

УДК 528.88

Э. А. ТЕРЕХИН

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОСЕВОВ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Проведены исследования сезонных значений вегетационного индекса *NDVI* на основе снимков среднего пространственного разрешения и спектрально-отражательных признаков озимых культур на снимках высокого пространственного разрешения, позволившие предложить и апробировать автоматизированный метод детектирования и анализа посевов озимых. В его основу положено вычисление пороговых значений вегетационного индекса в период начала интенсивного роста озимых культур после схода снежного покрова. Метод предполагает использование значений вегетационного индекса, усредненных в границах контуров возделываемых полей. Изучены спектрально-отражательные признаки сельскохозяйственных полей с озимыми культурами в разные сроки вегетационного периода. Сезонный ряд значений *NDVI* получен на основе данных *MOD13Q1*. Оценка сезонных значений вегетационного индекса для озимых культур показала, что дешифрирование их посевов целесообразно проводить в два приема: сначала по апрельским значениям индекса дешифрируются успешно перезимовавшие посевы, а затем с помощью разновременных снимков высокого пространственного разрешения идентифицируются посевы, плохо перенесшие зимний сезон. Корректировку результатов дешифрирования полей с озимыми культурами предложено проводить на основе снимков *Landsat* периода середины лета. На примере Новооскольского района Белгородской области показана и проанализирована динамика площадей с озимыми культурами в 2010–2013 гг., а также представлены результаты их геоинформационного картографирования.

Ключевые слова: озимые культуры, сезонные изменения, *NDVI*, спутниковые снимки, автоматизированное дешифрирование.

Seasonal values of the vegetation index NDVI and spectral-reflective attributes of winter crops are investigated using moderate spatial resolution imagery and high spatial resolution imagery, respectively, thus making it possible to suggest and test the automated method of detecting and analyzing areas under winter crops. The method is based on calculating the threshold values of the NDVI early in the period of intense growth of winter crops after the disappearance of snow cover. The method involves using the NDVI values averaged within the contours of cultivated fields. A study is made of the spectra-reflective attributes of agricultural fields under winter crops for different time intervals of the growth period. The seasonal series of NDVI values was obtained on the basis of MOD13Q1 data. An assessment of the seasonal NDVI values for winter crops showed that it is worthwhile performing their interpretation in two steps: successful winter crops are interpreted from April values first, followed by identification of poor winter crops using high spatial resolution images. It is suggested that interpretation results on fields under winter crops should be updated using Landsat images for the midsummer period. Using the Novooskol'skii district of Belgorod oblast as an example, the dynamics of areas under winter crops is illustrated and analyzed for 2010–2013, and results of their geoinformational mapping are provided.

Keywords: winter crops, seasonal changes, *NDVI*, satellite images, automated interpretation.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Белгородская область является регионом активного аграрного использования. Распаханность ее территории превышает 60 % [1], это один из самых высоких показателей в России. При этом значительная часть посевных площадей (около 50 %) отводится под зерновые культуры, в основном озимые [2]. Подавляющая площадь озимых сосредоточена под пшеницей, выращивание ее играет существенную роль в экономике региона, что в свою очередь обуславливает необходимость решения ряда задач мониторинга, к которым относятся оценка площади посевов, получение информации об их расположении и структуре, анализ сезонного развития, оценка условий перезимовки. Большие возможности для этого предоставляют данные спутниковых наблюдений. К настоящему времени проведены исследования, направленные на изучение состояния озимых культур в ряде регионов России и за рубежом [3–5], которые показали эффективность использования спутниковых данных для мониторинга посевов.

Отдельное направление посвящено дистанционной оценке посевных площадей, применению спектральных вегетационных индексов для их анализа [6, 7]. Установлено, что широкая вариация сезонных и территориальных спектральных свойств озимых культур, региональные особенности их развития требуют применения подходов, учитывающих условия конкретных регионов. Особую ак-

туальность представляет разработка способов мониторинга посевов, позволяющих проводить их анализ на уровне отдельных административных районов и фермерских хозяйств [8].

