



УДК 528.88

**ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЗАЛЕЖНЫХ
ЗЕМЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**
**ESTIMATION OF SPECTRAL REFLECTANCE PROPERTIES OF ABANDONED
AGRICULTURAL LAND USING REMOTE SENSING DATA**

Э.А. Терехин
E.A. Terekhin

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85*

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Аннотация. Формирование на залежных землях новых растительных ассоциаций приводит к изменению их спектрально-отражательных свойств. Оценка их сезонного развития может быть проведена на основе регулярно получаемых многозональных спутниковых данных. Цель исследования состояла в анализе многолетней динамики спектрально-отражательных признаков залежей, обусловленных особенностями их растительного покрова. На основе использования спутниковых данных различного пространственного разрешения проведено исследование отражательных особенностей залежных земель на примере Белгородской области. Исследована динамика вегетационного индекса NDVI для разновозрастных залежей. Установлены особенности его изменения, связанные с переводом посевных площадей в состояние залежи и выводом из него. Межгодовые изменения в растительном покрове залежей отражаются в сезонной динамике спектральных характеристик. С увеличением возраста залежи происходит постепенное снижение максимальных внутригодовых значений вегетационного индекса и величины его стандартного отклонения.

Résumé. Overgrowing of abandoned agricultural lands leads to changes in their spectral-reflectance properties. Their investigation can be carried out using regularly obtained multispectral remote sensing data. This paper explores seasonal and long-term dynamics of spectral reflectance properties of abandoned agricultural lands due to change of vegetation communities. Research reflective characteristic of abandoned agricultural lands was carried out using satellite data of different spatial resolution on the example of the Belgorod region. Dynamics of NDVI vegetation indices for abandoned agricultural lands of different ages was studied. Features of vegetation index dynamics associated with the plowing of the fallow were established. Interannual changes in the vegetation cover of fallows cause changes in the seasonal dynamics of the spectral characteristics. With increasing of age of fallows maximal interannual vegetation index values decrease.

Ключевые слова: залежи, дистанционное зондирование, вегетационные индексы, NDVI, юго-запад Среднерусской возвышенности.

Key words: fallow, remote sensing, vegetation index, NDVI, Southwest Central Russian Upland.

Введение

К залежным землям относятся бывшие пахотные угодья, на которых после прекращения сельскохозяйственного использования происходит формирование нового типа растительности. Исследование закономерностей развития растительного покрова залежей актуально в связи с тем, что в агроландшафтах они выполняют ряд функций, связанных с восстановлением почвенного покрова [Голеусов, Лисецкий, 2009]. В связи с этим оценка зарастания залежных земель является актуальной для многих регионов России [Жукова, Андрианова, 2013; Никонов, Смирнов, 2014; Низкий, 2014].

Многозональные спутниковые данные, получаемые регулярно с небольшим временным интервалом, позволяют проводить исследование динамики спектрально-отражательных свойств растительного покрова на протяжении вегетационного сезона. Одним из спектральных показателей, достаточно эффективно позволяющих



анализировать растительность с точки зрения проективного покрытия и фитомассы, является вегетационный индекс NDVI [Boschetti et al., 2009]. Он основан на коэффициентах отражения в красной и ближней инфракрасной спектральных областях. В связи с тем, что спектрально-отражательные свойства растительности связаны с особенностями ее развития, изучение динамики вегетационных индексов представляет интерес для анализа формирования растительного покрова [Терехин, 2015], в том числе, на залежных землях.

Процесс зарастания залежей включает несколько стадий. На первой из них преобладают сорные травы с крупным стержнем. На следующих этапах начинают доминировать злаки и разнотравье, в отдельных случаях – древесно-кустарниковая растительность. На территории Белгородской области, охватывающей юго-запад Среднерусской возвышенности, на залежах происходит формирование растительных сообществ, преимущественно типичных для зоны лесостепи и степи.

