

УДК 528.88:631.9

## Using MODIS Data for Agricultural Areas Monitoring

**Aleksey Yu. Shukilovich<sup>a</sup>,  
Elena V. Fedotova<sup>\*a,b</sup> and Yurii A. Maglinets<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Siberian Federal University*

*79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

<sup>b</sup>*Sukachev Institute of Forest SB RAS*

*50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

Received 26.06.2016, received in revised form 21.08.2016, accepted 15.11.2016

---

*The possibilities of spectroradiometer MODIS data using for the solution of the agricultural monitoring problems are discussed. The analysis of the factors affecting the variability and heterogeneity of the spectral characteristics of agricultural areas is carried out. Trends of NDVI for agricultural fields of Sukhobuzimsky District of Krasnoyarsk region are analyzed.*

*Kyewords: prompt agricultural monitoring, MODIS sensor, remote sensing.*

---

Citation: Shukilovich A.Yu., Fedotova E.V., Maglinets Yu.A. Using MODIS data for agricultural areas monitoring, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(7), 1035-1044. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-1035-1044.

---

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: elfed@ksc.krasn.ru

## **Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения**

**А.Ю. Шукилович<sup>а</sup>,**

**Е.В. Федотова<sup>а,б</sup>, Ю.А. Маглинец<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

*<sup>б</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

---

*Рассмотрены возможности использования данных спектрорадиометра MODIS для решения задач оперативного агромониторинга. Проведен анализ факторов, влияющих на изменчивость и неоднородность спектральных характеристик сельскохозяйственных угодий. Проанализированы тренды вегетационного индекса NDVI для полей Сухобузимского района Красноярского края.*

*Ключевые слова: оперативный агромониторинг, сенсор MODIS, дистанционное зондирование.*

---

### **Введение**

Анализ динамики естественных объектов, содержащих растительные компоненты, давно и успешно проводится с применением данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Изменение растительного покрова приводит к изменению спектральных отражательных характеристик и связано как с естественными причинами, например, с изменением растительности в течение вегетационного периода, так и с другими причинами, нарушающими естественный процесс в результате болезней, воздействия вредителей, а также антропогенного вмешательства.

Одной из ключевых характеристик земель сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) как элемента подстилающей поверхности и специфического объекта растительного покрова является существенная динамика изменения отражательных свойств во времени. Причины изменения свойств можно разделить на три класса. Во-первых, это естественная изменчивость, вызванная погодными факторами, такими как температура воздуха и почвы, их влажность и др., приводящая к изменению состояния посевов. Во-вторых, фенологическая изменчивость в процессе развития растений, определяемая для каждого конкретного поля выращиваемой на нем титульной культурой. В-третьих, техногенное воздействие (проводимые агротехнические мероприятия). Указанные группы факторов находятся в сложной взаимосвязи. Так, очевидно, что первая группа факторов влияет как на смену фенологических стадий, так и на сроки проведения сельскохозяйственных работ. Кроме того, следует учитывать степень засоренности полей, которая сама по себе является фактором, изменяющим во времени качество почвенного покрова (которое в пределах одного полевого сезона можно принять за константу), характеристики мезорельефа и др. Более подробно указанные вопросы рассмотрены в [1].

Все динамически проявляющиеся факторы, связанные с ЗСХН, с позиций ведения аграрного производства могут рассматриваться либо как позитивные, либо как негативные. К не-

гитивным факторам, влияющим на неоднородность растительного покрова и, следовательно, изменение спектральных отражательных характеристик, следует отнести такие, как неравномерная всхожесть в пределах поля, засоренность, переувлажнение низинных участков и др., которые проявляются практически на каждом поле. Существующие и перспективные агротехнологии в ряде случаев дают возможность вносить коррективы, позволяющие преодолеть негативные факторы. Время для принятия некоторых, наиболее критичных по времени принятия, решений о проведении работ на поле составляет от трёх до семи дней, что выдвигает повышенные требования к оперативности доставки и обработки данных.

