УДК 528.8

Тимур Хайбрахманов,
кандидат географических наук, руководитель группы веб-картографии,
Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС», г. Москва

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕРВИСЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

В статье описаны структура, содержание и способы программно-технической реализации современных геоинформационных сервисов космического мониторинга сельскохозяйственных земель. Суть их функционирования основана на автоматизированных методах интерпретации данных дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов и предоставлении пользователю надежных сведений о ретроспективном и текущем состоянии растительных и почвенных покров. Формируемые в сервисах материалы нашли свое применение в производственных процессах точного земледелия и имеют значительные преимущества перед результатами традиционных способов наблюдений.

Summary

The article describes the structure, operations and techniques of modern GIS firmware as applied to satellite-based monitoring of agricultural lands. These GIS services are essentially based on automated interpretation of satellite remote sensing data. They provide users with reliable current and historical information on vegetation and soil cover. The data thus generated are applied to precision farming and far exceed the results of traditional monitoring.

Ключевые слова: *геосервис, геоинформационная система, сельское хозяйство, космический мониторинг.*
Keywords: *geoservice, geo-information system (GIS), agriculture, satellite-based monitoring.*

Введение

Геоинформационные технологии вот уже более полувека тесно связаны с сельскохозяйственной деятельностью, которая всегда учитывала пространственные характеристики своих процессов. Неудивительно, что первая в мире геоинформационная система (ГИС), разработанная в 1960-х годах в Канаде, была предназначена для составления планов сельскохозяйственного землеустройства [1]. Сегодня, спустя десятилетия активного развития информационных технологий (ИТ), множество государственных и коммерческих агропредприятий используют в составе своих ИТ-решений современные ГИС и производные продукты, что способствовало возникновению новых направлений точного земледелия.

Параллельно с этим совершенствовались и методы применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для дешифрирования сельскохозяйственных земель. Многозональные снимки, сделанные с космических аппаратов, служат основой при интерпретации спектральных характеристик растительного и почвенного покровов для получения достоверных сведений о вегетационных процессах [2]. Повышение детальности космической съемки, ее периодичности и доступности, позволило в последнее время внедрять методы и технологии регулярного космического мониторинга в аграрном секторе. Для этих целей были запущены целые «созвездия» ресурсных спутников, к примеру, действующие сегодня: Landsat-8, Terra/Aqua, Sentinel-2, UK-DMC-2, SPOT-6/7 и др.

Развитие ГИС и ДЗЗ происходило в тесной взаимосвязи, и сегодня в рамках точного земледелия активно внедряются специализированные геоинформационные сервисы (геосервисы) космического мониторинга сельскохозяйственных земель [3]. Они могут представлять собой полноценные информационные системы и подсистемы или отдельные подключаемые программные модули. Среди них есть как зарубежные (CROPIO, AgDNA, Agrivi и др.), так и российские (КосмосАгро, ВЕГА-ПРО и др.) разработки. Все они имеют много общего, используют схожие структуру, содержание и принцип функционирования, рассмотренные в данной статье.

Структура и содержание геосервиса космического мониторинга

Как и любой ГИС-продукт, геосервисы космического мониторинга имеют свою обоснованную функциональную структуру (рисунок 1) и используют определенный состав данных.

Источники данных. Космические снимки служат главным источником сведений о состоянии сельскохозяйственных земель. При этом в зависимости от решаемых задач можно выделить две группы такой съемки:

• снимки пространственного разрешения более 5 метров на пиксель для дешифрирования границ полей;

• высокопериодичные снимки с диапазонами пространственного разрешения: 10-30 м и 250 м для регулярного дешифрирования состояния растительности и почв.