Развитие нового фитоценоза сопровождается сезонной и многолетней динамикой спектрально-отражательных свойств, которая к настоящему времени остается до конца неизученной. В то же время, исследование динамики яркостных признаков залежных земель, особенно в красной и ближней инфракрасной области спектра, позволит глубже понять особенности развития растительного покрова и его восстановления на месте бывших аграрных угодий. В этом плане оперативно-получаемые спутниковые снимки, в первую очередь, MODIS, предоставляют уникальную возможность для анализа изменений в состоянии растительности залежей. Обусловлено это тем, что они позволяют проводить оценку спектрально-отражательных свойств конкретных полей значительное количество временных срезов в год.

Многозональные спутниковые данные позволяют исследовать растительный покров залежных земель и проводить их картографирование, что было показано в ряде исследований [Терехов и др., 2010; Prishchepov et al., 2012]. В то же время, анализ закономерностей развития их растительности требует применения снимков высокой периодичности для изучения динамики спектрально-отражательных свойств на протяжении одного или нескольких вегетационных сезонов. Появление с начала 2000-х годов информационных продуктов на базе ежедневных снимков MODIS, например, MOD13Q1, открыло возможность мониторинга сезонной динамики спектрально-отражательных свойств на уровне отдельных обрабатываемых полей, в том числе ее анализ для заброшенных аграрных угодий. При этом актуальность представляет разработка методик, позволяющих на основе спутниковых данных не только выявлять залежи, но и исследовать стадии их развития.

Цель статьи заключалась в изучении особенностей вегетационного индекса NDVI для бывших аграрных угодий, различное время находящихся в состоянии залежи, и особенностей спектрального отклика распаханых залежей на примере территории Белгородской области.

Материалы, объекты и методы исследования

Исследование включало несколько этапов. Первый из них состоял в формировании выборки залежей, расположенных на территории исследования, определении сроков, характеризующихся отсутствием аграрного использования. Второй этап включал анализ спектрально-отражательных свойств залежных земель на основе спутниковых данных высокого временного разрешения. Заключительный этап заключался в статистическом анализе полученных данных и формулировки выводов.

На основе анализа разновременных космических снимков и данных полевых обследований (период 2010–2016 гг.) нами на территории Белгородской области было выявлено свыше 150 залежей, находившихся в этом состоянии определенное количество лет. Однако далеко не для всех из них удалось достоверно установить время, в которое они перестали быть пашней, или годы, в которые некоторые из них были распаханы. А подобная информация была необходима для объективной оценки спектрально-отражательных свойств, и их связи с особенностями почвенно-

растительного покрова. Получение достоверной информации о точных сроках пребывания конкретных угодий в залежном состоянии являлось достаточно сложной задачей и требовало совместного анализа разновременной спутниковой съемки (за период в более 15 лет) и материалов полевых наблюдений.

Выявление залежных земель на территории региона было проведено путем полевых обследований аграрных угодий в различных районах области, а также с применением детального анализа космических снимков высокого пространственного разрешения, в первую очередь, Landsat TM, ETM+, OLI. Для выявления года, в который исследуемое поле пахалось или нет, были в частности использованы возможности анализа разновременных снимков, реализованные в сервисе Google Планета Земля.

Исследование спектрально-отражательных свойств залежей и их дешифровочных признаков по сравнению с изучением возделываемых посевных площадей осложняется тем, что вследствие относительной немногочисленности и спорадической распространенности в регионе репрезентативную выборку для их анализа подобрать достаточно сложно. Кроме того, залежные земли характеризуются рядом особенностей, определяющих специфику их исследования по спутниковым данным.

1. Разный возраст залежей, который будет отражаться в различных типах растительного покрова или стадиях его развития. Различное время нахождения в состоянии залежи повышает требования к верификации состояния анализируемых полей и подборки снимков для их оценки. Конкретное поле может находиться в состоянии залежи один-два года, или же более длительный промежуток времени.

2. Во многих случаях относительно небольшой размер залежных полей (меньше 15–20 га), что осложняет применение многих типов спутниковых данных для их анализа, вследствие ограничений пространственного разрешения.

3. Появление на залежах древесной растительности, вследствие сукцессий, существенно меняет их спектрально-отражательные свойства, а кроме того, в итоге приводит к формированию принципиально нового растительного сообщества.

