



УДК 528.88

## АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS<sup>1</sup>

**Э.А. Терехин**

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

E-mail [terekhin@bsu.edu.ru](mailto:terekhin@bsu.edu.ru)

Изложены результаты исследования сезонного изменения спектральных свойств сельскохозяйственных культур, выращиваемых в Белгородской области по 16-дневным композитным изображениям, получаемым на основе спутниковых данных MODIS. Показаны возможности дистанционного мониторинга состояния растительности.

Ключевые слова: космические снимки MODIS, композитные изображения, сезонные изменения, сельскохозяйственные культуры.

### Введение

Одним из ключевых компонентов контроля состояния сельскохозяйственной растительности является изучение сезонных изменений в развитии культур, которые отражаются в их спектре отражения. В отличие от большинства типов растений спектральные отражательные свойства сельскохозяйственной растительности характеризуются высокой степенью динамики на протяжении всех фаз развития [1]. Обозначенная особенность может быть использована при дистанционном анализе состояния растений и прогнозе их развития на основе спектра отражения. С начала 2000-х гг. наблюдается активное применение многозональных спутниковых данных высокого временного разрешения для изучения состояния растительных культур разных природных зон [2, 3]. С другой стороны, все четче намечается тенденция применения для мониторинга посевов не исходных снимков, а продуктов, получаемых на их основе, представляющих изображения вегетационных индексов [4, 5, 6]

Белгородская область является регионом активного сельскохозяйственного землепользования. Под пашню используется более 60% ее территории. Основными выращиваемыми культурами являются пшеница озимая, ячмень яровой, кукуруза, подсолнечник, сахарная свекла и многолетние травы.

Развитие сельскохозяйственных культур на протяжении вегетационного сезона происходит очень стремительно, что отражается на их спектре отражения. Коэффициенты спектральной яркости большинства растений меняются на протяжении 10–12 дней, что определяет специфические требования к материалам спутниковой съемки, применяемой при их изучении. К ним относятся:

- а) высокая периодичность получения спутниковых снимков;
- б) атмосферная и радиометрическая калибровка, необходимые для корректного сопоставления разновременных данных и получения достоверных результатов;
- в) наличие красного и ближнего инфракрасного каналов;
- г) пространственное разрешение, позволяющее достоверно оценивать спектральный отклик полей с произрастающими агрокультурами.

Для анализа сезонных спектральных изменений сельскохозяйственной растительности также целесообразно использование безоблачных композитных изображений, получаемых на основе спутниковых данных. Композитные изображения представляют усредненные за несколько дней значения спектральных коэффициентов отражения, либо вегетационных индексов, рассчитываемых на основе исходных снимков

Для Белгородской области в вегетационный период характерно значительное число дней с облачностью, что осложняет получение безоблачных спутниковых изображений ее территории. Соответственно, вероятность получить набор безоблачных снимков со спутников, снимающих с периодичностью 10–16 дней очень невысока. В настоящее время большинству исследователей доступны снимки с небольшого числа спутников, снимающих земную поверхность ежедневно, и позволяющих создавать на их основе безоблачные композитные изображе-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.А18.21.1151 от 24.08.2012 г.



ния за несколько дней – Terra и Aqua. На них установлен спектрорадиометр MODIS, позволяющий получать снимки в красном и ближнем инфракрасном каналах с пространственным разрешением 250 м.

В настоящее время снимки с данного сенсора и продукты на их основе успешно зарекомендовали себя для целей изучения растительного покрова на глобальном и региональном уровнях [7, 8, 9]. Соответствующее разрешение снимков позволяет достоверно изучать спектральный отклик полей, размер которых более 50 га, но не дает возможность точно дешифровать конкретные агрокультуры. Для этой цели необходимо применение снимков более высокого разрешения, например, Landsat TM [10], либо данных наземных полевых обследований. Целью настоящей работы является исследование изменений спектрального отклика сельскохозяйственных растений Белгородской области и его применение для оценки состояния агрокультур.

