

Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS*

П. В. ВОРОНИНА^{1,2}, Е. А. МАМАШ¹

¹*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Россия*

e-mail: voronina@ict.nsc.ru, elenamamash@gmail.com

Воронина П.В., Мамаш Е.А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 76–102.

На основе анализа отечественных и иностранных публикаций 2003–2013 гг. рассматриваются данные спектрорадиометра MODIS на предмет их применения в научных исследованиях для решения тематических задач сельского хозяйства. Работа состоит из трёх частей: обзора тематических задач мониторинга сельского хозяйства, обзора математических задач, используемых для получения знаний по тематическим задачам, и обзора спутниковых данных MODIS, необходимых для исследований тематических проблем. На основе проведённого анализа сформирован классификатор тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, MODIS, вегетационные индексы.

Voronina P.V., Mamash E.A. Classification of thematic monitoring for agriculture problems using remote sensing MODIS data // Computational Technologies. 2014. Vol. 19, No. 3. P. 76–102.

We review scientific publications related to MODIS remote sensing data applied to solution of problems of agricultural lands monitoring, forecasting, and control of crop yields as well for the control of agro-climatic conditions for agricultural production.

The work consists of three parts: review of thematic tasks of agriculture monitoring, review of mathematical problems which were used to gain knowledge on thematic objectives, and review of MODIS remote sensing data needed for the thematic research problems. The publication is divided into the following subjects: soil properties; seasonal changes in vegetation cover; area and agricultural area; the forecast yield, agro-climatic conditions. This structure is maintained in the entire article.

The capabilities of modern technologies on extraction of main information from the remote sensing data were discussed. It is anticipated that the MODIS remote sensing data should be widely used in the researching of land resources, especially agricultural land, various environment parameters for forecasting, along with the information support

*Работа выполнена при поддержке Президентской программы “Ведущие научные школы РФ” (грант № НШ-5006.2014.9), Программы базовых фундаментальных исследований СО РАН (проект № IV.38.2.1) и РФФИ (грант № 12-07-00545).

when solving various tasks in the field of agricultural production. The results of the analysis and generalization of numerous studies were summarized and grouped in the classifier of thematic research problems of agriculture, properties and genesis of soils, and the anthropogenic impacts on non-forestry vegetation.

Keywords: remote sensing data, MODIS, vegetation indexes.

Введение

В настоящее время данные дистанционного спутникового зондирования Земли представляют собой практически безальтернативный источник получения объективной и оперативной информации о состоянии растительного покрова на больших территориях. Они активно используются при изучении и контроле состояния сельскохозяйственных угодий, природных и техногенных объектов, организации рационального использования земель, прогнозе урожайности сельскохозяйственных культур, проведении различных агроклиматических мероприятий. Это является стимулом для многочисленных исследований, разработки методов и создания систем мониторинга сельскохозяйственных земель, основанных на использовании спутниковых данных.

Посевные площади с течением времени в силу природных, экономических и политических причин претерпевают значительные сокращения, меняют свою структуру. Регулирование агропромышленного комплекса на различных уровнях требует наличия объективной и регулярно обновляемой информации о характеристиках сельскохозяйственного производства. На сегодня информация, получаемая только от наземных источников, не может быть признана полностью объективной и отвечающей современным требованиям. Кроме того, в связи с нарастающим вниманием к вопросам глобального потепления, достоверные данные о динамике площадей и режимах землепользования являются важной составляющей информационного обеспечения исследований по моделированию циклов биогеохимических элементов и прежде всего цикла углерода.

Материалы аэросъёмки используются для локального сельскохозяйственного мониторинга уже более 70 лет. С 60-х годов прошлого столетия наблюдения Земли стали проводиться с помощью космических спутниковых систем. Сначала это были метеорологические искусственные спутники Земли, но полученные данные применялись не только для решения метеорологических задач, но и при изучении природных ресурсов Земли. Сейчас системы космического сельскохозяйственного мониторинга организованы практически во всех развитых странах мира.

В 1999 г. на орбиту Земли при поддержке исследовательской программы Earth Observing System (EOS)/NASA был выведен искусственный спутник Terra, одним из приборов которого является радиометр MODerate Imaging Spectroradiometer (MODIS). Съёмка изображений ведётся в 36 спектральных каналах в диапазоне от 0.4 до 14 мкм. Для снимков Terra/MODIS характерны узкие спектральные каналы в диапазоне 0.405–14.385 мкм, что позволяет получать различные характеристики растительности, в том числе индекс листовой поверхности, индекс синтетически активной радиации, поглощаемой растительностью, характеристику первичной продуктивности и др. Использование данных спутников высокого пространственного разрешения, например IKONOS или QuickBird, довольно затруднительно в силу коммерческих запусков этих спутниковых платформ. Кроме того, снимки MODIS характеризуются высокоточной радиометрической калибровкой (лучше 5%), к ним применяется атмосферная коррекция.

В настоящей работе анализируются данные спектрорадиометра MODIS для решения тематических задач сельского хозяйства. Представленные материалы по тематике разделены на следующие группы: свойства почв, сезонные изменения растительного покрова, площади и состояние сельскохозяйственных угодий, прогноз урожайности, агроклиматические условия.

Под *тематической* будем понимать задачу, решаемую специалистом-исследователем в рамках фундаментальных и прикладных работ, направленных на изучение различных аспектов природной среды, антропогенных воздействий на окружающий мир, в нашем случае — сельскохозяйственной деятельности человека. *Математическая задача* — записанная с привлечением математического аппарата и методов математического моделирования тематическая задача.

На основании составленного аналитического обзора сформирован классификатор тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS.

1. Обзор тематических задач

1.1. Свойства почв

К задачам по изучению свойств почв авторами отнесены следующие: определение органического состава почв, оценка содержания гумуса и влажности почв, определение температуры и засоление почв, оценка деградации почв.

В [1–5] проведено исследование органического состава и содержания органического углерода в почвах Северного Казахстана. Помимо спутниковых данных в работах используется дополнительная информация, а именно, топографические особенности (высоты, средние кривизны, составной топографический индекс, склоны) и состояние растительности. Проведён также прогноз содержания углерода в почве [1, 6]. Оценка выщелачивания нитратов на сельскохозяйственных территориях Северо-Китайской равнины дана в [4]. Здесь же проведена оценка риска нитратного загрязнения подземных вод.

Прямое измерение влагозапаса почвы выполняется на ограниченном количестве метеорологических станций, что не позволяет корректно моделировать поле влажности в региональном масштабе. Вместе с тем для продуктивного выращивания сельскохозяйственных культур влажность почвы является важнейшим оперативным показателем [7–16]. Дистанционные методы измерения влажности почвы в нашей стране пока не получили должного распространения. Например, в [15] изложены результаты моделирования поля влажности почвы и сопутствующих показателей (индикаторов) в степной зоне Краснодарского края и дана оценка вклада этих показателей в формирование влажности почвы. Перспективы использования данных дистанционного зондирования для определения влагозапаса почвы очевидны, что и показывают цитированные работы, большинство из которых выполнены исследователями Китая [9–11, 13]. Результаты расчётов влажности почвы на территории Внутренней Монголии представлены в [14], для полузасушливых и неорошаемых районов сельскохозяйственных лессовых плато Китая — в [10], шт. Айова (США) — в [7].

Используя спутниковые данные, можно проводить прогноз ранних заморозков, что является актуальным при возделывании озимых культур. Для мониторинга ранних заморозков на территориях с озимой пшеницей (Китай) выполнен сравнительный анализ угрозы заморозков [17].

В работе [18] дана оценка динамики опустынивания и деградации почвенного покрова низменного Дагестана. Выделены подрайоны со слабой, средней и сильной деградацией почвенного покрова, с очаговым, нарастающим и площадным опустыниванием. Составлены разновременные картосхемы деградации и опустынивания почвенного покрова. Прослежены изменения комплекса природно-антропогенных условий, на фоне которых происходят деградация и опустынивание почвенного покрова.

Принципы анализа и районирования брошенных земель (залежей) на территориях с нестабильной структурой сельскохозяйственного землепользования Северного Казахстана развиты в [19]. Проведено пилотное районирование залежных земель Костанайской области Казахстана, даны рекомендации по их оптимальному использованию.