Вся используемая космическая съемка является многозональной, то есть аппара-

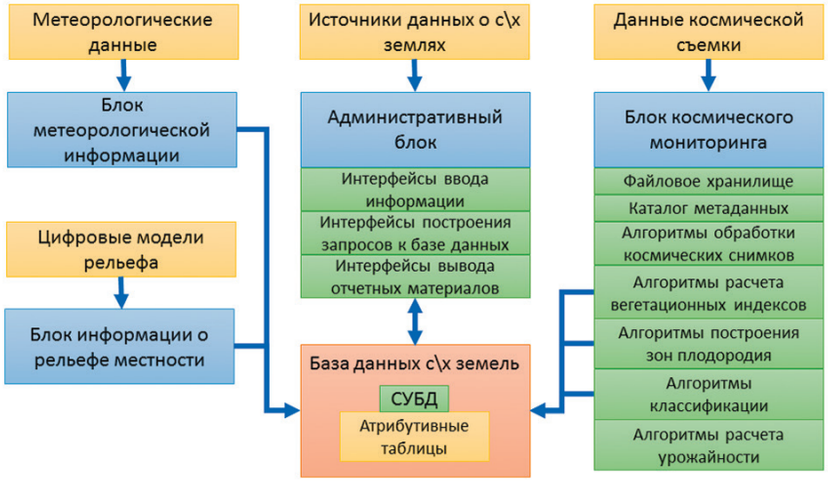

Рисунок 1. Функциональная структура геосервиса космического мониторинга сельскохозяйственных земель

тура спутников снимает целевую территорию в нескольких каналах светового спектра. Важным является наличие сенсоров видимых (0,4-0,7 мкм) и ближних инфракрасных (0,7-3,0 мкм) участков излучения, для которых характерны наибольшие различия в отображении состава и структуры растительного и почвенного покровов [4].

Космический мониторинг также предполагает регулярное получение большого количества снимков, поэтому при организации их архивов предусматривают ценовые характеристики съемки. Среди всего ее разнообразия большая часть является коммерческой, а самые детальные данные с разрешением более 5 метров на пиксель – только коммерческие, поэтому обычно в качестве высокопериодичных снимков используют свободно распространяемые в сети Интернет изображения: ежедневные Terra/Aqua MODIS (разрешение 250 м), 10-16-дневные Landsat-8 (15-30 м) и Sentinel-2 (10-20 м). В скором времени планируется ввод в действие ряда других спутников со схожими характеристиками. Вся съемка организуется в специальные каталоги и архивы, способствующие проведению ретроспективного анализа и выявлению закономерностей в развитии растительных покровов, что является основой прогнозной деятельности.

При обосновании результатов дешифрирования привлекают сведения о метеорологических показателях за дату съемки и ведутся архивы метеонаблюдений для вычисления базовых агроклиматических показателей, например, сумм активных температур и накопленных осадков. Основным источником данных при этом являются государственные и частные метеостанции.

Для схожих целей привлекают также результаты анализа рельефа местности, поскольку характер склоновых процессов непосредственно сказывается на состоянии сельскохозяйственных земель. Исходные данные обычно предоставляются в виде готовых цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Помимо перечисленных источников информации в геосервис вносятся пользовательские сведения о землях. Это планы и схемы землеустройства для уточнения границ полей, экономические показатели по каждому полю, агрохимические данные и т.п.

При работе с геосервисом в обязательном порядке ведется *база данных (реестр) сельскохозяйственных земель,* в состав которой входит набор атрибутивных таблиц, где каждая строка записи соответствует контуру поля. Такая база данных (БД) является реляционной базой геоданных, где все сведения имеют свое пространственное отображение на карте. Она функционирует на основе системы управления базами данных (СУБД), поддерживающей работу с координатно-определенной информацией.

За работу с БД отвечает *административный блок* геосервиса. Это набор программных интерфейсов для ввода информации, построения логических запросов и вывода необходимых сведений в виде отчетных материалов.

Ввод данных производится за счет установленных форм, в общем виде их состав выглядит следующим образом:

• паспорт сельскохозяйственного поля (номер поля согласно нумерации пользователя, сведения об учтенной площади, значения рассчитанной в геосервисе площади, сведения о произрастающих культурах и их предшественниках, данные государственного кадастра и др.);

• сведения о собственниках и арендаторах земли (сведения о пользователях);

• информация о сельскохозяйственных работах (тип работ: посев, мелиоративная деятельность, внесение удобрений, уборка урожая; дата проведения работ; результаты работ: площади обработанных земель, объемы убранного урожая и т.п.);

• агрохимические показатели (содержание гумуса и различных химических веществ в точках опробования);

• данные сельскохозяйственной техники (тип, модель, расход топлива, ширина захвата и др.);

• результаты полевых наблюдений (полевые отчеты, фото- и видеоматериалы) и др.

