамики временных характеристик сезонов года в подтайге Западно-Сибирской равнины за период с 1936 по 2015 г. // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 16–25.
12. Терехин Э. А. Сукцессии на залежных землях юго-запада Среднерусской возвышенности и их изучение с применением спутниковых данных // Геогр. вестн. 2017. № 2(41). С. 118–126.
13. Терехин Э. А., Чендев Ю. Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 114–126.
14. Филандышева Л. Б., Ромашова Т. В. Тенденции изменения сезонных ритмов климата и условий функционирования ландшафтов в подтайге Западно-Сибирской равнины // Ландшафтная география в XXI веке: материалы Международ. науч. конф. Симферополь, 2018. С. 189–192.
15. Черноусова С. О. Состояние и использование земель // Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году» / глав. ред. С. Я. Трапезников. Томск: Дельтаплан, 2016. С. 49–55.
16. Chander G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. No. 5. P. 893–903.
17. 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/MOD13Q1.00.
18. Estel S., Kuemmerle T., Levers C., Hostert P., Alcántara C., Prishchepov A. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 163. P. 312–325.
19. Li P., Jiang L., Feng Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 1.
20. Wall L., Larocque D., Leger P. M. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29(8). P. 2211–2225.
21. 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.
22. Yue Y. M., Wang K. L., Liu B., Li R., Zhang B., Chen H. S., Zhang M. Y. Development of new remote sensing methods for mapping green vegetation and exposed bedrock fractions within heterogeneous landscapes // Intern. J. Remote Sensing. 2013. V. 34. No. 14. P. 5136–5153.

## Reforestation on abandoned arable lands in the south of Western Siberia and its analysis using remote sensing data

E. A. Terekhin<sup>1</sup>, T. S. Posternak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia*  
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

<sup>2</sup> *Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia*  
E-mail: posternakts@gmail.com

The article presents the results of reforestation analysis on abandoned arable lands in the south of Western Siberia using remote sensing data. Using data from 152 objects located on the territory of the Tomsk and Kemerovo regions, the quantitative assessment of the relationship between forest of small-leaved deciduous species age and reflectance was carried out for abandoned arable lands. Reflective parameters were studied for abandoned lands with forest stand aged from 8 to 17 years. Increasing the age of forest stands causes a decrease in SWIR range reflectance. The long term dynamics of the NDVI vegetation index has been studied for abandoned lands overgrown with forest vegetation. The increasing of the interannual NDVI values of June and August is characterized by a logarithmic dependence. The largest increase is observed in the first 5 years after the beginning of the reforestation process. The relationship between the crown closure and the June vegetation index values can also be described by the Logarithmic dependence. The increase in the density of forest stands formed on the abandoned lands is accompanied by a decrease in SWIR range reflectance standard deviations.

**Keywords:** abandoned arable land, forest, reforestation, satellite data, Landsat, MODIS, long-term dynamics, Western Siberia, vegetation index

Accepted: 29.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-161-172

### 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: FGNU, Rosinformagrotekh, 2008, 64 p.
2. Belova E. I., Ershov D. V., Opyt otsenki estestvennogo lesvosstanovleniya na sploshnykh vyrubkakh po vremennym ryadam Landsat (Assessing reforestation on clear cuts based on Landsat time series), *Lesovedenie*, 2015, No. 5, pp. 339–345.
3. Evseeva N. S., *Geografiya Tomskoi oblasti. Prirodnye usloviya i resursy* (Geography of the Tomsk region. Natural conditions and resources), Tomsk: Izd. Tomskogo universiteta, 2001, 223 p.
4. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Edlina S. P., Mnogoletnyaya dinamika vegetatsionnykh indeksov temno-khvoinykh lesov posle povrezhdeniya sibirskim shelkopryadom (Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth injury), *Lesovedenie*, 2016, No. 1, pp. 3–14.
5. Zhukova E. Yu., Andrianova E. A., Kharakteristika rastitel'nosti zaleznykh zemel' okrestnostei Chernogorska respubliki Khakasiya (Vegetation Characteristics of the City of Chernogorsk Environs Fallow Lands in the Republic of Khakasia), *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. F. Katanova*, 2013, No. 3, pp. 9–13.
6. Kalichkin V. K., Prirodno-resursnyi potentsial rastenievodstva Tomskoi oblasti (Natural and resource potential of plant growing in the Tomsk region), *Sbornik materialov i dokladov Pervogo Agronomicheskogo sobraniya Tomskoi oblasti*, Tomsk Regional Socio-Economic Development Dept., Tomsk, 2016, pp. 12–28.
7. Koroleva N. V., Tikhonova E. V., Ershov D. V., Saltykov A. N., Gavriluk E. A., Pugachevskii A. V., Otsenka masshtabov zarastaniya nelesnykh zemel' v natsional'nom parke "Smolenskoe Poozer'e" za 25 let po sputnikovym dannym Landsat (Assessment of the extent of non-forest lands overgrowth in the national park Smolensk Lake District for 25 years according to the satellite data Landsat), *Lesovedenie*, 2018, No. 2, pp. 83–96.
8. Loyko S. V., Gerasko L. L., Kulikova O. R., Suktsessii rastitel'nosti na dernovo-podzolistykh pochvakh podtaigi Tom'-Yaiskogo mezhdurech'ya (Successions vegetation on sod-podzol soils of a subtaiga of the Tom-Yaysky interfluv), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Biologiya*, 2010, No. 4(12), pp. 32–43.