1.2. Сезонные изменения и классификация растительного покрова

Площади возделываемых сельскохозяйственных культур и состояние сельскохозяйственных посевов меняются под воздействием различных факторов как природного, так и социально-экономического характера. Спутниковые данные позволяют проводить мониторинг сельскохозяйственных земель регулярно и наиболее объективно, что подтверждается серией работ отечественных исследователей [20–24], посвящённых задаче распознавания видового состава культур, картографированию наземной растительности, развитию методологии картирования орошаемых земель. Результаты эксперимента по изучению сезонных изменений северной растительности в центре Кольского полуострова за вегетационный период 2000 года изложены в [25].

Результаты проведённой классификации некоторых типов посевов на основе спутниковых данных и априорных знаний о закономерностях динамики сезонного развития сельскохозяйственных растений в отдельных коллективных хозяйствах Ростовской области представлены в [26].

В работах [27–29] проанализированы вегетационные индексы разных видов сельскохозяйственных посевов и угодий юга Красноярского края и Республики Хакасия в течение вегетационного периода 2006 г., создана электронная база скорректированных коэффициентов спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур. Все это позволяет проводить классификацию сельскохозяйственных растений данных территорий.

На основе анализа нормализованного вегетационного индекса в работе [22] идентифицированы виды растительности в Пермском крае: пар, картофель, посадки многолетних трав и зерновых культур; оценены условия вегетации сельскохозяйственных культур, очаги угнетения растительности и масштаб наступления неблагоприятных явлений, сделан прогноз урожайности основных культур.

В [30] показано многообразие фенофаз развития зерновых культур в различных агроклиматических зонах юга Западной Сибири, представлена оценка валовых сборов основных зерновых культур на региональном уровне.

Результаты проведённой классификации сельскохозяйственных культур Северного Китая изложены в [31]. Итоги мониторинга фенологических процессов озимой пшеницы на территории Северного Китая со сравнением оценок с данными наземных наблюдений по ключевым датам и выявлением широтных трендов в пространственном распределении посевов озимой пшеницы представлены в работе [32].

1.3. Площади и состояние сельскохозяйственных угодий

Актуальность задачи выявления и оценки используемых пахотных земель обусловлена значительными изменениями структуры и площадей пахотных земель в силу различных причин климатического и экономического характера. Результаты инвентаризации сельскохозяйственных земель и пастбищ в мировом масштабе изложены в [21]. Показано, что в мире имеется 15 млн кв. км (12 % от суши, свободной ото льда) сельскохозяйственных угодий и 28 млн кв. км (соответственно 22 %) пастбищ (на 2000 г. с вероятностью 90 %).

В работе [33] проведена инвентаризация структуры землепользования и посевных площадей, сделана оценка состояния фитоценозов и прогноз их биологической продуктивности, дана оценка возможностей использования методов дистанционного зондирования Земли при принятии решений по продуктивности земельного фонда юга Российской Федерации.

В [34] по вычисленным признакам распознавания, учитывающим особенности сезонной и межгодовой динамики спектрально-отражательных характеристик используемых пахотных земель, отличающих их от других категорий сельскохозяйственных угодий и естественной растительности, проведены выявление пахотных земель территории РФ и валидация полученной карты.

Выявление пахотных земель в основных сельскохозяйственных регионах страны, в частности, в Ростовской области, Краснодарском крае и Ленинск-Кузнецком районе Кемеровской области проведено в [20, 35, 36, 37]. Оценка посевных площадей озимых сельскохозяйственных культур для районов с насыщенной структурой сельскохозяйственных угодий, в частности, для Ростовской области получена в [38].

В работе [39] предпринята попытка разработки методики составления крупномасштабной карты использования земель Курской области. Методический подход, на основе которого можно определять площади посевов риса в Республике Калмыкия и в других рисосеящих регионах России, представлен в [40]. Система агромониторинга, созданная в Украине для пользователей уровня министерства и отдельных фермерских хозяйств, предложена в [23].

В [41] представлена оценка агротехнического уровня возделывания культуры в Акмолинской и Костанайской областях. Для этих областей Северного Казахстана получены количественные оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур. Оценка площадей посевов Западно-Казахстанской области дана в [42–44]. Опыт проведения космического мониторинга основных зерносеющих регионов Казахстана по заказу Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан представлен в [2, 45–49]. В работе [50] рассмотрены возможности использования спутниковой информации для контроля над уборочной кампанией яровых зерновых культур в Северном Казахстане.

Методология мониторинга сельскохозяйственных земель Китая рассматривается в [51]. В работе [52] проведена оценка посевных площадей в двух графствах Австралии.

1.4. Прогноз урожайности. Агроклиматические условия

Оценка агроклиматических условий возделывания зерновых и растительных культур, агроландшафтное районирование и влияние этих факторов на урожайность различных растений с помощью данных дистанционного зондирования позволяют оптимизировать технологии выращивания, уборки сельскохозяйственных культур, рационального проведения сезонных мероприятий.

В работе [53] представлены результаты использования данных дистанционного зондирования в действующей динамической модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы в Краснодарском крае. В [54–56] предложена технология прогноза урожайности яровых зерновых культур на территории Западной Сибири, позволяющая определять сроки биологического созревания основных яровых зерновых культур и оптимальные сроки начала уборки. Прогноз урожайности выдается за месяц до начала уборки с точностью до 1–2 ц/га. В [57, 58] рассмотрена система прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур по основным сельскохозяйственным регионам России. Работа [59] посвящена решению одной из актуальных задач для Ставропольского края — выделению в севообороте посевных площадей подсолнечника и оценке состояния посевов в предуборочной стадии.

В [60] предложена технология получения прогноза урожайности основных видов сельскохозяйственных культур в автоматизированном режиме.

Для зерновых полей Северного Казахстана установлена взаимосвязь между вегетационным индексом в период максимума зелёной биомассы и наземными плотностью продуктивных стеблей, размером колоса и его озернёностью в сезоне 2007 г. [61]. Показано, что выраженная связь имелаась только с плотностью продуктивных стеблей. В [62] проанализировано влияние незерновых культур на спутниковый прогноз производства зерна в зонах монокультурного выращивания яровой пшеницы в Северном Казахстане. В сезоне 2007 г. определены средние различия вегетационного индекса между пшеницей и незерновыми культурами и оценен масштаб искажений на прогнозную урожайность.

В работе [63] представлены основные положения разработанного подхода к оценке степени засорённости сельскохозяйственных угодий Казахстана. Этот подход применялся, например, в 2002 и 2003 гг. для прогноза валового сбора зерна.

В [64] проведена оценка продуктивности сельскохозяйственных угодий Северо-Китайской равнины. В [65] изучены возможности распознавания трёх сортов бразильской сои и получения прогноза урожайности бобов. Зависимость урожайности риса на территории Китая от различных измеряемых на основе вегетационных индексов параметров исследована в [66, 67]. На примере США в работе [68] предложена новая методология картирования орошаемых земель.

Агроландшафтное районирование как оптимизация технологии выращивания зерновых культур путём учёта ландшафтных особенностей территорий (зимнего снегонакопления, весеннего снеготаяния, интенсивности проявлений ветровой и водной эрозии и др.) представлено в работах [69, 70]. Рассмотрены территории степной зоны Северного Казахстана и европейской части России.

2. Обзор математических задач

Характерным признаком растительности и её состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями при разных длинах волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с её отражательными способностями позволяют использовать космические снимки для идентификации как типов растительности, так и их состояния.

Вегетационный индекс — показатель, рассчитываемый в результате математических операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных дистанционного зондирования и имеющий отношение к параметрам растительности в рассматриваемом пикселе снимка. Основное предположение относительно использования вегетационного

индекса состоит в том, что некоторые математические операции с разными каналами данных дистанционного зондирования могут дать полезную информацию о растительности. Это подтверждается большим числом эмпирических данных. Суть второго предположения в том, что открытая почва на снимке будет формировать в спектральном пространстве прямую линию (так называемую почвенную линию). Почти все распространённые вегетационные индексы используют только соотношение красного и ближнего инфракрасного каналов, предполагая, что в ближней инфракрасной области находится линия открытой почвы. Подразумевается, что эта линия означает нулевое количество растительности.

В настоящее время существуют около 160 вариантов вегетационных индексов. Некоторые из них представлены в приложении 1. Расчёт большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0.62–0.75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, на ближнюю инфракрасную зону (0.75–1.3 мкм) — максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Иначе говоря, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведёт к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет отделять растительность от прочих природных объектов.

Основу математических задач сельскохозяйственного мониторинга составляет определение и анализ одного или нескольких вегетационных индексов, что даёт возможность получать достоверную информацию о состоянии сельскохозяйственных угодий и находящихся на них сельскохозяйственных культурах. Использование результатов расчёта индексов в рамках мониторинговых задач позволяет оценивать динамику изменения состояния культур, темпы их роста и периоды вегетации, определять потери в случае наблюдающихся стихийных природных явлений.