В наилучшей степени указанным выше требованиям к данным дистанционного зондирования удовлетворяют данные спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на борту спутников Terra и Aqua. Съёмочная система имеет 36 спектральных каналов в оптическом диапазоне спектра с разрешением от 250 до 1000 м, причём два спектральных канала в красной и ближней инфракрасной зонах с пространственным разрешением 250 м (<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/>). Широкая полоса обзора обеспечивает возможность наблюдения одной территории ежедневно. Специализированные продукты, содержащие характеристики отраженного излучения в видимой и ближней ИК-областях спектра, а также вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI (Enhanced Vegetation Index) формируются как ежедневно, так и раз в 8 и 16 дней (<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html>). Данные распространяются бесплатно для всех пользователей, например, с сайта <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Исследование сельскохозяйственных территорий с помощью данных прибора MODIS ведётся уже много лет. В интересах агропромышленного мониторинга для картирования ЗСХН, изучения динамики развития посевов и прогнозирования урожайности в подавляющем большинстве случаев используется NDVI. Составляются графики изменения этого вегетационного индекса в течение вегетационного периода для полей с различными культурами, исследуется форма кривой NDVI, строятся несколько параметров её формы, которые используются для классификации культур и оценки состояния [2–6]. Величина NDVI особенно тесно связана с индексом листовой поверхности и величиной надземной биомассы в начальные периоды вегетационного сезона, когда всходы только появляются на полях. Поэтому даты появления всходов (начало роста NDVI), скорость роста проективного покрытия посевов (крутизна подъёма кривой NDVI), дата достижения максимального значения величины NDVI и период стабильного значения NDVI выступают важными показателями, по которым возможно разделение культур. Например, для картирования полей на региональном уровне в США оценивается форма кривой NDVI за вегетационный период, которые рассчитываются по данным MOD09, а потом используются в иерархической классификации, последовательно отделяя несельскохозяйственные территории от сельскохозяйственных, затем разделяя агрогодья по основным типам культур, затем деля последние по основным летним культурам и далее разделяя поля на поливные и богарные [6]. В [7] описан опыт применения сезонного хода NDVI для разделения по форме кривой посевов маиса и сои, успешно работающий не только на локальном, но и на региональном уровне. Используются и другие алгоритмы анализа данных дистанционного зондирования для разделения культур, например, проведение анализа независимых компонент [8].

Во всех названных работах указывается необходимость наличия ежедневно поступающих данных и многолетних предварительных наблюдений этих параметров для повышения достоверности оценки состояния растительности. Однако в указанных работах в основном анализируются вопросы создания карт полей, классификации видов посевов. Тематика оперативного мониторинга проработана недостаточно, что определяет актуальность нашего исследования. Задачи исследования состояли в следующем:

- выбрать средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), при помощи которых будет осуществляться мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий;
- разработать метод обнаружения и оценки изменения однородности спектральных характеристик поля, соответствующих изменениям агроценоза в ходе вегетации, а также характеристик почвенного покрова.

При решении первой задачи был выдвинут ряд требований к источнику данных ДЗЗ:

- для мониторинга растительности спутниковая съемка должна проводиться в зонах спектра, позволяющих наилучшим образом отделять зеленую растительность от других типов подстилающей поверхности;
- пространственное разрешение должно позволять наблюдать отдельные с/х поля;
- необходима высокая периодичность съемки в силу быстрого развития с/х культур.

Немаловажным фактором выступает стоимость данных ДЗЗ.

Решение второй задачи более сложное, поскольку несколько факторов влияют одновременно на неоднородность измеренных сенсором MODIS характеристик: это и изменение объекта (поля), являющееся «полезной» частью сигнала, и шумы, связанные с функционированием прибора и изменениями условий съемки.

### **Исходные данные, постановка задачи**

В качестве тестовых данных для проведения исследований были выбраны сельскохозяйственные угодья Сухобузимского района Красноярского края. Основные культуры, используемые в севообороте района – яровые зерновые культуры (пшеница, ячмень, рожь, овес), многолетние и однолетние травы. Существенную часть занимают земли под паром. В работе использовался векторный слой контуров сельскохозяйственных угодий (порядка 1500 контуров) района (рис. 1). Для всех полей в атрибутивной таблице содержались сведения о произрастающей сельскохозяйственной культуре.