Этап анализа спектрально-отражательных свойств залежных земель состоял в расчете для каждого исследуемого объекта многолетнего ряда (2000–2015 гг.) вегетационного индекса NDVI на основе информационных продуктов MOD13Q1. На текущий момент эти данные являются единственным источником информации, позволяющим изучать за последние 15 лет временные ряды спектральных характеристик для конкретных аграрных угодий. Изображения MOD13Q1 создаются на основе радиометрически откорректированных, ежедневно получаемых снимков MODIS [Justice et al., 2002], и содержат композитные изображения вегетационных индексов за интервал в 16 дней. Такая периодичность позволила оценить спектральные особенности залежей за вегетационные периоды конкретных лет. Особенно это было важно для выявления изменений в динамике NDVI, обусловленных переводом пашни в залежь, увеличением сроков пребывания в залежном состоянии, либо связанных с распашкой залежных земель. Многолетние вегетационного индекса были рассчитаны для каждого выявленного объекта методом зональной статистики в геоинформационной среде ArcGIS, в которой были осуществлены и многие другие процедуры обработки.

После расчета рядов NDVI на тестовых объектах были изучены:

- динамика NDVI после того, как посевная площадь была переведена в состояние залежи;
- сезонная динамика вегетационного индекса, обусловленная повышением возраста залежи;
- динамика NDVI вследствие распашки залежи.

Статистический анализ полученной информации, проведенный в пакете STATISTICA 10, позволил количественно оценить изменение спектрально-отражательных свойств.



Результаты и их обсуждение

Для изучения сезонной динамики вегетационного индекса нами из общей выборки проанализированных объектов был отобран ряд полей, для которых достоверно были известны годы пребывания в состоянии залежи, сроки, в которые они были распаханы, а также растительность, произрастающая на них после распахивания. Для них был проведен количественный и графический анализ вегетационного индекса за разные годы.

Смена пашни залежей.

Перевод пашни в залежь сопровождается динамикой спектрально-отражательных свойств (на примере вегетационного индекса NDVI), которая проявляется, в первую очередь, в снижении максимальных годовых значений вегетационного индекса и снижении величины стандартного отклонения (табл. 1, рис. 1). Снижение максимальных годовых значений обусловлено тем, что естественная растительность, типичная для залежи, в максимум вегетационной активности характеризуется меньшими объемами зеленой фитомассы в сравнении с распространенными в области сельскохозяйственными культурами (зерновые, соя, подсолнечник, кукуруза). Более низкие максимальные годовые значения NDVI залежей обусловлены наличием прошлогоднего сухостоя, снижающего абсолютные значения индекса.

Таблица 1

Table 1

Характеристики NDVI (рассчитанного за вегетационный сезон) поля, являющегося пашней, а затем залежью
Characteristics of NDVI area in the state of arable land and then in state of fallow

Год	Н набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Ст. откл.	Состояние
2003	13	0.513	0.350	0.817	0.132	пашня
2004	13	0.542	0.338	0.815	0.156	пашня
2005	13	0.487	0.342	0.695	0.124	пашня
2006	13	0.526	0.305	0.711	0.124	залежь
2007	13	0.548	0.421	0.659	0.067	залежь
2008	13	0.561	0.450	0.729	0.097	залежь
2009	13	0.500	0.356	0.674	0.098	залежь
2010	13	0.530	0.360	0.631	0.085	залежь

Снижение величины стандартного отклонения указывает на то, что на бывшей пашне постепенно формируется стационарное растительное сообщество, для которого не характерна такая сильная сезонная вариабельность значений вегетационного индекса, как для пахотных земель, на которых выращиваются сельскохозяйственные культуры.

Аналогичные результаты получены для ряда объектов, являющихся залежами достаточно длительные промежутки времени (табл. 2). Нами были проанализированы стандартные отклонения NDVI бывших аграрных угодий, (каждое площадью более 20 га) достоверно являющихся залежами в период 2004–2013 гг. Оценка стандартного отклонения была рассчитана за вегетационный период каждого года. Полученные результаты также показали тенденцию к снижению стандартного отклонения, наблюдающуюся с увеличением возраста залежи. Эта тенденция в отдельные годы может быть нарушена, если на залежи производилось сенокошение. Необходимо отметить, что выявление тенденции к снижению величины стандартного отклонения для NDVI на основе данных MODIS достоверно можно проследить, если залежь имела площадь не менее 20 га и при расчете многолетнего ряда ее спектральных характеристик не были учтены значения пикселей соседних угодий.