### Методы исследования

Исследование сезонного изменения коэффициентов спектральных яркостей сельскохозяйственной растительности на территории конкретного региона целесообразно проводить путем усреднения спектральных характеристик культуры, оцененных на совокупности полей. Т.е. если, к примеру, анализируются спектральные характеристики пшеницы на 50 полях, то первоначально они измеряются на каждом поле за несколько временных срезов, затем вычисляются усредненные значения на каждый временной срез и строится график сезонного изменения спектральных признаков культуры, отражающих особенности ее развития на территории региона.

Число полей должно быть максимальным, чтобы репрезентативно отражать особенности изучаемых культур, выращиваемых в регионе. Необходимо отметить, что с точки зрения сельскохозяйственных производителей интерес также представляет информация об особенностях развития посевов на конкретном поле.

Для изучения сезонного изменения спектрального отклика сельскохозяйственных растений Белгородской области был применен способ анализа спектральных характеристик. Способ основан на точечной оценке их значений в пределах полей, на которых заведомо было известно о наличии конкретных культур. В анализе участвовали поля под озимой пшеницей, ячменем яровым, подсолнечником, кукурузой и многолетними травами. В совокупности оценка спектральных характеристик производилась на 190 полях.

В настоящем исследовании было проанализировано сезонное изменение спектральных индексов NDVI и EVI, которые являются одними из наиболее эффективных для подобного рода исследований. Значения спектральных индексов были получены на основе продуктов MOD13Q1, представляющих безоблачные композитные изображения значений спектральных индексов, усредненных за 16 дней. Продукты MOD13Q1 создаются на основе атмосферно и радиометрически откорректированных снимков MODIS и распространяются службой LPDAAC [11]. Значения спектральных индексов были исследованы для 14 временных срезов, охватывающих период вегетационного развития большинства сельскохозяйственных культур – с 22 марта по 16 октября 2011 года.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности, количественный показатель фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Один из наиболее применяемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2),$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения в красной и ближней инфракрасной зонах спектра.

Индекс нового поколения EVI разработан специально основе NDVI (Enhanced Vegetation Index – улучшенный вегетационный индекс):

$$EVI = (R_{Nir} - R_{Red}) \times (1+L) / (R_{Nir} + C_1 R_{Red} - C_2 R_{Blue} + L),$$

где  $R_{Nir}$ ,  $R_{Red}$ ,  $R_{Blue}$  – скорректированные за атмосферу (по данным съёмки MODIS) значения отражательной способности в ближней инфракрасной, красной и голубой зоне спектра (0.841–0.876, 0.620–0.670, 0.459–0.479 мкм);  $L$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы;  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты, контролируемые вклад голубой зоны в коррекцию красной за рассеяние атмосферными аэрозолями. Индекс позволяет выделить больше градиций в районах с высокой зеленой биомассой и имеет преимущества для мониторинга растительности, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях EVI минимизировано.

Достоверное местоположение конкретных культур определялось на основе материалов наземных обследований и материалов съёмки со спутника Landsat 5, полученных в июне того же года. Исследование проводилось на территории Ивнянского района Белгородской области. Извлечение спектральных характеристик производилось по спутниковым данным в пределах

векторных масок границ полей, что обеспечивало достоверность получаемых данных. Спектральные характеристики внутри каждого поля были вычислены в геоинформационной системе ArcGIS методом зональной статистики, после чего они были усреднены для каждой культуры и таким образом представляли основу для построения графиков сезонного изменения спектральных индексов каждой культуры. Поскольку изменение спектральных признаков сельскохозяйственных культур тесно связано с их вегетационным развитием, то по динамике спектральных индексов можно судить о состоянии растительности. Спектральные индексы коррелируют с такими параметрами растений, как проективное покрытие, содержание хлорофилла и объем наземной фитомассы. Указанное соотношение не является однозначным, т. е. функциональным, но, тем не менее, достаточно выраженным, что подтверждают ряд исследований связи индексов с параметрами растительности [12].

### Результаты и их обсуждение

Сезонный ход спектральных индексов озимой пшеницы, оцененных на 60 полях (рис. 1), дает возможность наглядно проследить особенности развития культуры за весь срок анализируемого периода. Необходимо отметить, что состояние всех исследованных культур периодически фиксировалось в ходе полевых обследований с визуальным осмотром культуры, а также по снимкам высокого пространственного разрешения Landsat 5, которые удалось получить на некоторые временные срезы.