Работы по анализу данных MODIS для мониторинга состояния посевов проводили с использованием геоинформационных технологий; данные обрабатывали в ГИС ERDAS Imagine и ArcGIS.

Был проведен анализ данных спектрорадиометра MODIS, которые могли применяться для получения NDVI ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/\\_modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/_modis_products_table)). Во-первых, несколько продуктов MODIS непосредственно содержат значения NDVI, построенные по результатам измерения отражательных характеристик поверхности, подвергшихся предварительно атмосферной коррекции. Это продукты группы MOD13, различающиеся пространственным разрешением (от 250 до 5600 м) и временным интервалом интеграции данных (16-дневные композиты, месячные значения). Во-вторых, продукты группы MOD09, в которых содержатся данные двух первых каналов прибора – красного и ближнего инфра-



Рис. 1. Область исследования: 1 – левобережная часть Сухобузимского района

красного диапазонов спектра с пространственным разрешением от 250 до 5600 м, как ежедневные, так и с композицией данных за 8 дней. По этим данным возможно произвести вычисление NDVI, при этом необходимо учитывать высокую вероятность присутствия сцен с облачностью.

В данной работе использовался продукт MOD09Q1 как более соответствующий требованиям временных ограничений на данные ДЗ. Продукт является композитным, т. е. составленным на основе восьмидневной съемки, и содержит данные с атмосферной коррекцией в первом (видимом красном) и втором (ближнем ИК) каналах. Результаты ежедневных измерений более предпочтительны для решения задач в оперативном режиме, но большая вероятность наличия облачности над исследуемой территорией делает их часто бесполезными.

Далее задача была разделена на две подзадачи:

- 1) сравнить и выявить закономерности поведения различных культур на основе NDVI, отталкиваясь от статистики прошлых лет, накопленной на тестовом полигоне;
- 2) провести анализ, как на конкретном поле изменяется конкретная культура в течение вегетационного периода.

Анализ проведен по двум группам показателей:

- изменение спектральных характеристик отражения в целом на поле;
- изменение однородности поля, выражающееся в изменении не только абсолютных значений отражения, но и характеристик разброса – стандартного отклонения или коэффициента вариации.

### Методика работы

В работе использовали данные MOD09Q1, полученные в период с 17 мая по 30 сентября 2013 и 2014 гг. По данным этих двух каналов был рассчитан индекс NDVI.

Вегетационный индекс нормированной разности – Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – количественный показатель, статистически тесно связанный с количеством активной биомассы. Он умеренно чувствителен к изменениям почвенного и атмосферного фона, помимо случаев с разреженной растительностью. Алгоритм расчета встроено практически во все программные системы ГИС и ДЗЗ:

$$NDVI = \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right),$$

где  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{RED}$  – отражение в ближней инфракрасной и в красной области спектра.

Устойчивая корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем активно используется для регионального картирования и анализа различных типов ландшафтов, оценки ресурсов и площадей биосистем в масштабе стран и континентов. Однако чаще расчет NDVI применяют на основе серии разновременных (разносезонных) снимков с заданным временным разрешением, позволяя получать динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные вариации, сезонные вариации, годовые вариации).

Зависимость между представленными параметрами и NDVI, как правило, непрямо́я и связана с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками; кроме того, часто приходится учитывать временную разнесенность параметра и ответной реакции NDVI.

Индекс может принимать значения от минус 1 до 1. Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, обычно от 0.2 до 0.9. При появлении всходов (в течение вегетационного периода) росту биомассы растительности соответствует увеличение значений NDVI, а с наступлением периода созревания снижается содержание хлорофилла и, соответственно, значения NDVI. Снижение значений NDVI в период активной вегетации (до наступления фазы молочной спелости) свидетельствует о стрессовом состоянии посевов. Это может быть поражение посевов вследствие стихийных явлений (град, ливни, засуха, пожары), а также поражения вредителями, такими как хлебная полосатая блошка, ячменная шведская муха и др. Примером фактора, влияющего на снижение NDVI, может быть дефицит влажности почвы, а увеличения значений NDVI – засоренность паров, что свидетельствует о необходимости проведения агротехнических мероприятий по борьбе с сорняками [9]. NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать наиболее верные в долгосрочной перспективе решения, направленные на повышение урожайности. NDVI часто используется для мониторинга засухи, прогнозирования урожайности. На поведение фотосинтетической отражающей способности сельскохозяйственной культуры влияют также проводимые собственником сельскохозяйственных земель агротехнические работы: вспахивание и скашивание полей, сбор урожая и т.п.