Структура и содержание форм могут меняться в зависимости от задач, которые решает геосервис, но для функционирования космического мониторинга минимальный набор вносимых сведений включает уникальный идентификатор поля для их различия при построении запросов; сведения о текущей культуре, поскольку

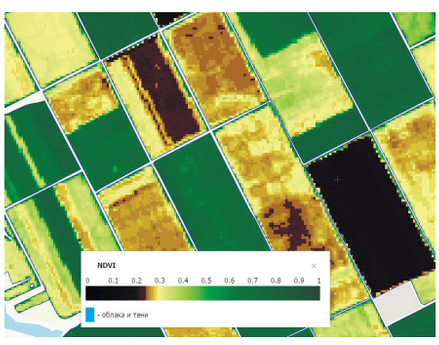

Рисунок 2. Пример изображения значений индекса NDVI, построенного на основе снимка Landsat-8 по контурам пахотных полей в геосервисе КосмосАгро

различные виды растительности имеют разную яркость на снимке; даты сельскохозяйственных работ для обоснования существенных изменений в состоянии растительного покрова.

Управляющая базой данных СУБД дает возможность организации поисковых запросов к отдельным таблицам. Они строятся на основе языка программирования SQL, но пользователю обычно предоставляются готовые шаблоны поиска. Критерии и сценарии запросов определяются на основе состава данных экспертным путем.

По аналогии функционирует вывод информации в отчетные формы, где уже заданы строгие правила отбора данных и прописаны форматы их записи в файл.

Блок космического мониторинга отвечает за основное назначение геосервиса и выполняет целый ряд задач:

• организация приема и каталогизация космической съемки;

• обработка космических снимков математическими методами;

• расчет показателей состояния растительного и почвенного покровов;

• расчет зон плодородия почв для обоснования внесения удобрений;

• расчет урожайности культур;

• отображение результатов мониторинга и их запись в БД.

Любой космический снимок характеризуется определенным набором атрибутов: дата и время съемки, тип аппаратуры, пространственное разрешение, спектральные данные, форматы и др. – все они записаны в специальных файлах метаданных. Классификация на их основе всего объема снимков в организованные каталоги и архивы оптимизирует процесс их дальнейшего анализа программными средствами, а также повышает эффективность выбора нужного изображения при визуальном дешифрировании.

Обычно в среду геосервиса загружаются так называемые «сырые» космические данные, которые требуют дальнейшей обработки за счет процедур уточнения геопривязки, пересчета систем координат, проецирования, ортотрансформирования, цветовой коррекции и т.п. Их методы были разработаны десятилетия назад и усовершенствованы в современных ГИС в виде готовых программных алгоритмов, применяемых к каждому снимку в файловом хранилище.

На основе обработанных данных проводится расчет различных показателей состояния растительного и почвенного покровов исследуемых сельскохозяйственных земель. Центральное место при этом занимает построение вегетационных индексов, а самой распространенной

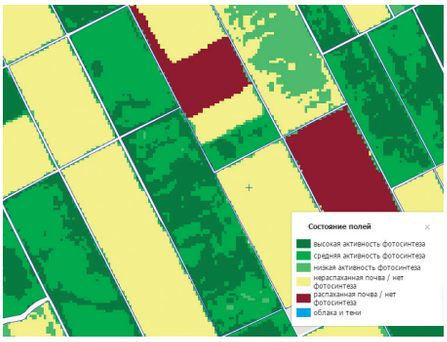

Рисунок 3. Пример изображения индекса изменений растительного покрова, построенного на основе снимка Landsat-8 по контурам пахотных полей в геосервисе КосмосАгро

методикой является расчет индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), отражающего для каждого пиксела соотношение яркостей на снимке в двух зонах спектра [5]. Известно, что в красной области излучения (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближней инфракрасной (0,7-3,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Поэтому по своей сути этот индекс характеризует количество активно вегетирующей биомассы растительности. Пример изображения с рассчитанными значениями NDVI представлен на рисунке 2. Кроме него существует еще более 160 других видов индексов, но самое большое применение при космическом мониторинге в сельском хозяйстве нашли следующие показатели.