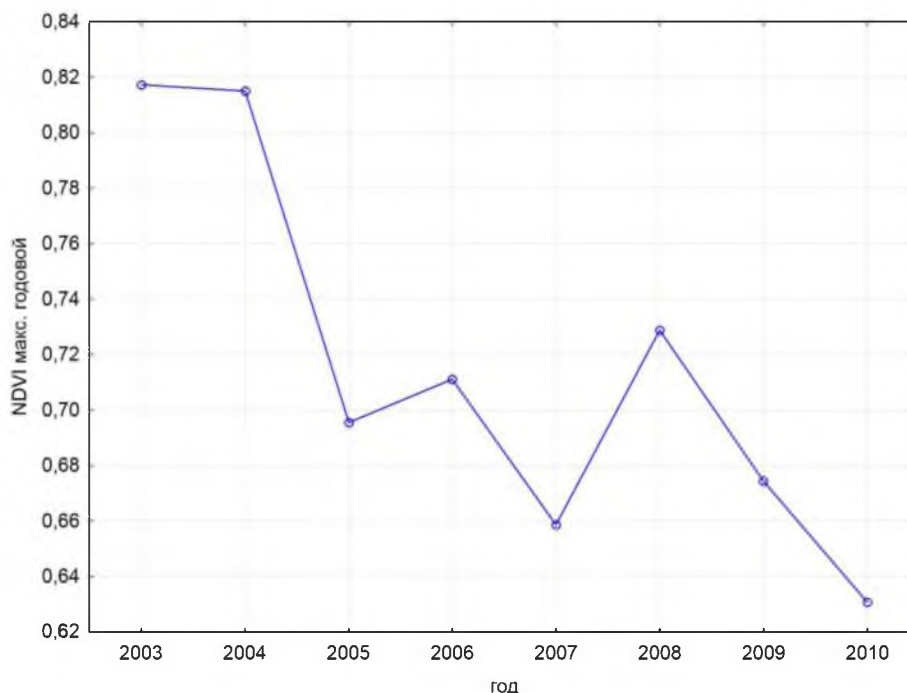


Рис. 1. Снижение максимальных внутригодовых значений NDVI, обусловленное переводом пашни в залежь (2005 г.) и увеличением ее возраста
 Fig. 1. Decrease the NDVI maximum values due to the transfer of arable land to fallow (2005) and the increase of its age

Таблица 2
 Table 2

Изменение стандартного отклонения NDVI залежей по мере увеличения их возраста
Changing the standard deviation of NDVI fallows with increasing their age

Объект/Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	0.156	0.124	0.124	0.067	0.097	0.098	0.085	0.089	0.075	0.086
2	0.142	0.135	0.094	0.072	0.101	0.088	0.089	0.086	0.083	0.076
3	0.133	0.146	0.129	0.100	0.112	0.105	0.116	0.101	0.098	0.107
4	0.140	0.119	0.104	0.080	0.095	0.085	0.102	0.091	0.087	0.095

Т. е. снижение величины стандартного отклонения за значительный промежуток времени является диагностическим признаком залежей, возрастом более 7–10 лет.

Смена залежи пашней.

Оценка статистических параметров NDVI за вегетационный сезон (6 марта – 17 ноября, 14 дат с интервалом в 16 дней) показала, что в первый год после распашки залежи наблюдаются наибольшие отличия в значениях индекса от других лет (табл. 3). Они проявляются в снижении его средних за вегетационный период значений. Обусловлено это тем, что подготовка поля, находящегося в залежи к севу, может потребовать нескольких распашек перед проведением посевных работ, которые отражаются на сезонном ходе NDVI (рис. 2) и приводят к снижению его среднегодового значения. В таблице 3 приведены характеристики залежи разнотравно-злакового состава (наиболее типичный состав залежей Белгородской области), на которой после распашки была засеяна озимая пшеница осенью 2015 года.