В настоящей статье представлены результаты разработки и апробации метода анализа посевов озимых, основанного на изучении сезонной динамики вегетационного индекса NDVI, исследовании отражательных признаков озимых культур на снимках высокого пространственного разрешения, учете региональных особенностей высевания и развития посевов, характерных для Белгородской области и Центрального Черноземья.

МЕТОДЫ, МАТЕРИАЛЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование спектральных свойств озимых культур проведено с использованием данных среднего пространственного разрешения MODIS и снимков высокого пространственного разрешения Landsat ETM+. Для оценки площади сельскохозяйственных полей задействованы снимки SPOT-5. Разработка способа автоматизированного дешифрирования посевов озимых основана на снимках сезона 2012 г. Для этой цели на период вегетационной активности 2012 г. создана подборка спутниковых снимков Landsat ETM+ [9] с пространственным разрешением 15 и 30 м/пиксель (см. таблицу) и данных MOD13Q1. Перечень снимков в таблице представлен в координатах системы WRS-2, принятой для международного обозначения расположения снимков Landsat 5, 7, 8. По причине относительно высокой доли облачных дней на территории Белгородской области снимками Landsat удалось охватить не все месяцы вегетационного сезона, когда озимые находятся на полях, однако изображения MOD13Q1 компенсировали эту проблему. По совокупности характеристик снимки Landsat TM, ETM+ могут быть успешно использованы для детектирования и анализа объектов, площадь которых составляет более 20 га [10], что делает эффективным их применение даже для исследования небольших по размеру сельскохозяйственных полей.

Так как по причине поломки сенсора снимки Landsat 7 ETM+ с 31 мая 2003 г. имеют участки (примерно 19 %) с отсутствием информации, то для изучаемой территории взяты перекрывающиеся сцены с соседних витков (176-й и 177-й) (см. таблицу). Это позволило восполнить дефицит данных на отдельные сельскохозяйственные поля. Кроме того, важно отметить, что для аналогичных целей можно использовать поставляемые регулярно с весны 2013 г. снимки со спутника Landsat 8, по ряду параметров близкие к таковым с Landsat 7 и характеризующиеся отсутствием дефектов, свойственных снимкам Landsat 7 ETM+.

Изображения MOD13Q1 создаются на основе ежедневных атмосферно и радиометрически скорректированных снимков MODIS [11] и содержат значения вегетационного индекса NDVI [12], усредненные за 16 дней, что позволяет отслеживать их динамику с небольшим интервалом времени. В данной работе охвачен период с 5 марта по 16 ноября 2012 г., т. е. весь вегетационный сезон. К настоящему времени NDVI широко используется для анализа растительности, включая посевы сельскохозяйственных культур. При этом региональные особенности их развития, созревания и состава обуславливают необходимость изучения значений индекса для посевов конкретных регионов.

Экспериментальное картографирование озимых выполнено на примере посевной площади, включающей 1195 сельскохозяйственных полей (71 649 га), расположенных в Новооскольском районе Белгородской области. Структура посевов района в значительной степени отражает структуру посевных площадей региона. В 2012 г. на территории района выращивались все ключевые сельскохозяйственные культуры области, включая озимые. Для проверки точности оценки площадей озимых использованы данные Федеральной службы государственной статистики по территории Новооскольского района [13] и результаты наземных обследований.

При разработке метода анализа и дешифрирования придерживались принципа обеспечения максимально возможной достоверности и автоматизации процессов. Высокая точность оценки спектральных свойств посевов и посевных площадей достигнута путем создания и применения векторного слоя сельскохозяйственных полей на всю исследуемую территорию, использованием серии космических снимков (а не одиночных изображений), применением различных типов спутниковых данных.

Первый этап включал создание векторного слоя сельскохозяйственных полей на территории исследования на основе панхроматических снимков высокого пространственного разрешения SPOT-5 (5 м/пиксель), что позволило достоверно оценить площадь и расположение всех полей.

Анализируемые снимки Landsat ETM+, 2012 г.

Дата съемки	Координаты снимков в системе WRS-2	
	Path	Row
4 мая	176	25
20 мая	176	25
7 июля	176	25
14 июля	177	25
30 июля	177	25
8 августа	176	25

Векторный слой впоследствии дал возможность проанализировать значения вегетационного индекса в пределах контуров каждого поля и исключить из анализа непахотные земли.