2.1. Свойства почв

Почвы, как, например, в [6], характеризуются на основании понятия почвенной линии, математический вид которой определён для пахотных земель Северного Казахстана. Получена оценка содержания гумуса на поверхности (1–3 см) почв, которая базируется на величине отношения красного и ближнего инфракрасного каналов.

Оценку выщелачивания нитратов на сельскохозяйственных землях можно получить, используя вегетационный индекс NDVI, содержание хлорофилла и статистические данные (осадки по наземным наблюдениям) [4].

Содержание влаги в почве определяется с помощью одного из вегетационных индексов NDVI, EVI, SAVI или их комбинаций [8, 10], NDVI, CSMI, SWCI [11, 13], LAI и температуры подстилающей поверхности (ПП) [7, 9]. По значениям температуры ПП и индекса NDVI, используя метод треугольник (или трапеции), восстанавливается пространственное содержание влаги в почве [12] и вычисляется температурный вегетационный индекс засухливости TVDI [14].

В работе [15] помимо моделирования поля влажности почвы и сопутствующих индикаторов (показателей) на основании спутниковых данных решалась задача оценки вклада этих показателей в формирование влажности почвы статистическими способами. Статистическая обработка включала исследование зависимостей между влаж-

ностью почвы и альбедо ПП, температурой ПП, индекса NDVI, включая анализ корреляционных матриц, построение уравнений регрессии для расчёта влажности почвы. Матрицы коэффициентов корреляции, позволяющие оценить взаимосвязь между переменными, построены за 15 выбранных сроков наблюдений. Примеры матриц относятся к срокам, наиболее важным для произрастания озимой пшеницы. Применялся коэффициент корреляции Пирсона. Показано существование сезонного изменения корреляции между разными переменными, обусловленного независимым характером их годового хода. Доказана статистическая значимость выбранных переменных, выступающих индикаторами состояния влажности почвы.

Районирование брошенных земель и территорий с нестабильной структурой сельскохозяйственного землепользования проводится с помощью вегетационного индекса WdVI [19].

Задача динамики опустынивания и деградации почвенного покрова решалась в [18] методами нейросетевого дешифрирования на базе алгоритмов GTM в программах Scanex Image Processor v.3.6 и с помощью анализа материалов фенологических аспектов растительного покрова.

2.2. Сезонные изменения и классификация растительного покрова

В работе [26] предложен алгоритм использования данных MODIS для классификации сельскохозяйственных земель и посевов различных типов культур. Это автоматический алгоритм построения временных серий композитных спутниковых изображений с улучшенными для анализа динамики растительности свойствами. Изображения включают в себя только пиксели, свободные от влияния облачности и снежного покрова земной поверхности, и исключают пиксели с относительно низким пространственным разрешением, вызванным большими значениями углов визирования. Классификация различных типов сельскохозяйственных культур выполнена на основе динамики перпендикулярного вегетационного индекса PVI, который обладает свойствами независимости от спектральных свойств почвенного покрова при высокой чувствительности к изменениям объёма зелёной биомассы растительности.

Классификация сельскохозяйственных культур проводится на основе вегетационного индекса NDVI [27–29], индексов NDVI и LAI [30], EVI [32], EVI и альбедо ПП [31].

2.3. Площади и состояние сельскохозяйственных угодий

В [34] разработан метод классификации пахотных земель, предполагающий вычисление по спутниковым данным набора признаков распознавания, учитывающих особенности сезонной и межгодовой динамики спектрально-отражательных характеристик используемых пахотных земель, отличающих их от других категорий сельскохозяйственных угодий и естественной растительности. Выявление пахотных земель выполняется с использованием алгоритма локально-адаптивной обучаемой классификации. С помощью указанного метода создана карта пахотных земель для всей территории РФ. Валидация полученной карты, выполненная на основе оптимума Парето с применением опорных данных для тестового региона, позволила оценить точность метода и возможности его дальнейшего улучшения.

На основе временных рядов измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности исследована [71] возможность распознавания сельскохозяйственных культур. Выполнен сравнительный анализ делимости культур на основе их фазовых портретов в двумерном пространстве в красном и ближнем ИК-диапазонах длин волн и с использованием временных рядов перпендикулярного вегетационного индекса. Получены оценки вероятности правильного распознавания агрокультур в зависимости от продолжительности регулярных спутниковых наблюдений с начала вегетационного сезона.

В работе [41] использовались сезонные максимумы вегетационного индекса NDVI периода 2000–2009 гг. для оценки агротехнического уровня возделывания яровых культур. Эмпирические зависимости между величинами NDVI и реальной урожайностью вида $PROD = KNDVI$ для районов Акмолинской и Костанайской областей Северного Казахстана были видоизменены путём замены коэффициента K на линейную временную функцию $K = (1 + K_1T)K_0$. При этом K_0 отражает базовое отношение между величинами вегетационного индекса и урожайностью зерновых культур, K_1 описывает влияние годового изменения агротехнического уровня возделывания зерновой культуры начиная с опорного года (скорость изменений за год), T — число лет, разделяющее опорный и анализируемый годы. Для территорий Акмолинской и Костанайской областей Северного Казахстана были получены количественные оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур.

В [45–48] предложена оценка спектральных характеристик обследованных полей, позволяющая получить количественную характеристику объёмов зерновых посевов. С помощью различных вегетационных индексов (NIR, NIR/RED, NDVI, WdVI, SAVI, GEMI) построены маски зерновых и паровых полей. Наиболее эффективным оказался анализ значений ближнего инфракрасного канала (NIR) (в рамках одного безоблачного снимка) или (в более сложных случаях) индекса SAVI.

В работах [20, 35, 36] представлен метод автоматизированного детектирования используемых пахотных земель (локально-адаптивный метод классификации), основанный на анализе многолетних временных рядов данных спутниковых наблюдений с учётом априорных знаний о различиях в закономерностях сезонного развития сельскохозяйственной и естественной растительности и значений перпендикулярного вегетационного индекса PVI, инвариантного по отношению к отражательным свойствам почвенного покрова и обладающего высокой чувствительностью к изменениям объёма зелёной биомассы растительности.

На основе анализа вегетационного индекса NDVI и климатических данных в [51] предложена технология представления данных о сельскохозяйственных культурах, в частности о рисе. С помощью другого вегетационного индекса — EVI и неконтролируемого алгоритма классификации k -средних в [52] проведена оценка посевных площадей.

Особенности пакетной технологии обработки данных разного пространственного разрешения для оценки состояния сельскохозяйственных культур от одного отдельного поля до нескольких полей административного района показаны в [33]. Используются процедуры географической привязки исходных изображений к слоям землеустройства, а также классификации данных дистанционного зондирования с учётом севооборота соответствующих культур для исследуемого региона. Программное средство ENVi адаптировано для создания на основе индекса NDVI векторных массивов, описывающих границы элементов биосистем. Это объекты с особой растительностью, например, лес и рядом расположенная степная растительность, водные и водохозяйственные объекты

или объекты антропогенного характера — дороги, каналы, поля, населенные пункты. Для создания таких массивов используются усовершенствованные алгоритмы обработки данных дистанционного зондирования Земли.

В работе [38] предложена методика снижения погрешности оценки посевных площадей озимых сельскохозяйственных культур для районов с насыщенной структурой сельскохозяйственных угодий. Применяется программный комплекс ENVI (процедуры геопривязки, классификации, вычисления площадей по классам). Коэффициенты спектральной яркости выделенной области использованы в [50] для контроля над уборочной кампанией яровых зерновых культур в Северном Казахстане.

2.4. Прогноз урожайности. Агроклиматические условия

Для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур применяется вегетационный индекс NDVI (например, в [53] для отражения сезонного хода фотосинтеза). Использование модифицированной модели биопродуктивности EPIC с коррекцией листового индекса LAI [54–56] позволяет получать прогноз сроков биологического созревания основных яровых культур и оптимальные сроки начала уборки.

В [57, 58] рассмотрены три основные группы методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур: на основе установления года-аналога по динамике вегетационного индекса; на основе построения регрессионных зависимостей между характеристиками, получаемыми по спутниковым и различным статистическим данным; на основе имитационного моделирования развития посевов. Мониторинг сельскохозяйственных земель проводится путём анализа временных серий индекса NDVI.