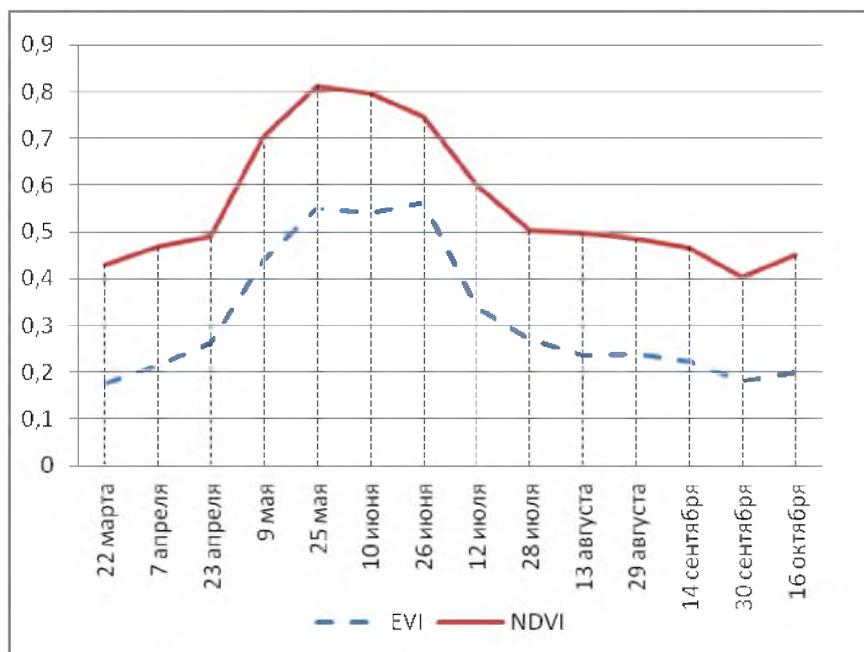


Рис. 1. Сезонные изменения значений спектральных индексов пшеницы озимой

Из графика видно, что до 23 апреля происходил постепенный рост значений спектральных индексов. С 23 апреля и до 25 мая наблюдался стремительный рост их значений, вероятно обусловленный повышением объема зеленой биомассы. Период с 25 мая по 28 июля характеризовался колошением и постепенным пожелтением посевов, на что указывает резкое снижение индекса, чувствительного к содержанию хлорофилла в стебле. Около 28 июля проводился сбор урожая. Минимальное значение индекса, зафиксированное 30 сентября, и последующий рост указывает на то, что после этого срока большинство полей вновь было засеяно и, наблюдался рост озимых культур. Развитие ячменя ярового (рис. 2) характеризуется похожим графиком с той отличительной особенностью, что пик значений *NDVI* приходится на более поздний срок – 10 июня, что объясняется более поздним созреванием яровых культур по сравнению с озимыми.