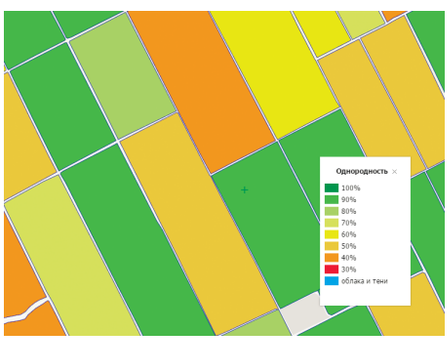

Рисунок 4. Пример изображения индекса внутренней неоднородности, построенного на основе снимка Landsat-8 по контурам пахотных полей в геосервисе КосмосАгро

Индекс условий вегетации (VCI) является интегральным, то есть учитывает не только текущее состояние растительного покрова, но и средние, минимальные и максимальные многолетние показатели. Основное назначение данного показателя – оценка текущих условий вегетации на качественном уровне: хуже, в пределах нормы или лучше средних многолетних значений для данного периода. Динамика изменения VCI позволяет, например, отслеживать начало засухи и определять зону ее распространения.

Индекс изменений растительного покрова. Его расчет построен на сравнении значений NDVI текущего периода съемки с предыдущим. Он представляет собой классификацию данных по типам и интенсивности происходящих изменений в фотосинтезе (рисунок 3). Его использование позволяет выявлять зоны сельскохозяйственных угодий с различными тенденциями в изменении состояния сельскохозяйственных культур, а его основное назначение – выявление зон ущерба, возникающих в результате воздействия стихийных факторов, а также мониторинг проведения уборочных работ.

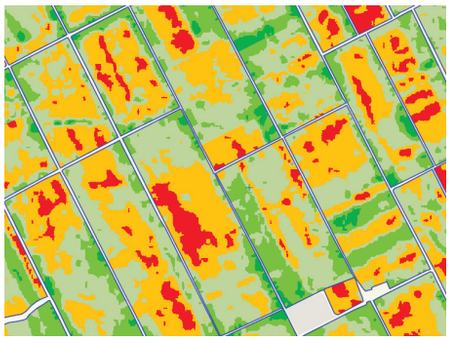

Рисунок 5. Карта зон плодородия полей, построенная в геосервисе КосмосАгро

Индекс внутренней неоднородности полей использует результаты автоматизированной классификации космического снимка для определения процента однородности развития растительности и почвенных процессов на полях (рисунок 4). Этот показатель может характеризовать высокую активность эрозионных процессов, засоления, дефляции, гибель посевов от стихийных бедствий и вредителей, нарушение технологий обработки почв и т.п. [6].

Анализируя значения индекса NDVI в пределах выбранных территориальных единиц (хозяйства, районы), строятся различные *рейтинги полей*, характеризующие их состояние по отношению друг к другу. Такой рейтинг может позволить, к примеру, управляющим и надзорным структурам выявлять участки, не соответствующие установленным нормам землепользования.

Интегральный анализ всех представленных показателей в современных геосервисах космического мониторинга за различные даты съемки способствует разработке более сложных продуктов.

Зоны плодородия почв строят на основе детального сравнения изображений NDVI, индекса изменений растительного покрова и внутренней неоднородности полей за многолетний период. Совместный компонентный анализ этих данных позволяет выделить в пределах поля участки со схожим характером развития посевов от угнетенного состояния до активного фотосинтеза, проявляющих себя одинаково или почти одинаково при всех наблюдениях. Это является косвенным признаком плодородия земли. Площади таких выделенных зон используют при расчетах норм внесения удобрений, а картографические изображения (рисунок 5) поступают в бортовые устройства сельскохозяйственной техники для осуществления навигации точного земледелия.