Таблица 3

Table 3

Характеристики вегетационного индекса поля, находящегося в состоянии залежи и пашни

Characteristics of NDVI area in state of fallow and then in state of arable land

Год	№ набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Ст. откл.	Состояние
2011	14	0.628	0.388	0.780	0.140	залежь
2012	14	0.635	0.394	0.777	0.100	залежь
2013	14	0.640	0.411	0.770	0.115	залежь
2014	14	0.602	0.266	0.825	0.160	залежь
2015	14	0.558	0.287	0.738	0.132	пашня
2016	14	0.660	0.370	0.828	0.137	пашня

Из таблицы 3 видно, что статистические характеристики вегетационного NDVI бывшей залежи в наибольшей степени отличаются от остальных лет в первый год после ее распашки (2015 г.), т.е. на протяжении которого велись подготовительные работы к севу, а затем были посеяны озимые культуры. Стоит добавить, что на этой залежи в некоторые годы производилось сенокосшение, обусловившее высокие стандартные отклонения индекса. Таким образом, в год подготовки распаханной залежи к посеву наблюдаются максимальные отличия в значениях NDVI как предыдущих, так и последующих лет. Фактически такие периоды являются промежуточными стадиями между залежью и пашней.

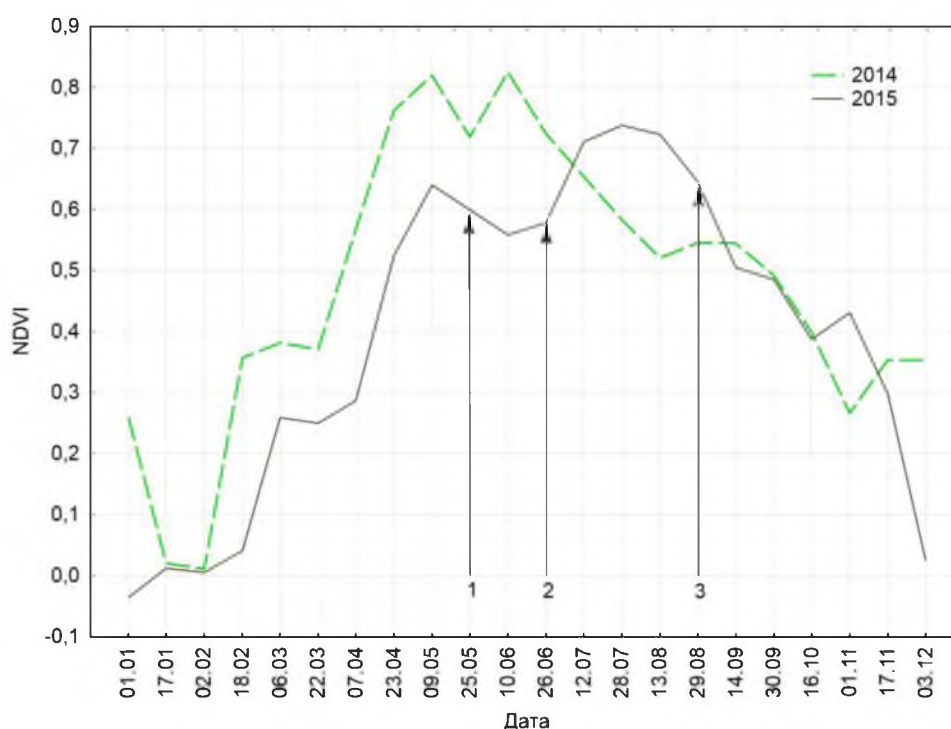


Рис. 2. Изменение сезонной динамики NDVI после распашки залежи. 2014 г. – состояние залежи, 2015 г. – пашня. 1, 2, 3 – 1-ая, 2-ая, 3-ья распашка

Fig. 2. Changing of NDVI dynamics after plowing abandoned agricultural land. 2014 – the state of abandoned agricultural land, 2015 – plowed fallow land

Изменение состояния почвенно-растительного покрова распаханной залежи, динамика NDVI которой представлена на рисунке 2, показано на рисунке 3.