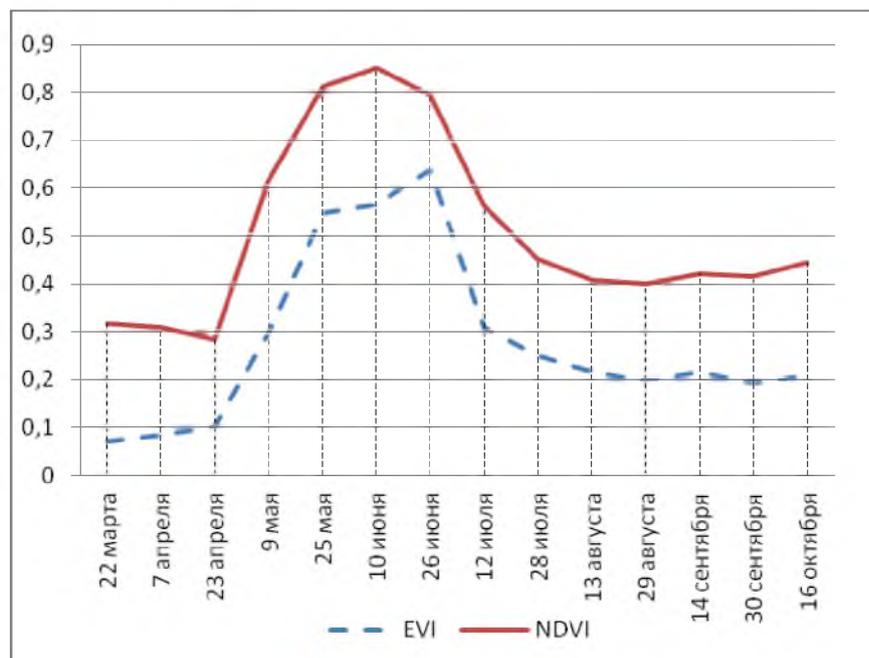


Рис. 2. Сезонное изменение значений спектральных индексов ячменя ярового

Необходимо отметить, что сезонный тренд значений индекса EVI дает во многом аналогичную картину, что повышает достоверность оценок, выполненных по значениям NDVI. Кукуруза на силос высевается в сроки, когда почва еще достаточно влажная, но погода уже достаточно теплая. При этом максимум зеленой фитомассы данная культура набирает позже пшеницы или ячменя – к концу июня, что отражено в графике динамики спектральных признаков (рис. 3). После этого периода происходит постепенное, а затем резкое пожелтение стеблей и листьев. Уборка урожая происходит, как правило, в конце сентября – начале октября.

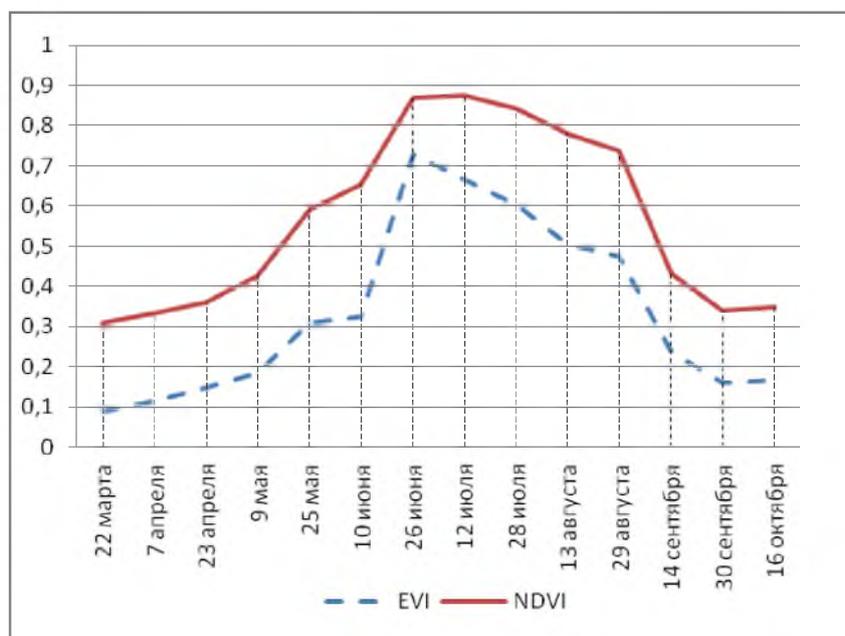


Рис. 3. Сезонное изменение значений спектральных индексов кукурузы

Особенности сезонного развития подсолнечника во многом аналогичны развитию кукурузы, что наглядно отражено на графике динамики его спектральных индексов (рис. 4).