Значения вегетационного индекса удобнее интерпретировать в виде годовых графиков, которые наглядно отражают все стадии развития посевов. Многолетний анализ графиков хода NDVI совместно с метеорологическими сведениями дает возможность с помощью метода аналогов определить год-аналог, то есть наиболее типичное развитие культуры (рисунок 6). В свою очередь, рассчитывая степень расхождения ежегодных кривых от «аналоговых» с учетом сведений об урожайности за периоды наблюдений, автоматизировано делается прогноз урожайности. Его ценность напрямую зависит от количества и качества всех исходных данных и является вспомогательным инструментом, позволяющим оценивать потенциальные риски.

Блок метеорологический информации отвечает за обработку, анализ и выдачу сведений о метеопоказателях. Как правило, в геосервис эти данные поступают в виде таблиц с ближайшей метеостанции государственной или пользовательской, установленной непосредственно в агрохозяйстве. Входящая информация отображается в виде графиков или диаграмм накопленных значений. Важно чтобы нужные сведения имелись на дату получения космической съемки, поскольку погодные явления непосредственно обосновывают многие результаты мониторинга, например, наличие сплошной облачности или выпавшего снега приведут к неверной интерпретации индекса NDVI.

Блок информации о рельефе местности предоставляет сведения о его характеристиках в наборе карт. Гипсометрическая карта отражает сведения об абсолютных высотах территории в послойной окраске, на ней отчетливо видны формы рельефа и направление стока вод. Карта уклонов показывает крутизну склонов в градусах согласно установленной шкале и обосновывает интенсивность склоновых процессов. Карта экспозиции характеризует территорию по объемам

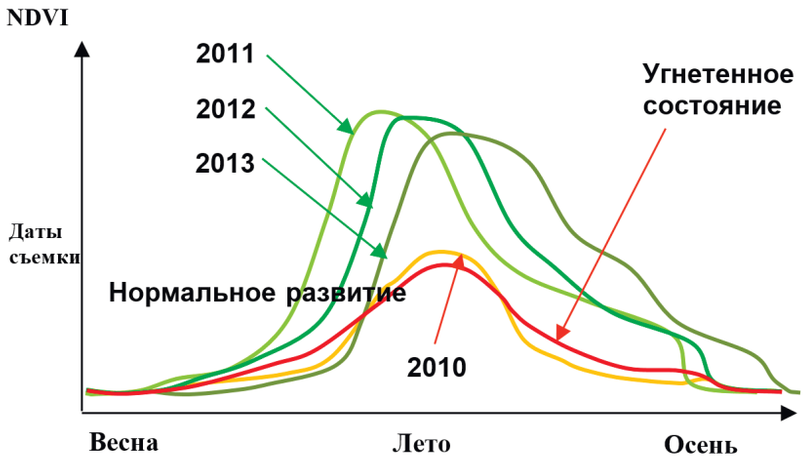

Рисунок 6. Пример графика сравнения хода NDVI с годом-аналогом

инсоляции. Алгоритмы построения этих карт есть во многих современных ГИС и основаны на обработке цифровых моделей рельефа. При этом самой распространенной ЦМР на сегодня является модель SRTM, созданная благодаря аппаратуре космического шаттла «Индевор», она и используется повсеместно в составе данных геосервисов космического мониторинга.

Программно-техническое обеспечение геосервиса

Работа всех функций геосервиса поддерживается программно-техническими особенностями управляющей геоинформационной платформы. Она обеспечивает работу баз данных, отвечает за визуализацию на карте, предоставляет инструменты ввода и вывода информации в определенных форматах, интегрируется с программными алгоритмами обработки данных ДЗЗ. При этом специфика функционирования и пользования сервисом указывает на ряд дополнительных требований к своему программному обеспечению.