Для прогноза продуктивности зерновых культур применяются различные вегетационные индексы, например WdVI [61, 62]. Комбинированный анализ NDVI и NDWI проведён в работе [64], в [65] к этим индексам добавлен листовой индекс LAI; индексы NDVI, EVI, LSWI и данные наземных наблюдений использованы в [66], индекс NDVI и индекс засухливости — в [68], а вегетационные индексы и отражательная способность поверхности — в [70].

В [60] предложена информационная технология построения модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе индукционного подхода. В качестве модели выбрана регрессионная модель первого порядка, в качестве предиктора — 16-дневный композит индекса NDVI за фиксированный период, соответствующий максимальному значению NDVI, вычисленный по маске соответствующей культуры. Показано, что точность регрессионной модели прогнозирования на основе данных по области в целом несколько выше точности прогноза, построенного путём усреднения прогнозных значений по отдельным районам. Выделены четыре кластера озимых культур, проведена кластеризация выделенной территории, получена корреляция урожайности и средних значений NDVI, урожайности и усреднённых по маске NDVI. Для модели распространения и интенсивности засух в работе [69] использован индекс климатических экстремумов увлажнения SCEI.

На примере Ростовской области в [72, 73] проведён совместный анализ спутниковых данных и гидрометеорологических наблюдений о состоянии снежного покрова как определяющего фактора в оценке условий зимовки зерновых сельскохозяйственных культур для получения интегральных оценок условий зимовки озимых пшеницы и ячменя.

3. Обзор спутниковых данных

Рассмотрим сначала использование данных MODIS спутников Terra/Aqua в тематических сельскохозяйственных задачах. Во всех тематических областях упоминаются данные MODIS каналов 1 (620–670 нм) и 2 (841–876 нм) с разрешением 250 м. В некоторых исследованиях по свойствам почв применяются также данные каналов 5 (1230–1250 нм), 6 (1628–1652 нм), 7 (2105–2155 нм) с разрешением 500 м и 31 (10780–11280 нм), 32 (11770–12270 нм) с разрешением 1000 м; по идентификации и картографированию наземной растительности — каналов 3 (459–479 нм), 5 и 6 с разрешением 500 м; по прогнозу урожайности и агроклиматическим условиям — каналов 3 и 6.

Основными используемыми продуктами MODIS являются MOD02, MOD09 и MOD13 для всех тематических задач. В решении задач по изучению свойств почв, прогнозу урожайности и агроклиматическим условиям применяются также MOD11, MOD34 и MOD43. Кроме того, для решения указанных задач во многих работах упоминаются продукты MODMGGAD — информация о положении спутника и Солнца, и MOD09GST — служебная информация. В задачах по прогнозу урожайности и агроклиматическим условиям по стандартным продуктам в некоторых работах строились 8- и 16-дневные композиты вегетационных индексов и коэффициентов спектральной яркости ПП. Нередко создаются 4- и 8-дневные композиты коэффициентов спектральной яркости, 16-дневные композиты вегетационного индекса NDVI и в задачах оценки состояния сельскохозяйственных земель. Стандартные продукты MODIS могут также объединяться в базу данных, например, содержащую стандартные продукты MOD09 за период 2000–2010 гг. Набор данных включает измерения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном (620–670 нм) и ближнем (841–876 нм) ИК-каналах с пространственным разрешением 250 м. MOD09 содержат также измерения КСЯ в каналах голубого (459–479 нм) и среднего (1628–1652 нм) ИК-диапазонов с пространственным разрешением 500 м.

Отметим факт использования алгоритмов, реализованных в стандартных продуктах MOD13, MOD15 для решения задач по оценке сезонных изменений растительности. В ряде работ данные MODIS применяются в сочетании с данными других спутниковых систем — IRS LISS (каналы 2: 620–680 нм, 3: 770–860 нм) с разрешением 23 м и Landsat TM, ETM+ с разрешением 30 м. Для решения задач по оценке свойств почв привлекаются данные спутников AMSR-E, ANSR, ASTER, состояния сельскохозяйственных угодий — МетеорЗМ, Ресурс-О1, AVHRR, SPOT Vegetation, по прогнозу урожайности и агроклиматическим условиям — Spot-Vegetation, Hyperion, ERS-1, ERS-2.

Подводя предварительный итог, отметим, что в большинстве исследований данные MODIS используются в сочетании с данными других спутниковых систем (Spot, Landsat, AVHRR, IRS LISS, Spot-Vegetation) или результатами обработки наземных наблюдений, т. е. дополняются информацией с более высоким пространственным разрешением. В работах, ориентированных для сельского хозяйства, часто формируются композиты данных вегетационных индексов и коэффициентов спектральной яркости ПП.

4. Классификатор тематических задач мониторинга сельского хозяйства по данным MODIS

В работах [74–78] приведены классификаторы тематических задач лесного и сельского хозяйств, рационального природопользования, оперативных задач чрезвычайного

характера. Цель этих классификаторов — облегчить процесс выбора данных, помочь пользователю составить комплексное представление о возможностях, ограничениях и достоинствах методов дистанционного зондирования и различных типов данных космической съёмки.

Предлагаемый в настоящей работе классификатор тематических научно-исследовательских задач мониторинга сельского хозяйства по данным MODIS (см. таблицу) сформирован по результатам анализа публикаций, представляющих результаты исследований, касающихся решения тематических задач сельскохозяйственного направления, мониторинга сельского хозяйства, с привлечением данных дистанционного зондирования спектрорадиометра MODIS. Подчеркнём, что данные MODIS являются основными при рассмотрении и классификации той или иной задачи, данные же других спутниковых систем выступают как дополнительные к данным дистанционного зондирования MODIS.

В классификаторе тематические задачи объединяются по темам, которые в свою очередь составляют разделы, а последние — области задач (растительный мир, почвы, антропогенные объекты). Каждая тема разделена на задачи, которым далее поставлены в соответствие тематические задачи, выделенные по соответствующим публикациям. В двух последних столбцах таблицы указаны данные MODIS и других спутников, использованные исследователями в своих работах.

Заключение

Современные данные дистанционного зондирования Земли, получаемые при помощи съёмочной аппаратуры, установленной на различных космических аппаратах, и в частности, данные спутников Terra/Aqua обладают техническими характеристиками, позволяющими решать целый комплекс задач в области сельскохозяйственного производства — от картографирования границ полей до анализа степени используемости земель и состояния сельскохозяйственных культур на больших площадях. Это возможно благодаря широкому пространственному охвату материалов космической съёмки, наличию спектральных каналов в диапазонах, соответствующих спектральным характеристикам растительного покрова. Использование разновременных данных позволяет также отследить динамику изменений растительного покрова и проведения агротехнических работ, выявить площади, пострадавшие в результате стихийных природных явлений, а также решить многие другие задачи.

Эффективность использования разновременных спутниковых данных для распознавания сельскохозяйственных культур обусловлена различиями сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик, связанными с изменениями биофизических, морфологических, структурных и других характеристик посевов вследствие видовых особенностей фенологического развития, метеорологических и почвенных условий, применяемой агротехники.

В случае решения задачи на уровне одного поля необходимо привлекать данные спутников более высокого разрешения.

В приложении 2 дано описание некоторых продуктов MODIS, упоминаемых по тексту работы.

Классификатор тематических научно-исследовательских задач сельского хозяйства, решаемых с использованием данных дистанционного зондирования Земли спектрорадиометра MODIS