9. Novikova L. A., Vosstanovlenie rastitel'nosti na zalezkhakh "Kuncherovskoi lesostepi" (Restoration of vegetation on abandoned lands in the "Kuncherovskaya forest-steppe"), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvenno-go universiteta*, 2009, No. 6(112), pp. 281–285.
10. Parakhnevich T. M., Kirik A. I., Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova na raznovostrastnykh zalezkhakh (The structure and dynamics of vegetation on the different age abandoned fields), *Vestnik agrarnoi nauki*, 2017, No. 4(67), pp. 43–50.
11. Romashova T. V., Filandysheva L. B., Yurkova K. D., Analiz dinamiki vremennykh kharakteristik sezonov goda v podtaige Zapadno-Sibirskoi ravniny za period s 1936 po 2015 g. (Analysis of the dynamics of time characteristics of the seasons of the year in the sub-boreal forest (sub-taiga) of the West Siberian plain in the period from 1936 to 2015), *Geosfernye issledovaniya*, 2017, No. 3, pp. 16–25.
12. Terekhin E. A., Suktsessii na zaleznykh zemlyakh yugo-zapada Srednerusskoi vozvyshennosti i ikh izucheniye s primeneniem sputnikovykh dannyykh (Successions on abandoned agricultural lands in the south-west of the Central Russia Upland and their investigation using remote sensing data), *Geograficheskii vestnik*, 2017, No. 2(41), pp. 118–126.
13. Terekhin E. A., Chendev Yu. G., Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyi period na yuge Srednerusskoi vozvyshennosti s ispol'zovaniem materialov raznoremennykh kosmicheskikh s"emok (Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 114–126.
14. Filandysheva L. B., Romashova T. V., Tendentsii izmeneniya sezonnykh ritmov klimata i uslovii funktsionirovaniya landshaftov v podtaige Zapadno-Sibirskoi ravniny (Trends of changing seasonal rhythms of climate and conditions of the functioning of landscapes in the sub-boreal forest (sub-taiga) of the west Siberian plain), *Landshafinaya geografiya v XXI veke* (Landscape Geography in the 21<sup>st</sup> Century), Proc. Intern. Scientific Conf., Sevastopol, 2018, pp. 189–192.
15. Chernousova S. O., Sostoyaniye i ispol'zovaniye zemel' (State and use of lands), In: *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy Tomskoi oblasti v 2015 godu"* (State report "On the state and protection of the environment of the Tomsk region in 2015"), S. Ya. Trapeznikov (ed.), Tomsk: Del'taplan, 2016, pp. 49–55.
16. Chander G., Markham B. L., Helder D. L., Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 5, pp. 893–903.
17. 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.
18. Estel S., Kuemmerle T., Levers C., Hostert P., Alcántara C., Prishchepov A., Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 312–325.
19. Li P., Jiang L., Feng Z., Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 1.
20. Wall L., Larocque D., Leger P. M., The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29(8), pp. 2211–2225.
21. 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.
22. Yue Y. M., Wang K. L., Liu B., Li R., Zhang B., Chen H. S., Zhang M. Y., Development of new remote sensing methods for mapping green vegetation and exposed bedrock fractions within heterogeneous landscapes, *Intern. J. Remote Sensing*, 2013, Vol. 34, No. 14, pp. 5136–5153.