

УДК 502.7:55

Л.Д. ГРЕКОВ, А.В. КУЗЬМИН, Г.Ю. ВЕРЮЖСКИЙ, А.А. ПЕТРОВ,
В.П. СКАВРОНСКИЙ

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АГРАРНЫХ РЕСУРСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В интересах товаропроизводителей сельхозпродукции и органов государственного управления в сфере сельскохозяйственного производства разработана прикладная **система космического мониторинга аграрных ресурсов** регионального уровня.

Система реализует полный технологический цикл обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса, формирование прикладных аграрных сервисов и предоставление доступа к информации конечному потребителю через универсальный web-интерфейс (геопортал). С точки зрения пользователя система является интуитивно простым и наглядным средством визуализации прикладных аграрных сервисов и связанной с ними атрибутивной информации. Предлагаемые тематические сервисы базируются на комплексном использовании спектральных данных со свободно распространяемых снимков TerraModis и Landsat 8, а также Deimos-1 и RapidEye. Обработка данных дистанционного зондирования с целью формирования тематических сервисов базируется на методах статистического, кластерного и факторного анализа, методах распознавания образов, нейронно-сетевых методах анализа.

Ключевые слова: агроресурсы, космический мониторинг, контроль процесса вегетации, Landsat 8, RapidEye, данные полевых исследований, распознавание образов, прогнозирование урожайности.

Актуальность внедрения методов космического агромониторинга в Украине

С начала 90-х годов 20 столетия в Украине произошла кардинальная трансформация структуры сельхозпроизводства. Практически было ликвидировано крупнотоварное колхозно-совхозное производство сельхозпродукции, как альтернатива появились миллионы фермерских хозяйств.

После 2004 года происходит формирование корпоративного сектора производства на базе крупномасштабной концентрации землепользования. Она проявляется как в наращивании площадей арендованных земель, так и в создании быстрыми темпами новых агрохолдингов, вертикально и горизонтально интегрированных структур, в состав которых входят не только аграрные формирования, но и перерабатывающие предприятия, элеваторы, транспортные и торговые организации, научные учреждения и т.п. Земельные массивы таких структур достигают десятков и сотен тысяч гектаров, они монополизуют выгоды от международной торговли.

В 2013 году, по разным оценкам, в Украине функционировали более 100 агрохолдингов, размер их консолидированных земельных банков составил

около 6,5 млн га, или 18% от общей площади сельхозугодий, находящихся в собственности и пользовании сельскохозяйственных предприятий и граждан. По прогнозам, к 2015–2016 годам агрохолдинги планируют увеличить землепользование еще на 2–3 млн га.

В индивидуальном секторе постепенно укрепляются позиции фермерских хозяйств — доля производимой ими продукции сельского хозяйства в общей ее стоимости увеличилась с 1,7% в 2000 году до 5,0% в 2010. Но сейчас индивидуальный сектор представлен в основном хозяйствами населения (свыше 9 млн сельских и городских домохозяйств, имеющих в пользовании земельные участки, в том числе 4,5 млн личных крестьянских хозяйств), которым принадлежит 55% валового производства отрасли.

В результате произошедших трансформаций, в сельскохозяйственном производстве Украины распространено пренебрежение экологическими нормами и требованиями. Корпоративные и индивидуальные хозяйства не соблюдают требования севооборота, масштабной является монокультуризация, ограничено производство животноводческой продукции. Структура сельскохозяйственного производства деформирована в пользу экспортоориентированной растениеводческой продукции. Институциональная среда не побуждает производителей к внедрению правил надлежащей сельскохозяйственной практики сохранения и повышения плодородия почв.

Агрессивное использование сельскохозяйственных угодий, монокультуризация, массовое несоблюдение севооборота и т.п., а также существенное уменьшение объемов природоохранной деятельности создали реальную угрозу ресурсо-экологической безопасности развития аграрного сектора и в целом государства. Ориентация на конъюнктуру внешних агропродовольственных рынков еще больше ее усилит.

Влияние государства в сфере сельскохозяйственного производства должно быть направлено на регулирование деятельности агрохолдингов с целью минимизации их дестабилизирующего влияния на агросферу Украины и предотвращения ее трансформации в сырьевой придаток других стран. В тоже время в Украине должно принципиально измениться отношение к семейному типу хозяйствования, являющемуся основой сельскохозяйственного устройства развитых стран.

В условиях интенсивных трансформационных процессов в сельхозпроизводстве всем участникам производственных отношений в сфере сельхозпроизводства (государству, корпоративному и индивидуальному секторам) необходим действенный мониторинговый механизм анализа состояния аграрных ресурсов на макроуровне: государство, крупный регион; мезоуровне: административный район, агрофирма; на микроуровне: фермерское хозяйство, отдельное поле.

Современные ГИС-технологии, дистанционные методы зондирования земли из космоса и технологии WEB-доступа к информационным ресурсам позволяют обеспечить участников процесса аграрного производства прикладными мониторинговыми сервисами, направленными на повышение эффективности агропроизводства и сохранение земельных ресурсов.