Основным критерием распознавания сельскохозяйственных культур выступает характерное поведение временных рядов индекса NDVI для каждой сельскохозяйственной культуры,

связанное с разными темпами нарастания и убывания зеленой биомассы (фотосинтетической активности) в течение вегетационного периода. Параметрами выступают максимальное значение, углы наклона кривой на участках возрастания и уменьшения значений индекса, ширина участка стабильного состояния и др. [2-6, 8].

После получения продукта MOD09Q1 был проделан ряд предварительных операций:

- по каждому снимку рассчитан индекс NDVI;
- индексные изображения объединены в одно многослойное изображение, где каждый слой представляет NDVI за 16-дневный период;
- осуществлено перепроецирование изображения из синусоидальной проекции в универсальную поперечную проекцию Меркатора для улучшения совместимости представления данных с данными Landsat;
- выделен фрагмент, соответствующий территории земледельческой части Сухобузимского района (рис. 1).

Дальнейшая работа проводилась с данным фрагментом и векторной маской полей. Для каждой культуры были выбраны поля площадью более 200 га (табл. 1). Это сделано для того, чтобы можно было набрать некоторое количество пикселей данных NDVI, целиком лежащих внутри контура поля. Для анализа закономерности поведения различных культур использовались средние NDVI по каждому полю. Для выявления изменчивости растительного покрова поля в течение вегетационного периода учитывалось стандартное отклонение NDVI как показатель разброса значений относительно среднего значения.

В качестве инструмента использованы зональные статистики, а именно величины среднего (mean) и стандартного отклонения (standard deviation) NDVI; по этим двум характеристикам был рассчитан коэффициент вариации NDVI; в качестве зон выступали отдельные поля, в которых известна произрастающая на них культура.

Для оценки изменчивости структуры растительного покрова в пределах каждого поля были использованы текстурные характеристики данных. Текстурные показатели – это параметры, характеризующие пространственные закономерности изменения значений яркости изображений в пределах объекта. В частности, текстурными признаками можно описать и изменчивость объектов. Например, в начале вегетационного периода поле имеет однородную поверхность голой почвы. Во время появления всходов на части поля появляется растительность, а какая-то часть почвы остается без растительности; увеличивается значение NDVI, а также и коэффициент вариации значений NDVI, поскольку объект становится неоднородным по спектральным отражательным характеристикам.

Таблица 1. Количество полей, участвующих в анализе NDVI

Культура	Количество полей	
	2013	2014
Многолетие травы	11	10
Пшеница	8	8
Пары	9	11

В данной работе для анализа изменчивости объектов в течение вегетационного периода рассчитывался коэффициент вариации, когда величина стандартного отклонения делилась на среднее по данному полю в этот интервал времени.

Для анализа закономерности поведения различных культур использовали: 1) средние NDVI по каждому полю; 2) коэффициент вариации как показатель разброса значений относительно среднего значения.

Статистическая обработка данных проводилась с помощью операции «Зональная статистика» в ArcGIS и в программе Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

Анализ изменчивости NDVI был проведён не для всех сельскохозяйственных культур, выращиваемых в Сухобузимском районе, а только для трёх основных типов посевов: для полей, засеянных пшеницей, многолетними травами, а также для паров.

Графики на рис. 2 показывают, как изменялись NDVI и коэффициент вариации NDVI за вегетационный период для нескольких полей пшеницы, многолетних трав и пара в 2013-2014 г. Приведены интервалы стандартного отклонения для каждого графика средних значений.