Второй этап направлен на изучение сезонных значений NDVI для озимых на протяжении периода вегетации, а также спектрально-отражательных характеристик озимых культур по серии снимков Landsat ETM+. Установлено, что для дешифрирования озимых, выращиваемых на территории Белгородской области, наибольшую эффективность представляют снимки, сделанные в апреле, начале и первой половине мая. На них посевы озимых отчетливо выделяются среди других культур, что наглядно проявляется в некоторых комбинациях каналов снимка, например 7–5–3 (2,09–2,35 мкм, 1,55–1,75 мкм, 0,63–0,69 мкм) и 4–3–2 (0,75–0,90 мкм, 0,63–0,69 мкм, 0,52–0,60 мкм), и на кривых спектральной яркости, построенных на основе яркостных характеристик соответствующих каналов.

В регионе весной большинство культур высеваются в конце марта–середине апреля, поэтому за прошедшие две-три недели они не успевают сформировать такой выраженный спектральный отклик, как у озимых. Это обусловлено существенными различиями между ними в объемах зеленой фитомассы.

Однако в Белгородской области с осени на полях кроме озимых зерновых культур произрастают многолетние травы, которые в апреле–мае имеют спектрально-отражательные характеристики, близкие к таковым озимых. Для их разделения использовали снимки Landsat 7, сделанные в середине июля. В это время озимые на полях уже созрели или убраны, т. е. имеют незначительную зеленую фитомассу, а поля с многолетними травами характеризуются повышенными ее объемами, что отражается на их спектральном отклике.

В процессе анализа продуктов MOD13Q1 установлено, что апрельские показатели NDVI позволяют идентифицировать поля с озимыми, которые хорошо пережили зиму, так как на них наблюдаются повышенные значения индекса. NDVI посевов озимых, перезимовавших не лучшим образом, как правило, значительно ниже. Для их выявления предложено использовать снимки Landsat ETM+ (в ретроспективе Landsat TM) периода апреля–начала мая, в отдельных случаях — конца мая.

Таким образом, дешифрирование посевов озимых культур целесообразно разделить на два блока: первый — выявление нормально перезимовавших посевов, второй — дешифрирование неблагоприятно перенесших зимовку. Использование спутниковых данных для этой цели представлено структурной схемой (рис. 1). Комбинация 7–5–3 для Landsat ETM+ и графики кривых спектральной яркости в соответствующих зонах спектра позволяют очень эффективно оценивать состояние озимых [14].

Путем исследования отражательных свойств посевов по снимкам высокого пространственного разрешения получено представление о развитии озимых культур на протяжении вегетационного сезона, что было применено при разработке автоматизированного способа детектирования посевов.

Третий этап заключался в разработке приемов детектирования на основе сезонных значений вегетационного индекса. При автоматизированном выделении сельскохозяйственных полей с озимыми культурами использованы особенности сезонного развития озимых. Результаты оценки отражательных признаков посевов на снимках высокого и среднего пространственного разрешения и информативности сезонных значений NDVI проанализированы с интервалом в 16 дней за весь период развития озимых после схода снега.

Теоретической основой автоматизированного выделения посевов озимых является то, что значения NDVI периода середины весны должны быть выше, чем у остальных культур [15] (за исключением полей с многолетними травами). Вычислив значения индекса озимых этого периода, можно произвести автоматический отбор соответствующих сельскохозяйственных полей. Исследование информативности сезонных значений NDVI (с 5 марта по 16 ноября) показало, что для такого способа