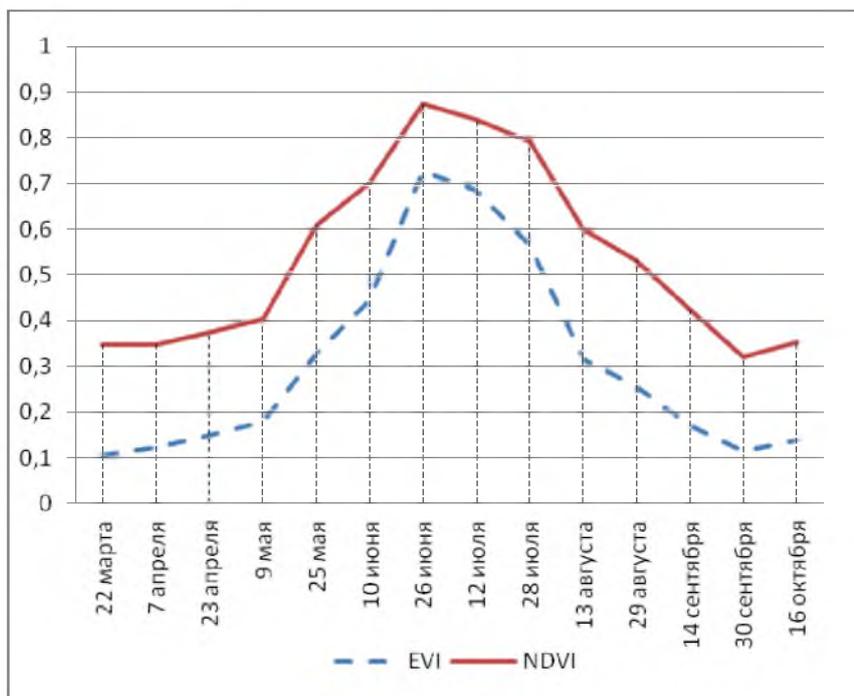


Рис. 4. Сезонное изменение значений спектральных индексов подсолнечника

Для многолетних трав, выращиваемых в Белгородской области (эспарцет, люцерна), в отличие от большинства остальных сельскохозяйственных культур характерно то, что скашивание, являющееся аналогом сбора урожая, может происходить более одного раза. Для эспарцета первый сплошной укос может выполняться уже в начале в июня. Последующее скашивание – через 1–1,5 месяца после первого. Для люцерны скашивание может производиться еще чаще – до 3–4 раз в год. Т. к. уборка урожая, выражающаяся в резком падении количества зеленой фитомассы, кардинальным образом меняет спектр отражения поля, на котором произрастали многолетние травы, то в сезонном спектре трав этот факт будет отражаться очень заметно (рис. 5).