Во-первых, это поддержка импорта космических снимков и других данных с удаленных хранилищ в сети Интернет. Во-вторых, это возможность организации больших объемов дискового пространства для ведения архива съемки. В-третьих, это поддержка работы сервиса на множестве рабочих мест и разных типах устройств (кроссплатформенность), ведь многие операции требуют одновременного доступа к ним для различных пользователей. Наконец, это наличие модульной архитектуры, определяющей работу блоков геосервиса.

С учетом всех перечисленных требований в качестве программно-технических платформ выбирают современные веб-ГИС. Основная их особенность заключается в принципе «клиент-сервер», когда все данные и функции хранятся и действуют на удаленном сервере, «в облаке», в то время как на рабочем компьютере запускается только клиентское веб-приложение. Это делает пользователя практически независимым от спецификации своего оборудования, обеспечивается многопоточность процессов обработки и надежная защита информации, достигается интеграция геосервиса в информационные системы более высокого ранга, например, в ведомственные или корпоративные ГИС.

Сегодня существует множество веб-ГИС, обеспечивающих функционирование геосервисов: коммерческие зарубежные (ArcGIS Online, Google Maps Engineб CartoDB и др.), открытые продукты (GeoServer, MapServer и др.), отечественные системы (Web-GIS GeoMixer).

Заключение

Геоинформационные сервисы космического мониторинга имеют ряд неоспоримых преимуществ перед традиционными методами наблюдений за состоянием земель в сельском хозяйстве. Они позволяют оперативно оценить состояние полей всей наблюдаемой территории, сокращая время и средства на проведение полевых выездов. Они в автоматическом режиме интегрируют в своей среде различные данные и представляют их в удобном для интерпретации виде, упрощая труд агрономов и фермеров. Они дают возможность дистанционно управлять всеми работами на поле и осуществлять контроль их выполнения.

Тем не менее можно выделить ряд современных проблем в работе таких сервисов. В первую очередь, это зависимость съемки от условий облачности и дымки, что препятствует активному внедрению представленных систем в районах с частым проявлением этих погодных факторов. Однако уже сейчас существует практический опыт в использовании всепогодных радарных космических снимков, а также изображений с беспилотных летательных аппаратов, хотя из-за сравнительной дороговизны большого распространения эти методы пока не получили.

Еще одной проблемой является сложность, а порой и невозможность взаимной калибровки данных различных съемочных систем, что создает трудности в интерпретации полученных от них сведений при совместном анализе данных. Поэтому сегодня в связи с запуском большого числа спутников ДЗЗ методология взаимных калибровок активно развивается, а ее результаты непременно включаются в работу геосервисов.

Также обязательное наличие подключения к Интернет накладывает свои ограничения в использовании мониторинговых систем. Справиться с этой проблемой могут помочь специальные программные приложения, которые работают по принципу накопления данных в условиях отсутствия связи, а их обмен с геосервисом проводится уже на месте с доступом к сети.

Технологии ГИС и ДЗЗ продолжают развиваться высокими темпами, сокращается количество проблем и недостатков в работе сервисов космического мониторинга, и уже сейчас все это способствует их активному внедрению в процессы точного земледелия.

Литература

1. Tomlinson R.F. An introduction to the geo-information system of the Canada land inventory. Ottawa, Canada, 1967. 26 p.

2. Атлас «Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Методика и результаты». М.: Наука-Берлин, Академи-ферлаг, 1982. 82 с.

3. Новиков А.А., Потанин М.Ю., Хайбрахманов Т.С. Сельскохозяйственный мониторинг. Особенности работы онлайн-сервисов // Экология. Экономика. Информатика (7-12 сентября 2014). Т. 2 Сборник «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2014. С. 145-149.

4. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М.: Изд-во МГУ, 1991. 206 с.

5. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Third ERTS Symposium. Vol. 1: Technical Presentations. Washington D.C.: NASA, 1973. P. 309-317.

6. Михайлов С.И. Применение данных дистанционного зондирования Земли для целей высокоточного земледелия // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2012. № 14. С. 24-26.

haibrahmanov@scanex.ru