Область	Раздел	Тема	Наименование задачи	Тематические задачи	Данные MODIS	Данные других спутников			
Растительный мир	1	2	3	4	5	6	7		
	Нелесная растительность	Сезонные изменения растительного покрова	Определение индексов вегетации растительного покрова	Классификация сельскохозяйственных земель и посевов различных типов культур [20, 22, 26, 30–32]. Идентификация и картографирование наземной растительности [21, 24, 27–29]	Каналы 1, 2, 3, 5, 6	Landsat7 ETM+, IRS (разрешение 5.8–30 м), ERS2			
							Состояние пастбищ [3, 5]		
Почвы	Антропогенные воздействия на нелесную растительность	Пастбищная дигрессия	Выявление участков пастбищной дигрессии в степной зоне (перевыпас скота)	Выявление состава почвы [1]	Каналы 1, 2, 5, 6, 7, 31, 32	IRS LISS (разрешение 23 м), AMSR-E, ANSR, ASTER, Landsat TM, ETM+			
							Генезис и структура почв	Выявление структуры почвенного покрова	Органический состав почвы [1]
Определение температуры почв	Оценка влажности почв	Определение температуры почв	Оценка влажности почв [7–16]	Контроль и выявление ранних заморозков на сельскохозяйственных площадях [17]					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7
Антропогенные объекты	Динамические свойства почв	Засоление почв	Оценка засоления почв. Выделение внутри массива участков с различной степенью засоления	Состояние пастбищ [3, 5]	—	—
	Антропогенные воздействия на почвы (земли)	Оценка нарушения почвенного покрова (земель)	Выявление массивов почвенного покрова с признаками деградации	Анализ и районирование брошенных земель для территорий с нестабильной структурой сельскохозяйственного землепользования [19]	—	—
Сельское хозяйство	Сельское хозяйство	Площади сельскохозяйственных угодий	Определение степени и выявления факторов опустынивания	Динамика опустынивания и деградации почвенного покрова [18]	—	—
			Идентификация и учёт площадей посевов сельскохозяйственных культур	Оценка агротехнического уровня возделывания земель [41]. Детектирование и оценка используемых пахотных земель [20, 23, 35–40, 42–44, 52, 71]. Космический мониторинг основных зерносеющих регионов [45–48, 51].	Каналы 1, 2	AVHRR, Ресурс-01, SPOT Vegetation, Meteor3M, Landsat 7, IRS LISS
			Оценка площади уборки урожая сельскохозяйственных культур	Оперативное определение площади маски ярового сева [2, 49]	—	—
Состояние сельскохозяйственных угодий	Состояние сельскохозяйственных угодий	Выявление деградации естественных кормовых угодий	Состояние пастбищ [3, 5]	—	—	

О к о н ч а н и е т а б л.

1	2	3	4	5	6	7
		Прогноз урожайности	Прогноз урожайности сельскохозяйственных культур	Прогноз урожайности сельскохозяйственных культур [22, 33, 53–58, 60–65]	Каналы 1, 2, 3, 6	Spot- Vegetation Landsat TM Hyperion IRS LISS ERS-1L, ERS-2
			Оценка степени спелости сельскохозяйственных культур	Контроль сельскохозяйственных посевов [59, 66, 67]	—	—
			Оценка сезонной продуктивности пастбищ	Оценка состояния пастбищ [3, 5]	—	—
		Агротехнические мероприятия	Определение сроков и качества проведения агротехнических мероприятий	Картирование орошаемых земель [68]	—	—
		Снежный покров	Определение характеристик снежного покрова (мощность, влажность), изучение динамики установления и схода снежного покрова	Оценка условий зимовки зерновых сельскохозяйственных культур [72, 73]	Каналы 1, 2	—
		Агроклиматические условия	Агроклиматическое районирование	Учёт особенностей ландшафта пахотных земель [70]	—	—
			Распознавания и контроль развития засух	Распространение, интенсивность, продолжительность засух [69]	—	—

П р и м е ч а н и е. Каналы MODIS, упоминаемые в таблице:

- 1 — 630–670 нм, 2 — 841–876 нм с разрешением 250 м;
 3 — 459–479 нм, 5 — 1230–1250 нм, 6 — 1628–1652 нм, 7 — 2105–2155 нм с разрешением 500 м;
 31 — 10780–11280 нм, 32 — 11770–12270 нм с разрешением 1000 м.

Приложение 1. Основные вегетационные индексы

Индексы, рассчитываемые по значениям коэффициента отражения в широких спектральных диапазонах

Относительный вегетационный индекс (Ratio VI, RVI)

$$RVI = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}}$$

Значение индекса изменяется от 0 до бесконечности. Для зелёной растительности значения больше 1 и растут с увеличением зелёной фитомассы, сомкнутости растительности (обычно принимают значения 2–8).

Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference VI, NDVI)

Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс, для растительности принимает положительные значения, растёт с увеличением зелёной фитомассы. На значения индекса влияют также видовой состав растительности, её сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для растительности имеет положительные значения, обычно от 0.2 до 0.8 .

Недостатки использования NDVI-индекса:

- невозможность применения данных, не прошедших этап радиометрической коррекции (калибровки);
- погрешности, вносимые погодными условиями, сильной облачностью и дымкой. Их влияние можно частично скорректировать использованием улучшенных коэффициентов и композитных изображений с сериями NDVI за несколько дней, недель или месяцев. Усреднённые значения позволяют избежать влияния случайных и некоторых систематических погрешностей;
- необходимость для большинства задач сравнения полученных результатов с предварительно собранными данными тестовых участков (эталонов), в которых должны учитываться сезонные эколого-климатические показатели как самого снимка, так и тестовых площадок на момент сбора данных. Особенно значимыми эти материалы становятся при расчётах продуктивности, запасов биомассы и прочих количественных показателей;
- возможность применения съёмки только в течение времени сезона вегетации для исследуемого региона. В силу своей привязанности к количеству фотосинтезирующей биомассы индекс не эффективен на снимках, полученных в сезон ослабленной или невегетирующей в данный период растительности.

Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced VI, EVI)

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue} + L}(1 + L).$$

Коэффициенты C_1 , C_2 , L эмпирически установлены равными 6.0 , 7.5 и 1.0 соответственно. Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для зелёной растительности обычны значения от 0.2 до 0.8 .

Инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage VI, IPVI)

$$IPVI = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} = \frac{NDVI + 1}{2}.$$

Функционально IPVI и NDVI эквивалентны. Индекс может принимать значения от 0 до 1. Для зелёной растительности характерны значения от 0.6 до 0.9.

Разностный вегетационный индекс (Difference VI, DVI)

$$DVI = \rho_{nir} - \rho_{red}.$$

Может принимать любые значения.

Перпендикулярный вегетационный индекс (Perpendicular VI, PVI)

$$PVI = \rho_{nir} \sin \alpha - \rho_{red} \cos \alpha,$$

где α — угол между почвенной линией и осью NIR. Может принимать значения от -1 до 1 .

Взвешенный разностный вегетационный индекс (Weighted Difference VI, WDVI)

$$WDVI = \rho_{nir} - g\rho_{red},$$

где g — наклон почвенной линии. Связан с PVI примерно так же, как IPVI с NDVI. WDVI — математически более простой вариант PVI, но имеющий неограниченный диапазон значений. Как и PVI, WDVI очень чувствителен к атмосферному воздействию.

Трансформированный вегетационный индекс (Transformed VI, TVI)

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}.$$

Величина 0.5 прибавляется для исключения отрицательных значений под корнем. Функционально TVI и NDVI эквивалентны.

Индексы, устойчивые к влиянию почвы

Почвенный вегетационный индекс (Soil Adjusted VI, SAVI)

$$SAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}(1 + L),$$

где $L \in [0, 1]$, $L = 0$ для очень густого растительного покрова, $L = 1$ — для очень разреженного, чаще всего используют $L = 0.5$. Значения индекса изменяются от -1 до 1 . Линия почв проходит через точку 0.

Модифицированный почвенный вегетационный индекс 1 (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI1)

$$MSAVI1 = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}(1 + L),$$

где $L = 1 - 2s \cdot NDVI \cdot WDVI$, s — наклон почвенной линии. Значения индекса изменяются от -1 до 1 . Линия почв проходит через точку 0.

Модифицированный почвенный вегетационный индекс 2 (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI2)

$$MSAVI2 = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}(1 + L),$$

где $L = 1 - \frac{2\rho_{nir} + 1 - \sqrt{(2\rho_{nir} + 1)^2 - 8(\rho_{nir} - \rho_{red})}}{2}$. Значения индекса изменяются от -1 до 1 . Линия почв проходит через точку 0 .

Трансформированный почвенный вегетационный индекс (*Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI*)

$$TSAVI = \frac{s\rho_{nir} - s\rho_{red} - a}{a\rho_{nir} + \rho_{red} - as + x(1 + s^2)},$$

где a — координата пересечения почвенной линии с осью NIR (лежит между точкой $(0,0)$ и точкой пересечения изовегетационных линий в индексе SAVI для $L = 0.5$); s — наклон почвенной линии; x — коэффициент коррекции для уменьшения почвенного шума ($x = 0.8$). Значения индекса изменяются от -1 до 1 . Линия почв может иметь различный наклон.

Индексы, устойчивые к влиянию атмосферы

Индекс глобального мониторинга окружающей среды (*Global Environmental Monitoring Index, GEMI*)

$$GEMI = E(1 - 0.25E) - \frac{\rho_{red} - 0.125}{1 - \rho_{red}},$$

$$E = \frac{2(\rho_{nir}^2 - \rho_{red}^2) + 1.5\rho_{nir} + 0.5\rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0.5}.$$

Индекс разработан с целью избежать проведения детальной атмосферной коррекции путём конструирования общей поправки на влияние атмосферы для вегетационного индекса. Значения изменяются от 0 до 1 .

Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (*Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI*)

$$ARVI = \frac{\rho_{nir} - Rb}{\rho_{nir} + Rb},$$

где $Rb = \rho_{red} - a(\rho_{red} - \rho_{blue})$; как правило, $a = 1$, при малом покрытии растительностью и неизвестном типе атмосферы $a = 0.5$. Первый атмосфероустойчивый вегетационный индекс. Чтобы устранить влияние атмосферы на коэффициенты отражения в красной области спектра, используют значение отражения в синей зоне. Значения индекса изменяются от -1 до 1 . Линия почв может иметь различный наклон и проходит через точку 0 .

Почвенный вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (*Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index, SARVI*)

$$SARVI = \frac{\rho_{nir} - pRb}{\rho_{nir} + pRb},$$

где $pRb = \rho_{red} - \gamma(\rho_{blue} - \rho_{red})$.

Вегетационный индекс зелёности (*Green Vegetation Index, GVI*). Существуют несколько видов GVI. В их основе лежит использование двух или более участков открытой почвы для построения почвенной линии, затем проводится ортогонализация Грамма — Шмидта для нахождения “зелёной” линии, которая проходит через точку наиболее густого растительного покрова и перпендикулярна почвенной линии.

Индексы, рассчитываемые по значениям коэффициентов отражения в узких спектральных диапазонах

Применение данных индексов даёт более точные результаты для оценки качества и состояния растительности. Использование отражения в узких спектральных каналах позволяет этим индексам фиксировать даже небольшие изменения состояния растительности. Однако для их расчёта необходимы данные в узких спектральных диапазонах. Индексы данной группы отражают также общее количество и состояние растительности. Эти индексы используют для расчётов данные о яркости в участке спектра от 690 до 740 нм, т. е. рассматривают область инфракрасного склона.

Нормализованный разностный вегетационный индекс для области ближнего инфракрасного склона (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)

$$\text{NDVI}_{0.705} = \frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.705}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.705}}.$$

Может принимать значения от -1 до 1 . Для зелёной растительности обычно находится в диапазоне от 0.2 до 0.9 .

Модифицированный относительный вегетационный индекс для области ближнего инфракрасного склона (Modified Red Edge Simple Ratio Index)

$$\text{mSR}_{0.705} = \frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.445}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.445}}.$$

Индекс может принимать значения от 0 до 30 . Для зелёной растительности значение обычно изменяются от 2 до 8 .

Модифицированный нормализованный разностный вегетационный индекс для области ближнего инфракрасного склона (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)

$$\text{mNDVI}_{0.705} = \frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.705}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.705} - 2\rho_{0.445}}.$$

Может принимать значения от -1 до 1 . Для зелёной растительности обычно находится в интервале от 0.2 до 0.7 .

Индексы для оценки содержания влаги в растительном покрове

Для расчёта этих индексов используются значения в ближней инфракрасной и средней инфракрасной зонах спектра.

Водный индекс (Water Band Index, WBI)

$$\text{WBI} = \frac{\rho_{0.900}}{\rho_{0.970}}.$$

Зелёная растительность обычно имеет значения индекса от 0.8 до 1.2 . Рост содержания воды в растениях приводит к увеличению поглощения в зоне спектра около 970 нм относительно поглощения в зоне около 900 нм. Индекс применяется для анализа водного стресса, определения продуктивности, анализа пожароопасности, управления орошаемыми землями и др.

Нормализованный растительный водный индекс (Normalized Difference Water Index, NDWI)

$$\text{NDWI} = \frac{\rho_{0.857} - \rho_{1.241}}{\rho_{0.857} + \rho_{1.241}}.$$

Для зелёной растительности обычно принимает значения от -0.1 до 0.4 .

Индекс стресса влажности (Moisture Stress Index, MSI)

$$MSI = \frac{\rho_{1.599}}{\rho_{0.819}}$$

Может принимать значения от 0 до 3 . Для зелёной растительности обычно находится в диапазоне от 0.04 до 2 . Содержание воды в листьях приводит к увеличению поглощения в зоне спектра около 1599 нм. Поглощение в зоне 819 нм в зависимости от содержания воды почти не изменяется.

Нормализованный разностный инфракрасный индекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII)

$$NDII = \frac{\rho_{0.819} - \rho_{1.649}}{\rho_{0.819} + \rho_{1.649}}$$

Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для зелёной растительности обычно находится в пределах от 0.02 до 0.6 .

Следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей исследуемого свойства, и их значения зависят от характеристик сенсора (ширина спектральных каналов, разрешения), условий съёмки, освещённости, состояния атмосферы. Эти индексы представляют только относительные оценки свойств растительного покрова, которые могут быть интерпретированы и с привлечением полевых данных пересчитаны в абсолютные.

Многие индексы, корректирующие влияние почвы, требуют предварительной атмосферной коррекции. Если планируется использовать вегетационные индексы для длительного мониторинга, необходимо очень внимательно проанализировать вариабельность почв и выполнить атмосферную коррекцию.

Приложение 2. Некоторые продукты MODIS

Продукты MODIS, используемые при решении тематических задач мониторинга сельского хозяйства

Название (англ.)	Название (рус.)	Префикс	Описание
1	2	3	4
Geolocation Data Set	Географическая привязка данных	MOD02	Продукт геолокации MODIS содержит геодезические координаты, высоту земной поверхности, солнечные и спутниковые зенитные и азимутальные углы для каждой точки MODIS с разрешением 1 км
Surface Reflectance	Отражающая способность земной поверхности	MOD09	Продукт MODIS отражательной способности поверхности вычисляется по полосам уровня 1В MODIS: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 (по центру в 648 нм, 858 , 470 , 555 , 1240 , 1640 и 2130 нм соответственно)

О к о н ч а н и е т а б л.

1	2	3	4
Land Surface Temperature and Emissivity	Температура и излучательная (эмиссионная) способность земной поверхности	MOD11	Продукт MODIS уровней 2 и 3 содержит данные о температуре подстилающей поверхности и теплоотдачу с пространственным разрешением 1 и 5 км в условиях ясного неба. Обобщённый split-window LST алгоритм используется для получения температуры подстилающей поверхности для пикселей MODIS с известным излучением в каналах 31 и 32. Физически обоснованный day/night LST алгоритм используется для получения яркостной температуры и температуры подстилающей поверхности по дневным и ночным данным в каналах 20, 22, 23, 29 и 31-33 MODIS для всех видов растительного покрова
Vegetation Indices	Индексы растительности	MOD13	Вегетационные индексы MODIS включают нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) и усовершенствованный вегетативный индекс (EVI) для эффективной характеристики биофизического/биохимического состояния растительности и процессов вегетации растительного покрова
Leaf Area Index / Fraction of Photosynthetically Active Radiation (LAI/FPAR)	Индекс поверхности листовой пластинки / Доля фотосинтетически активной радиации (LAI/FPAR)	MOD15	MODIS FPAR/LAI — это часть фотосинтетически активного излучения, которую листовая полог поглощает для фотосинтеза и роста в спектральном диапазоне 0.4–0.7 нм. FPAR выражается как безразмерная часть входящего излучения, полученного поверхностью суши. Индекс листовой поверхности — величина, эквивалентная FPAR, является безразмерной. LAI и FPAR вычисляются ежедневно с разрешением 1 км. MOD15 FPAR/LAI — необходимые параметры для работы MOD16, Evapotranspiration MOD17/Net Primary Vegetation Production
Bidirectional Reflectance Distribution Function/Albedo	Функция двунаправленного распределения отражающей способности	MOD43	Альbedo поверхности является одним из ключевых радиационных параметров, необходимых для моделирования энергетического баланса Земли. Продукт MODIS BRDF/Альbedo показывает долю входящего в земную поверхность и исходящего из неё излучения. Продукт определяется по ясному небу, атмосферно скорректированным коэффициентам спектральной яркости с разрешением 500 м в семи спектральных и трёх широких полосах