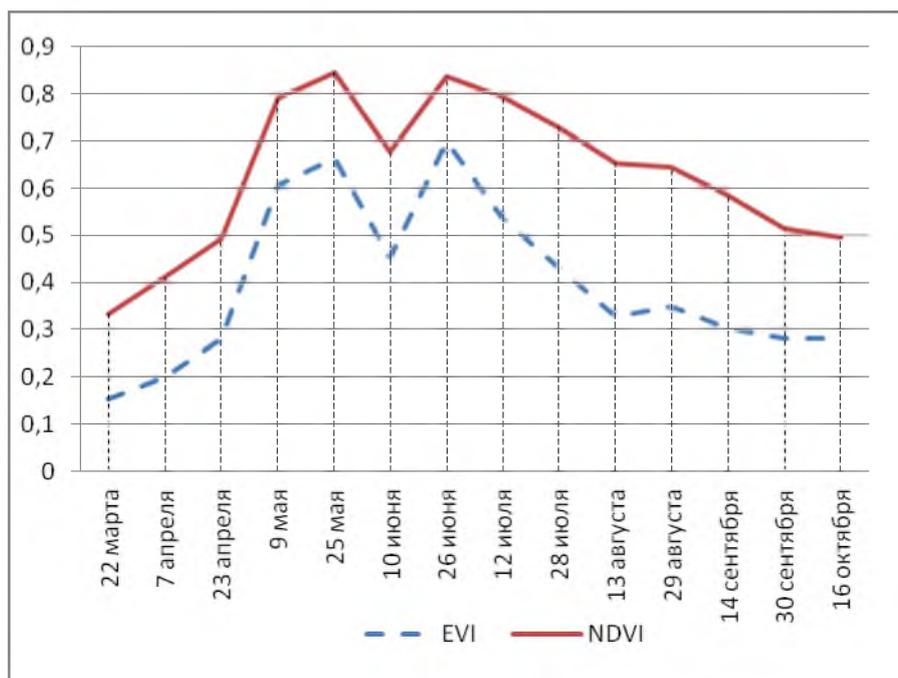


Рис. 5. Сезонное изменение значений спектральных индексов многолетних трав



Каждое сенокосение будет сопровождаться падением значений спектральных индексов, обусловленным снижением объема зеленой фитомассы. Следует отметить, что анализ динамики спектральных индексов позволяет определить число скашиваний, а соответственно сделать предположение, какой из видов многолетних трав доминирует на анализируемых полях. Анализ графиков, представленных на рисунке 5, дает основание предполагать, что кошение в течение сезона производилось 2 раза – в период между 25 мая и 10 июня и между 26 июня и 12 июля. Т. е., судя по графику это эспарцет, т. к. у люцерны скашивание производится гораздо чаще. Таким образом, особенности сезонного хода спектральных индексов в данном случае можно успешно использовать как косвенный дешифровочный признак в целях определения типа растительности. Актуально это также с учетом того, что даже по снимкам высокого пространственного разрешения, например, Landsat TM, проблематично достоверно отличить люцерну от эспарцета, за исключением последней фазы активного цветения.

### Выводы

Выполненное исследование сезонного изменения спектральных индексов NDVI и EVI сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории Белгородской области, позволило проследить изменения в спектре отражения пшеницы озимой, ячменя ярового, кукурузы, подсолнечника и многолетних трав на протяжении вегетационного периода.

С учетом того, что проанализированные спектральные индексы коррелируют с содержанием хлорофилла в растительных тканях и объемом зеленой фитомассы, анализ значений индексов позволил сделать выводы о сезонном развитии каждой анализируемой культуры, в т.ч. определить период максимального роста зеленой фитомассы, сроки уборки урожая, период активного роста озимых. Для многолетних трав исследование спектрального отклика позволило выявить количество скашиваний и сделать более детальные выводы о типах многолетних трав, преимущественно выращиваемых на полях. Совместное использование индексов NDVI и EVI повысило достоверность результатов анализа динамики спектральных признаков сельскохозяйственной растительности.

### Список литературы

1. Relationship of spectral data to grain yield variation / C.J. Tucker, B.N. Holben, J.H. Elgin, J.E. McMurtrey // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1980 – Vol. 46. – P. 657–666.
2. Methodology of the MARS crop yield forecasting system. Vol. 3: Remote sensing information, data processing and analysis / H. Eerens, I. Piccard, A. Royer, S. Orlandi; Eds. A. Royer and G. Genovese. – 2004. – 76 p.
3. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Баргалева, Е.А. Лурия, И.А. Нейштадт, И.Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, № 2 – С. 228–236.
4. Justice C.O. An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment. – 2002. – № 83. – P. 3–15.
5. Нейштадт И.А. Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 2. – С. 359–365.
6. Плотников Д.Е., Баргалева С.А., Лурия Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 2. – С. 322–330.
7. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных / М.А. Медведева, С.А. Баргалёв, Е.А. Лурия и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 2. – С. 313–321.
8. Терехов А.Г. Эмпирические зависимости между элементами продуктивности яровой пшеницы северного Казахстана и спектральными характеристиками полей по данным EOS MODIS в сезонах 2005–2009 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 305–314.
9. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений и прогнозирования урожая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 170–177.
10. Терехин Э.А. Спектральные отражательные свойства сельскохозяйственной растительности Белгородской области (по материалам космической съемки) // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Естественные науки». – 2012. – №15 (134), Вып. 20. – С. 188–193.
11. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). URL: <https://lpdaac.usgs.gov>
12. Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation // International journal for remote sensing. – 2006. – Vol. 27, № 7. – P. 1297–1328.



## **ANALYSIS OF SPECTRAL PROPERTIES OF AGRICULTURAL VEGETATION OF THE BELGOROD REGION ON MODIS SATELLITE DATA**

**E.A. Terekhin**

*Belgorod State National Research  
University, 85, Pobedy St., Belgorod,  
308015, Russia*

*E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

The results of the study of seasonal changes of the spectral properties of the agricultural crops which are grown in the Belgorod region under 16-day composite images, received on the basis of satellite data MODIS are stated. Possibilities of remote monitoring of the state of vegetation are shown.

Keywords: satellite images MODIS, composite images, seasonal changes, agricultural crops.