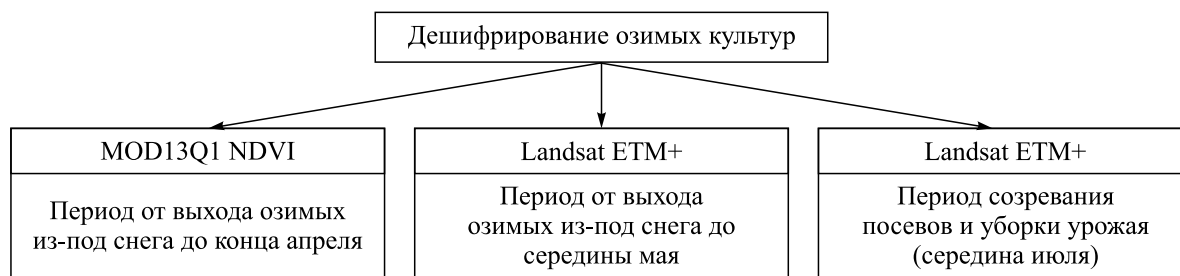


Рис. 1. Схема методики предварительного дешифрирования посевов озимых культур.

детектирования посевов озимых наиболее эффективны апрельские показатели, максимально отличающиеся от значений других культур.

В результате анализа почти 1250 сельскохозяйственных полей, расположенных в шести административных районах Белгородской области (включая 457 полей с озимыми культурами), установлено, что большинство посевов озимых в середине апреля имеют значения индекса более 0,57.

Таким образом, для выделения посевов озимых и многолетних трав, которые в середине весны также будут иметь повышенные значения индекса, необходимо использовать значения NDVI середины апреля большие, чем 0,57. Величина 0,57, характерная для сезона 2012 г., может незначительно меняться по годам.

Следует отметить, что этому критерию будут соответствовать поля, на которых озимые перезимовали успешно (без задержки в развитии). Поля с задержкой роста озимых имели более низкие значения индекса, несущественно отличающиеся от NDVI возделываемых полей с оголенной почвой. Этот вывод подтвержден полученными на предыдущем этапе результатами анализа значений NDVI и снимков высокого пространственного разрешения. Тем не менее применение критерия позволяет выделять подавляющее большинство полей с озимыми культурами, что очень важно для автоматизации процесса.

Чтобы достоверно автоматически разделить между собой поля с озимыми культурами и многолетними травами, теоретически можно воспользоваться июльскими значениями индекса. На полях с созревшими или убранными озимыми в июле наблюдаются низкие значения NDVI, обусловленные отсутствием зеленой фитомассы. В то же время активно растущие многолетние травы должны иметь более высокие показатели. Однако экспериментальные исследования показали, что данный подход не всегда удается эффективно применять. Это связано с особенностями укоса многолетних трав, который производится нерегулярно и в разное время в зависимости от их расположения и состава (например, на полях с люцерной укосы производятся чаще, чем на полях с эспарцетом). На территории Белгородской области многие поля с многолетними травами имеют площадь менее 50 га, что также осложняет достоверный анализ их значений NDVI по данным MOD13Q1. Вместе с тем их доля по сравнению с полями озимых культур незначительна, и поэтому подавляющее большинство отобранных на основе апрельских значений индекса сельскохозяйственных полей будут с озимыми культурами. Для выявления участков с озимыми, у которых наблюдается задержка в развитии, а также для разделения полей с многолетними травами и хорошо перезимовавшими озимыми предложено использовать снимки высокого пространственного разрешения Landsat 7 сезона начала мая и середины июля.

Автоматизированное выделение посевных площадей с озимыми культурами и многолетними травами на основе пороговых значений вегетационного индекса выполнено с применением геоинформационного пакета ArcGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По разработанному методу на первом этапе производили автоматический отбор сельскохозяйственных полей по апрельским значениям NDVI, а затем из полученной совокупности по снимкам Landsat исключали поля с многолетними травами и добавляли участки с плохо перезимовавшими озимыми. В итоге разработан полуавтоматический метод выделения полей с озимыми культурами (рис. 2), с помощью которого большая часть интересующих сельскохозяйственных полей выделяется автоматическим способом на основе значений NDVI, после чего результаты корректируются по данным высокого пространственного разрешения. Для реализации перечисленных процедур необходимо иметь предварительно рассчитанные сезонные значения NDVI для каждого анализируемого сельскохозяйственного поля.

Предложенным способом в Новооскольском районе в 2012 г. вычислена площадь полей с озимыми культурами, составившая 20 424 га. По данным Федеральной службы государственной статистики, этот показатель равнялся 20 255 га [13]. Следовательно, метод показал очень высокую точность (99,1 %) дешифрирования и определения возделываемых полей с посевами озимых.