Список литературы

- [1] ТАКАТА Y., FUNAKAWA S., ISHIDA N. ET AL. Spatial prediction of soil organic matter in Northern Kazakhstan based on topographic and vegetation information // *Soil Sci. and Plant Nutrition*. 2007. Vol. 53, No. 3. P. 289–299.
- [2] ТЕРЕХОВ А.Г., ЮСУПОВА А.С., ЗИНЧЕНКО Е.А., МУРАТОВА Н.Р. Оперативная инвентаризация размеров яровых посевов Северного Казахстана на базе спутниковых данных MODIS и IRS LISS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 4, № 2. С. 365–371.
- [3] NOSETTO M.D., JOVBAGY E.G., TOTI T., JACKSON R.B. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient // *Global Biogeochem. Cycles*. 2008. Vol. 22, No. 2.
- [4] LEI YU., WANG ZH., LI H. ET AL. Assessment of nitrate leaching on agriculture region using remote sensing and model // *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI the Intern. Society for Optical Eng. Berlin, Germany, 2009*. P. 74722A-10.
- [5] ТАКАТА Y. Analysis of spatial and temporal variation of soil organic carbon budget in Northern Kazakhstan // *Japan Agricultural Res. Quarterly*. 2010. Vol. 44, No. 4. P. 335–342.
- [6] ТЕРЕХОВ А.Г., КАВАЗОВ А.М. Методика оценки содержания гумуса в пахотных землях Северного Казахстана на основе спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 4, № 2. С. 358–364.
- [7] MCCABE M.F., GAO H., WOOD E.F. Evaluation of AMSR-E-derived soil moisture retrievals using ground-based and PSR airborne data during SMEX02 // *J. of Hydrometeorology*. 2005. Vol. 6, No. 6. P. 864–877.
- [8] LIU J., ZHAN X., JACKSON T.J. Soil moisture retrieval from WINDSAT using the single channel algorithm toward a blended global soil moisture product from multiple microwave sensors // *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization IV: Readiness for GEOSS II. The Intern. Society for Optical Eng. San Diego, CA, USA, 2008*. P. 70850I-8.
- [9] JU W., GAO P., WANG J. ET AL. Assimilation of remote sensing data into a process-based ecosystem model for monitoring changes of soil water content in croplands // *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Monitoring and Assessment of Natural Resources and Environments. The Intern. Society for Optical Eng. 2008*. P. 714517-8.
- [10] WANG X., GUO N., ZHANG K., ZHAO H. Estimation of the spring wheat water and chlorophyll content in rainfed agriculture areas of the loess plateau based on the spectral absorption feature of the liquid water and chlorophyll // *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Classification of Remote Sensing Images. The Intern. Society for Optical Eng. 2008*. P. 71471F-10.
- [11] CHEN H., ZHANG H., SHEN S. ET AL. Construction and validation of a new model for cropland soil moisture index based on MODIS data // *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability VI. The Intern. Society for Optical Eng. San Diego, CA, USA, 2009*. P. 745418-8.
- [12] KRAPEZ J.-C., OLIOSSO A., COUDERT B. Comparison of three methods based on the temperature-NDVI diagram for soil moisture characterization // *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI. The Intern. Society for Optical Eng. Berlin, Germany, 2009*. P. 74720Y-12.
- [13] CHEN H., ZHANG H., SHEN S. ET AL. A real-time drought monitoring method: Cropland soil moisture index (CSMI) and application // *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI. The Intern. Society for Optical Eng. Berlin, Germany, 2009*. P. 74722I-8.

- [14] GUO L., BAO Y., BAO G., HAI Q. Inner Mongolia soil moisture retrieved from MODIS image and TVDI model // PIAGENG 2009: Image Processing and Photonics for Agricultural Eng. The Intern. Society for Optical Eng. Zhangjiajie, China, 2009. P. 748902-8.
- [15] ПОГОРЕЛОВ А.В., КИСЕЛЁВ Е.Н. Моделирование поля влажности почвы на территории Краснодарского края с использованием спутниковых снимков // Вестник Северо-Кавказского гос. техн. ун-та. 2009. № 1. С. 39–43.
- [16] GUTMANN E.D., SMALL E.E. A Method for the determination of the hydraulic properties of soil from MODIS surface temperature for use in land-surface models // Water Resources Res. 2010. Vol. 46, No. 6. P. W06520.
- [17] ZHANG X., SUN L., SUN R. ET AL. Study on the late frost monitoring technology for winter wheat by EOS/MODIS data // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology X. The Intern. Society for Optical Eng. Cardiff, Wales, United Kingdom, 2008. P. 710415-14.
- [18] СТАСЮК Н.В., ДОБРЫНИН Д.В. Оценка динамики опустынивания почвенного покрова низменных территорий Дагестана с использованием космических снимков // Почвоведение. 2013. № 7. С. 778–787.
- [19] ТЕРЕХОВ А.Г., ВИТКОВСКАЯ И.С., БАТЫРБАЕВА М.Ж., СПИВАК Л.Ф. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным Landsat и MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 292–304.
- [20] БАРТАЛЕВ С.А., ЛУПЯН Е.А., НЕЙШТАДТ И.А., САВИН И.Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // Там же. 2005. Т. 2, № 2. С. 228–236.
- [21] RAMANKUTTY N., EVAN A.T., MONFREDA C., FOLEY J.A. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000 // Global Biogeochem. Cycles. 2008. Vol. 22. GB1003, doi: 10.1029/2007/GB002952.
- [22] ПЬЯНКОВ С.В., КАЛИНИН Н.А., СВЯЗОВ Е.М. и др. Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур в Пермском крае по данным дистанционного зондирования Земли // Вестник Пермского ун-та. Биология. 2009. № 10. С. 147–153.
- [23] ШЕЛЕСТОВ А.Ю., СКАКУН С.В., КРАВЧЕНКО А.Н., КУССУЛЬ Н.Н. Распределённая система спутникового агромониторинга в Украине // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 141–149.
- [24] БАРТАЛЁВ С.А., ЕГОРОВ В.А., ЕРШОВ Д.В. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Там же. 2011. Т. 8, № 4. С. 285–302.
- [25] ТУТУБАЛИНА О.В. Изучение сезонной динамики растительности Кольского полуострова по снимкам Terra MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 1. С. 59–67.
- [26] БАРТАЛЁВ С.А., ЛУПЯН Е.А., НЕЙШТАДТ И.А., САВИН И.Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Там же. 2006. № 3. С. 68–75.
- [27] ШЕВЫРНОГОВ А.П., ЗОРКИНА Т.М., ЖУКОВА В.М. и др. Изучение сезонной динамики сельскохозяйственных посевов на территории Хакасии по снимкам Terra MODIS // Сибирский вестник сельскохоз. науки. 2007. № 5. С. 29–35.
- [28] СИДЬКО А.Ф., ПУГАЧЁВА И.Ю., ШЕВЫРНОГОВ А.П. Анализ динамики спектральной отражательной способности посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края и Республики Хакасия по наземным и спутниковым измерениям // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 52–59.

- [29] ПУГАЧЁВА И.Ю., ШЕВЫРНОГОВ А.П. Изучение динамики NDVI посевов сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и Республики Хакасия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5, № 2. С. 347–351.
- [30] БРЫКСИН В.М., ЕВТЮШКИН А.В., КОЧЕРГИН Г.А., РЫЧКОВА Н.В. Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 // Там же. 2007. Т. 4, № 2. С. 183–188.
- [31] CHEN M., GAO Z., GAO W. Crop classification using MODIS EVI series in North China // Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability VI. The Intern. Society for Optical Eng. San Diego, CA, USA, 2009. P. 74541D-8.
- [32] ZHANG M., FAN J., ZHU X. ET AL. Monitoring winter-wheat phenology in North China using time-series MODIS EVI // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI. The Intern. Society for Optical Eng. Berlin, Germany, 2009. P. 747227-6.
- [33] ЗИНЧЕНКО В.Е., ЛОХМАНОВА О.И., КАЛИНИЧЕНКО В.П. и др. Космический мониторинг земель сельскохозяйственного назначения юга России // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 33–44.
- [34] БАРТАЛЁВ С.А., ЕГОРОВ В.А., ЛУПЯН Е.А. и др. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 1. С. 103–116.
- [35] БАРТАЛЁВ С.А., ЛУПЯН Е.А., НЕЙШТАДТ И.А. Метод выявления используемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования со спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3, № 2. С. 271–280.
- [36] НЕЙШТАДТ И.А. Методы обработки данных спутниковых наблюдений MODIS для мониторинга пахотных земель: Автореф. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Сибирская гос. геодезическая академия, 2007.
- [37] ПЛОТНИКОВ Д.Е., БАРТАЛЁВ С.А., ЛУПЯН 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.
- [38] ПОВХ В.И., ВОРОБЕЙЧИК Е.А., БЕКОВ Б.Р., ШЛЯХОВА Л.А. Снижение погрешности оценок площадей озимых по данным дистанционного зондирования Земли с учётом структуры сельскохозяйственных угодий // Там же. 2012. Т. 9, № 4. С. 249
- [39] КАЗАКОВ С.Г. Использование данных гиперспектрометра MODIS при изучении географии сельского хозяйства Курской области // Учёные записки. Электронный научный журнал Курского гос. ун-та. 2011. № 17. С. 266–270.
- [40] САВИН И.Ю., БАРУС Б. Оперативный мониторинг площадей посевов риса в Калмыкии на основе данных MODIS // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 66–71.
- [41] ТЕРЕХОВ А.Г. Методика оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур Северного Казахстана и его изменений в период 2000–2009 по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 233–238.
- [42] СПИВАК Л.Ф., АРХИПКИН О.П., НУРГАЛИЕВ С.Г., ШАГАРОВА Л.В. Дистанционная оценка площадей зерновых в Казахстане по данным гиперспектрального радиометра MODIS // Исследование Земли из космоса. 2003. № 2. С. 80–84.
- [43] СПИВАК Л.Ф., АРХИПКИН О.П., ПАНКРАТОВ В.С. и др. Технология мониторинга паводков и наводнений в Западном Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1, № 1. С. 279–285.