Каждый график является усреднением значения NDVI и коэффициентов вариации для всех полей, для которых удалось определить средние значения и стандартные отклонения NDVI с помощью операции зональной статистики.

Анализ этих графиков позволяет сделать заключения, что, несмотря на большую вариабельность, имеются характерные для всех полей закономерности изменения NDVI и коэффициента вариации: со 2 июня начинается стабильный рост значений NDVI и уменьшение коэффициента вариации NDVI. Это соответствует процессу появления всходов и их роста, увеличению проективного покрытия растительности. После 20 августа NDVI уменьшается в связи с созреванием культур, коэффициент вариации увеличивается.

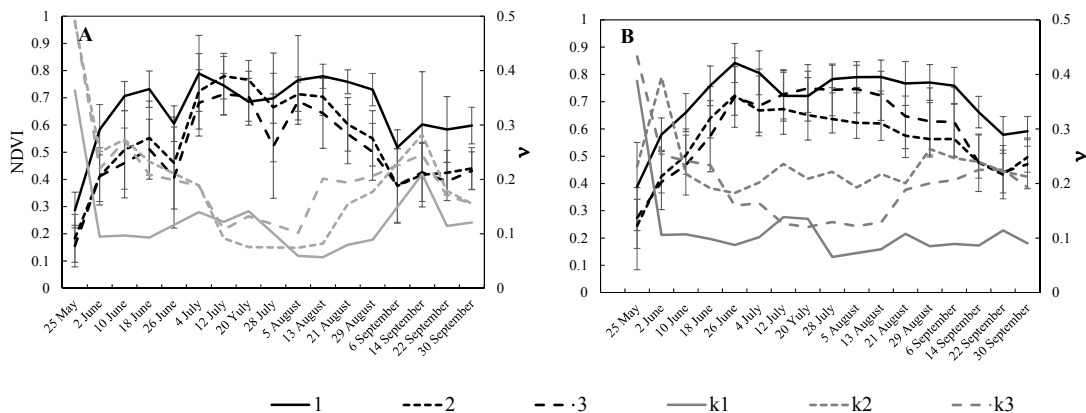


Рис. 2. NDVI и коэффициент вариации NDVI полей, занятых многолетними травами, пшеницей и парами в 2013 г. (А) и 2014 г. (В): 1, 2, 3 – NDVI многолетних трав, пшеницы и паров соответственно; k1, k2, k3 – коэффициенты вариации для многолетних трав, паров и пшеницы соответственно



Самые высокие значения NDVI в течение всего лета имеют многолетние травы, причём коэффициент вариации NDVI для таких полей самый низкий. Это объясняется тем, что многолетние травы имеют самый густой растительный покров, практически полностью закрывающий почву в течение всего сезона. Уменьшение значений вегетационного индекса в июле связано с проведением сенокоса, заготовкой трав.

Для полей пшеницы и паров поведение NDVI в течение вегетационных периодов 2013 и 2014 гг. различается. Наиболее «правильное» поведение вегетационного индекса наблюдается в 2014 г.: NDVI паров ниже, чем у пшеничных полей. В 2013 г. картина обратная. Это можно объяснить недостаточным количеством агромероприятий по поддержанию паров в чистом виде, что может быть связано с плохими погодными условиями. Однако и для 2013, и для 2014 г. значения NDVI получаются выше, чем можно было бы ожидать для открытых почв. При правильном поддержании таких полей растительный покров паров должен быть существенно ниже; полученный эффект требует дальнейшего исследования и уточнения.

Коэффициент вариации NDVI для многолетних трав самый низкий из рассматриваемых культур; это связано с однородностью растительного покрова, многоярусностью и густотой травяного покрытия. Коэффициенты вариации NDVI полей с паром и пшеницей в первой половине лета ведут себя сходным образом, а с конца июня – начала июля также отличаются для двух рассматриваемых сезонов. Для объяснения такого поведения требуется получение дополнительной оперативной синхронной информации о проведении агромероприятий и состоянии посевов на анализируемых полях.