Проведенный анализ площадей озимых культур в Новооскольском районе с 2010 по 2013 г., а также выполненное геоинформационное картографирование позволили пространственно оценить расположение посевов. Так, количество полей и посевная площадь составили в 2010 г. 299 и 15 649 га, в 2011 г. — 422 и 24 591, в 2012 г. — 364 и 20 424, в 2013 г. — 403 и 22 552 га соответственно. Контуры полей с озимыми культурами, вычисленные на основе данного метода, показаны на рис. 3.

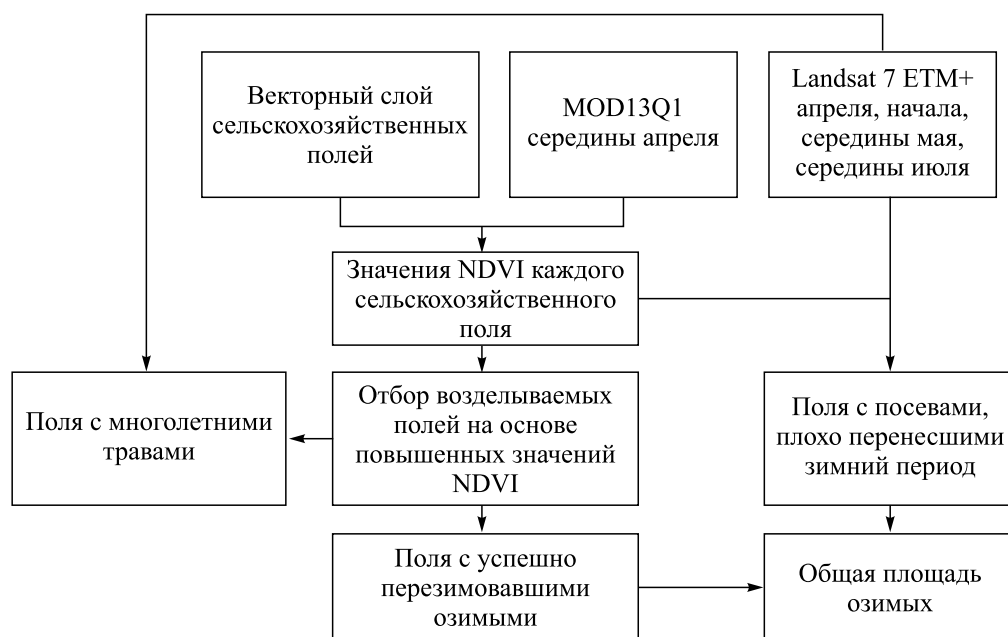


Рис. 2. Структурная схема метода детектирования и анализа посевов озимых культур.

Вычисленная площадь может незначительно отличаться от реальной, что обусловлено спецификой применения любого метода дистанционного анализа.

Отсутствие на подавляющем большинстве полей повторных посевов озимых (см. рис. 3) позволяет сделать предварительный вывод о соблюдении севооборотов на полях, однако это должно быть темой отдельного исследования.

Существенное увеличение посевных площадей (на 57,1 %) в 2011 г. по сравнению с 2010 г., по всей видимости, обусловлено повышенным спросом на зерно, так как в России в 2010 г. значительная часть посевов была уничтожена природными пожарами, что отразилось на урожае озимых.

Преимущества предложенного способа заключаются в его точности, эффективности применения на региональном уровне, значительной степени автоматизации, возможности использования минимального набора данных, включающего одно изображение MOD13Q1 периода апреля и два снимка Landsat ETM+ начала мая и середины июля. Использование значений вегетационного индекса, полученных на основе атмосферно и радиометрически откорректированных спутниковых данных, делает способ пригодным для оценки состояния озимых культур за разные годы. К недостаткам можно отнести ограничения его применения, обусловленные региональными особенностями развития озимых и структуры посевных площадей, снижение точности автоматической оценки при значительном количестве небольших полей площадью менее 20 га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен эффективный способ детектирования сельскохозяйственных полей с озимыми культурами, в основе которого лежат сезонные значения вегетационного индекса NDVI. Один из ключевых этапов метода — выявление пороговых значений NDVI для периода середины апреля с целью поиска интересующих полей. Значения вегетационного индекса вычисляются на базе данных MOD13Q1, являющихся производными ежедневно получаемых снимков MODIS. Корректировку и дополнение результатов автоматизированного дешифрирования сельскохозяйственных полей предложено проводить с использованием снимков Landsat ETM+, для чего исследованы спектрально-отражательные признаки посевов в разные сроки вегетационного сезона.