- [44] ТЕРЕХОВ А.Г. Оценка точности спутниковой технологии определения площади сельскохозяйственных масок в схеме с использованием снимков различного разрешения // Там же. 2009. Т. 6, № 2. С. 459–465.
- [45] СУЛТАНГАЗИН У.М., МУРАТОВА Н.Р., ТЕРЕХОВ А.Г. Использование космического мониторинга в планировании и прогнозировании параметров зернового производства // Там же. 2004. Т. 1, № 1. С. 291–297.
- [46] СУЛТАНГАЗИН У.М., МУРАТОВА Н.Р., ТЕРЕХОВ А.Г. Контроль севооборота пахотных земель Северного Казахстана по данным Terra/MODIS // Там же. 2005. Т. 2, № 2. С. 302–307.
- [47] ТЕРЕХОВ А.Г., МУРАТОВА Н.Р. Оценка дат ярового сева в Северном Казахстане по данным Terra/MODIS // Там же. 2005. Т. 2, № 2. С. 312–317.
- [48] МУРАТОВА Н.Р., ТЕРЕХОВ А.Г. Опыт пятилетнего оперативного мониторинга сельскохозяйственных угодий Северного Казахстана с помощью спутниковых данных // Там же. 2007. Т. 4, № 2. С. 277–283.
- [49] ТЕРЕХОВ А.Г. Сравнительный анализ информативности спутниковых данных EOS MODIS и RADARSAT-1 в задаче анализа землепользования Северного Казахстана // Там же. 2007. Т. 4, № 2. С. 345–351.
- [50] МУРАТОВА Н.Р., ТЕРЕХОВ А.Г. Технология уборки зерновых культур Казахстана в представлении спутниковых данных // Там же. 2007. Т. 4, № 2. С. 269–276.
- [51] HUANG Q., ZHOU Q., ZHANG L. An overview of crop growing condition monitoring in China agriculture remote sensing monitoring system // Intern. Symp. on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Advances in Imaging Detectors and Appl. The Intern. Society for Optical Eng. Beijing, China, 2009. P. 73840N-8.
- [52] POTGIETER A.B., APAN A., HAMMER G., DUNN P. Early-season crop area estimates for winter crops in ne Australia using MODIS satellite imagery // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010. Vol. 65, No. 4. P. 380–387.
- [53] КЛЕЩЕНКО А.Д., НАЙДИНА Т.А. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в динамических моделях прогнозирования урожая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 170–177.
- [54] БРЫКСИН В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Информационные технологии. 2007. Т. 5, № 2. С. 20–26.
- [55] БРЫКСИН В.М., ЕВТЮШКИН А.В. Использование модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 2. С. 189–196.
- [56] БРЫКСИН В.М., ЕВТЮШКИН А.В., РЫЧКОВА Н.В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2010. № 1-2. С. 89–93.
- [57] ТОЛПИН В.А., БАРТАЛЁВ С.А., БУРЦЕВ М.А. и др. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использование данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 2. С. 380–389.
- [58] САВИН И.Ю., БАРТАЛЕВ С.А., ЛУПЯН Е.А. и др. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: Возможности и перспективы // Там же. 2010. Т. 7, № 3. С. 275–285.

- [59] Повх В.И., ГАРБУЗОВ Г.П., ШЛЯХОВА Л.А. Оценка структуры посевов подсолнечника в Ставропольском крае по данным дистанционного зондирования спектрорадиометра MODIS // Там же. 2007. Т. 4, № 2. С. 284–289.
- [60] КУССУЛЬ Н.Н., КРАВЧЕНКО А.Н., СКАКУН С.В. и др. Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS // Там же. 2012. Т. 9, № 1. С. 95–107.
- [61] ТЕРЕХОВ А.Г. Основные элементы продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана сезона 2007 г. в представлении EOS MODIS // Там же. 2008. Т. 5, № 2. С. 364–370.
- [62] ТЕРЕХОВ А.Г. Оценка влияния незерновых культур на спутниковый прогноз урожайности пшеницы в Северном Казахстане // Там же. 2008. Т. 5, № 2. С. 371–375.
- [63] СУЛТАНГАЗИН У.М., МУРАТОВА Н.Р., ДОРАЙСВАМИ Р., ТЕРЕХОВ А.Г. Оценка санитарного состояния сельскохозяйственных угодий с помощью данных дистанционного зондирования // Там же. 2004. № 1. С. 286–290.
- [64] WANG Z., SHU Y., ZHANG S. ET AL. Evaluating crop land productivity using MODIS derived time serious field greenness and water index in North China plain // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI. The Intern. Society for Optical Eng. Berlin, Germany, 2009. P. 747229-9.
- [65] GALVAO L.S., FORMAGGIO A.R., BREUNIG F.M. ET AL. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir hyperion data // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113, No. 4. P. 846–856.
- [66] MEI X., LIU H. Study on paddy rice planting area and yield monitoring based on MODIS: A case study of the Jiangnan Plain // Intern. Conf. on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA). The Intern. Society for Optical Eng. Wuhan, China, 2008. P. 728550-12.
- [67] DENG W., WANG W., LIU H. ET AL. Study on paddy rice yield estimation based on multisource data and the grey system theory // Intern. Symp. on Spatial Analysis, Spatial-Temporal Data Modeling, and Data Mining. The Intern. Society for Optical Eng. Wuhan, China, 2009. P. 749227-9.
- [68] OZDOGAN M., GUTMAN G. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, No. 9. P. 3520–3537.
- [69] ЗОЛОТОКРЫЛИН А.Н., ТИТКОВА Т.Б., ЧЕРЕНКОВА Е.А., ВИНОГРАДОВА В.В. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 246–253.
- [70] ТЕРЕХОВ А.Г., ЦЫЧУЕВА Н.Ю., МУРАТОВА Н.Р. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель степной зоны Северного Казахстана на базе данных MODIS и IRS LISS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 2. С. 372–379.
- [71] ПЛОТНИКОВ Д.Е., БАРТАЛЁВ С.А., ЖАРКО В.О. и др. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Там же. 2011. Т. 8, № 1. С. 199–208.
- [72] POVKH V., GARBUZOV G., BELJAEVA I. ET AL. Detailed monitoring of agricultural production based on the MODIS radiometer data // Proc. of SPIE. The Intern. Society for Optical Eng Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology V. 2004. P. 548–552.

- [73] Повх В.И., Шляхова Л.А., Воробейчик Е.А. Оценка условий зимовки зерновых культур по спутниковым данным для территории Ростовской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 264–268.
- [74] КЛАССИФИКАТОР тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (лес и лесное хозяйство) // Земля из космоса. 2009. Вып. 1. С. 40–47.
- [75] КЛАССИФИКАТОР тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (антропогенные объекты) // Там же. 2009. Вып. 2. С. 40–45.
- [76] КЛАССИФИКАТОР тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (недра) // Там же. 2009. Вып. 3. С. 46–53.
- [77] КЛАССИФИКАТОР тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (сельское хозяйство) // Там же. 2011. Вып. 9. С. 66–69.
- [78] Михайлов С.И. Классификатор тематических задач МЧС России, решаемых с использованием данных ДЗЗ из космоса // Там же. 2010. Вып. 4. С. 64–71.

*Поступила в редакцию 23 января 2014 г.,
с доработки — 28 апреля 2014 г.*