### Заключение

В работе обоснован выбор источника данных ДЗЗ для решения задачи оценки состояния и изменчивости спектральных характеристик сельскохозяйственных угодий – продукт MOD09Q1 спектрорадиометра MODIS, содержащий данные красного и ближнего ИК-диапазонов, с помощью которых были вычислены вегетационные индексы NDVI для территории Сухобузимского района. Использование данных с пространственным разрешением 250 м ограничивает количество с/х полей, которые могут участвовать в анализе, из-за их небольшого размера. Учитывались поля площадью не менее 200 га.

Проведен анализ изменения NDVI за вегетационный период 2013 и 2014 гг. для полей Сухобузимского района. Можно согласиться с рядом авторов, что разделение культур по индексу NDVI не всегда возможно, следовательно, нужно вводить новые параметры; не всегда возможно разделение культур и по динамике NDVI за весь вегетационный период.

При анализе поведения коэффициента вариации NDVI можно предположить, как развивалась та или иная культура на определенном поле за весь вегетационный период. Для интерпретации этих данных требуются дополнительные сведения о проводимых на полях агромероприятиях. Этот параметр может быть использован для оценки неоднородности посевов.

Развитие работы предполагает включение дополнительных параметров для описания изменения NDVI за вегетационный период, привлечение дополнительных наземных полевых данных, анализ данных за несколько вегетационных периодов.

### Список литературы

- [1] Шатрова К.В., Маглинец Ю.А. Аникьева М.А., Герасимчук М.Г. Концептуальная модель предметной области оценивания земель сельскохозяйственного назначения на основе привлечения геопространственной информации. *Одиннадцатая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*, 2013,65 [Shatrova K.V., Maglinets Y.A., Anikeva M.A., Gerasimchuk M.G. Conceptual domain model assessment of agricultural land on the basis of attraction of geospatial information. *Eleventh Open All-Russian conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space»*, 2013, 65 (in Russian)]
- [2] Пугачева И. Ю., Шевырновов А. П. Изучение динамики NDVI посева сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и республики Хакасия. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2008, 5(2), 347351 [Pugacheva I.Y., Shevyrnogov A.P. Studying the dynamics of NDVI planting crops in the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Khakassia. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2008, 5(2) 347351 (in Russian)]
- [3] Платонов А., Акрамова И. Классификация растительно-земельного покрова с использованием продуктов NDVI спутниковых снимков MODIS. *Материалы республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы водного хозяйства и мелиорации орошаемых земель»*, 2011, 4347 [Platonov A., Akramova I. Classification of vegetable-land cover using satellite images MODIS NDVI products. *Materials of republican scientific-practical conference «Actual problems of water management and land reclamation of irrigated land»*, 2011, 4347 (in Russian)]
- [4] Барталев С.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011, 4(8), 285302 [Bartalev S.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E. and others. Satellite mapping of vegetation cover of Russia according to the MODIS spectroradiometer. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011, 4(8), 285302 (in Russian)]
- [5] Islam A.S., Sujit K. Bala. Assessment of potato phenological characteristics using MODIS derived NDVI and LAI Information. *Giscience & remote sensing*, 2008, 45(4), 443-453. DOI: 10.2747/1548-1603.45.4.454
- [6] Wardlow B.D., Egbert S.L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112, 1096–1116
- [7] Sakamoto T., Wardlow B.D., Gitelson A.A., Verma S.B., Suyker A.E., Arkebauer T.J. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114, 2146–2159
- [8] Ozdogan M. The spatial distribution of crop types from MODIS data: Temporal unmixing using Independent Component Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114, 1190–1204
- [9] Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ. *Геоматика*, 2009, 3, URL: [http://geomatika.ru/pdf/2009\\_04/2009\\_04\\_008.pdf](http://geomatika.ru/pdf/2009_04/2009_04_008.pdf) [Antonov V.N., Sladkikh L.A. Crop conditions monitoring and yield forecasting of spring wheat using remote sensing data. *Geomatics*, 2009, 3, URL: [http://geomatika.ru/pdf/2009\\_04/2009\\_04\\_008.pdf](http://geomatika.ru/pdf/2009_04/2009_04_008.pdf) (in Russian)]