Способ учитывает региональные особенности высевания и созревания культур, структуру посевных площадей, что делает его эффективным для территории исследования и регионов с близкими природно-климатическими условиями. Технология может быть использована для ретроспективного анализа посевных площадей озимых, контроля соблюдения севооборотов, оценки площади много-



Рис. 3. Контуры посевных площадей (1) и полей с озимыми (2) на территории Новооскольского района:
a — 2010 г., NDVI — 23.04.2010 г; *б* — 2011 г., NDVI — 23.04.2011 г.

летних трав, находящихся на полях с предыдущих лет. На основе предложенного метода выполнено геоинформационное картографирование полей с озимыми культурами на территории Новооскольского района Белгородской области с 2010 по 2013 г.

Метод применим для Белгородской области и территорий с близкой структурой посевных площадей, а также сроками высевания и созревания озимых культур. В первую очередь к таким территориям относятся области Центрально-Черноземного региона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 5.78.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисецкий Ф. Н., Польшина М. А., Нарожная А. Г., Кузьменко Я. В. Решение почвоводоохранных и экологических задач при внедрении ландшафтных систем земледелия // Пробл. регион. экологии. — 2007. — № 6. — С. 72–79.
2. Лукин С. В. Динамика урожайности озимой пшеницы в Белгородской области // Достижения науки и техники. — 2013. — № 7. — С. 52–55.
3. Повх В. И., Воробейчик Е. А., Беков Б. Р., Шляхова Л. А. Снижение погрешности оценок площадей озимых по данным дистанционного зондирования Земли с учетом структуры сельскохозяйственных угодий // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 4. — С. 249–254.
4. Терехов А. Г. Методика оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур Северного Казахстана и его изменений в период 2000–2009 по данным MODIS // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8, № 2. — С. 233–238.
5. Лялько В. И., Сахацкий А. И., Жолобак Г. М., Попов М. А. Некоторые направления использования аэрокосмических методов при решении сельскохозяйственных задач в Украине // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 1. — С. 19–28.
6. Баргалева С. А., Лупян Е. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2005. — Т. 2, № 2. — С. 228–236.
7. Савин И. Ю., Баргалева С. А., Лупян Е. А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России // Геоматика. — 2011. — № 2. — С. 69–76.
8. Михайлов С. И. Применение данных дистанционного зондирования Земли для целей высокоточного земледелия // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. — 2012. — № 14. — С. 24–26.
9. USGS Global Visualization Viewer [Электронный ресурс]. — <http://glovis.usgs.gov/> (дата обращения 05.09.2013).
10. Терехин Э. А. Методика поиска эффективных спектральных индексов для автоматизированного дешифрирования водных объектов (на примере Белгородской области) // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 132–138.
11. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) [Электронный ресурс]. — <https://lpdaac.usgs.gov/> (дата обращения 05.12.2013).
12. Huete A., Justice C., van Leeuwen W. MODIS vegetation index (MOD13) // Algorithm Theoretical Basis Document. — 1999. — Vers. 3. — P. 19–21.
13. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. — <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst14/DBInet.cgi> (дата обращения 19.12.2013).
14. Терехин Э. А. Спектральные отражательные свойства сельскохозяйственной растительности Белгородской области (по материалам космической съемки) // Науч. ведомости Белгор. ун-та. Сер. естеств. науки. — 2012. — Т. 5, № 15 (134). — С. 188–193.
15. Савин И. Ю., Баргалева С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Хвостиков С. А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 3. — С. 275–285.

Поступила в редакцию 8 сентября 2014 г.