Рис. 3. Динамика состояния почвенно-растительного покрова распаханной залежи
 Fig. 3. Dynamics of state soil-vegetation cover of plowed fallow

Таким образом, динамика NDVI отражает изменения в особенностях растительного покрова как после перевода посевных площадей в состояние залежи, так и при выводе полей из этого состояния. Изучение разновременных снимков высокого пространственного разрешения, наряду с данными полевых наблюдений позволило проанализировать развитие растительного покрова разновозрастных залежей. При этом необходимо отметить, что ограничения пространственного разрешения используемых спутниковых данных MODIS достоверно позволяют применять данные критерии для угодий площадью более 20–30 га.

Заключение

Залежные земли характеризуются формированием нового типа растительного покрова, что изменяет сезонную динамику их спектрально-отражательных свойств. Выявление года, в который посевная площадь стала залежью, либо наоборот она была распахана, можно оценить на основе величины максимальных годовых значений вегетационного индекса NDVI и стандартного отклонения. Для распаханых и засеваемых полей максимальные годовые значения индекса, как правило, выше, чем для залежей. С увеличением возраста залежи при условии отсутствия нарушений ее растительного покрова (например, сенокошения), наблюдается тенденция к снижению величины годового стандартного отклонения индекса, рассчитанного за вегетационный сезон. В первый год после распашки залежи и подготовки ее к посеву отличия вегетационного индекса могут быть максимальными в сравнении, как с предыдущими, так и с последующими годами.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4611.2016.5.



Список литературы References

1. Голусов П.В., Лисецкий Ф.Н. 2009. Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 210.
Goleusov P.V., Lisetskiy F.N. 2009. Vosproizvodstvo pochv v antropogennykh landshaftakh lesostepi [Reproduction of soils in the forest-steppe anthropogenic landscapes]. Moscow, GEOS, 210. (in Russian)
2. Жукова Е.Ю., Андрианова Е.А. 2013. Характеристика растительности залежных земель окрестностей г. Черногорска республики Хакасия. *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*, 3: 9–13.
Zhukova E.Yu., Andrianova E.A. 2013. Vegetation Characteristics of the City of Chernogorsk Environs Fallow Lands in the Republic of Khakasia. *Bulletin of Khakass State University. N.F Katanov*, 3: 9–13. (in Russian)
3. Низкий С.Е. 2014. Заселение древесной растительностью залежей в условиях южной сельскохозяйственной зоны. *Альманах современной науки и образования*, 4 (83): 111–113.
Nizkiy S.E. 2014. Filling fallow lands with woody vegetation in conditions of south agricultural zone. *Almanac of Modern Science and Education*, 4 (83): 111–113. (in Russian)
4. Никонов М.В., Смирнов И.А. 2014. Некоторые особенности зарастания агроландшафтов на земле Новгородской. *Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого*, (76): 58–60.
Nikonov M.V., Smirnov I.A. 2014. Some peculiarities of farmland overgrowing in Novgorod region. *Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University*, (76): 58–60. (in Russian)
5. Терехин Э.А. 2015. Сезонная динамика NDVI многолетних трав и ее использование для типизации их посевов на территории Белгородской области. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12 (2): 9–17.
Terekhin E.A. 2015. NDVI seasonal dynamics of perennial grasses and its use for classification of their crops in the Belgorod Region. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12 (2): 9–17. (in Russian)
6. Терехов А.Г., Виковская М.Ж., Батырбаева Л.Ф. 2010. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным Landsat и MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 7 (3): 292–304.
Terekhov A.G., Vikovskaya M.Zh., Bатыrbaeva L.F. 2010. Principles of agrolandscape zoning of arable land of the Northern Kazakhstan with using of landsat and MODIS. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 7 (3): 292–304. (in Russian)
7. Boschetti M., Stroppiana D., Brivio P.A., Bocchi S. 2009. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (18): 4643–4662.
8. 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.
9. 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.