Прикладные агросервисы макроуровня

- Система учета земель сельскохозяйственного назначения.
- Общий анализ использования сельхозземель (выявление заброшенных, не обрабатываемых, нецелевое использование сельхозземель).
- Выявление процессов деградации сельскохозяйственных земель (водная эрозия, ветровая дефляция, засоление, подтопление, опустынивание).
- Оценка посевных площадей основных сельскохозяйственных культур региона.
- Оценка общего состояния посевов в регионе в результате климатических и фитосанитарных факторов.
- Оценка и прогнозирование урожайности для основных сельскохозяйственных культур.
- Контроль за соблюдением севооборотов и сохранением плодородия грунтов.

Прикладные агросервисы мезо- и микроуровня

- Учет и инвентаризация земельных ресурсов, определение площади и контура поля.
- Определение культуры для каждого поля
- Оценка развития посевов на конкретном поле с учетом используемых аграрных технологий в разные периоды его вегетации, выявление стрессовых состояний посевов.
- Сравнительная характеристика и ранжирование состояния посевов отдельной культуры для разных субъектов хозяйствования.
- Количественная и качественная оценка уровня однородности состояния посевов для разных фаз вегетации.
- Оценка и прогноз биологической урожайности для конкретного поля.

Информационное обеспечение процесса мониторинга

Проведение мониторинга сельскохозяйственных ресурсов базируется на двух основных источниках информации: данных спутниковых наблюдений и полевых исследованиях.

Данные спутниковых наблюдений используются для анализа значений отражательной способности от различных типов поверхности, в частности, культурной растительности, различных типов почвы или почвы, частично покрытой растительностью в различных спектральных диапазонах. Для анализа агросервисов в системе используются спутниковые данные среднего пространственного разрешения 5–30 м на пиксель и данные низкого разрешения 250–500 м на пиксель. Для анализа состояния растительности наиболее информативными являются спектральные каналы видимого спектра, инфракрасного и ближнего инфракрасного спектра. Для анализа почв дополнительно используются тепловые каналы [1].

Процесс мониторинга аграрных ресурсов осуществляется на протяжении всего вегетационного периода, начиная с посева озимых культур (сентябрь – октябрь предшествующего аграрного года) до уборки яровых культур (конец октября следующего аграрного года).

Начиная с возобновления процесса вегетации озимых культур (последняя декада марта – первая декада апреля) и до полного созревания яровых культур (третья декада августа – первая декада сентября) в системе реализован основной, наиболее детальный мониторинг состояния посевов в основные фазы вегетации. Реализация этого процесса мониторинга осуществляется с использованием 5–6 основных снимков с наиболее высоким доступным разрешением, например 5 м, спектральными каналами видимого спектра (голубой, зеленый, красный) и инфракрасными каналами (ближний инфракрасный, красный край). Наилучшим образом таким условиям удовлетворяют сенсоры группировки спутников RapidEye. Съемка основного процесса мониторинга планируется в начале каждого аграрного года с фиксированными датами с точностью исполнения 5–6 дней.

В интервалах между основными датами съемки в системе мониторинга предусмотрено использование свободно распространяемых космических снимков с пространственным разрешением 30 м со спектральными диапазонами видимого спектра, инфракрасного, коротковолнового и теплового спектра. Периодичность покрытия исследуемой территории снимками этого типа составляет один снимок в две недели, в реальности, с учетом возможной облачности, качественный снимок можно получить раз в месяц. На сегодняшний день данные дистанционного зондирования с такими свойствами система космического мониторинга получает со спутника Landsat 8.

Оперативный мониторинг с минимально возможной пространственной дискретностью получения информации в системе осуществляется с использованием данных низкого пространственного разрешения. С диапазонами красного и ближнего инфракрасного спектра с разрешением 250, голубого и зеленого диапазонов с разрешением 500 м на пиксель. Данные с такими характеристиками имеются в свободном доступе и поставляются сенсорами космического спутника TerraModis. Информация с данного спутника доступна ежедневно, с учетом наличия облачности, реальная периодичность получения данных один раз в 4–5 дней.

Данные полевых исследований используются для адекватной интерпретации данных космического мониторинга, проводятся на регулярной основе в даты, согласованные с датами проведения наиболее детального мониторинга, с помощью группировки космических спутников RapidEye. Целью полевых исследований основных сельскохозяйственных культур является измерение агрофизических характеристик посевов: количества растений с единицы площади поля, высоты растений, биомассы сухой и влажной, количества зерен, веса одной тысячи зерен, индекса листовой поверхности (LAI). Дополнительно, с помощью приборов, производится измерение дифференциального вегетационного индекса (NDVI) и косвенное измерение количество хлорофилла в зеленой растительности. Проведение полевых исследований предполагает также анализ фитосанитарного состояния посевов и их подверженности климатическим факторам: забурьяненности, наличия вредителей, заболеваний, изреженности, полегания, высыхания, вымокания, вымерзания посевов, наличия водной эрозии. При проведении почвенных исследований на

территории проведения мониторинга эти данные также интегрируются в систему. Все полевые измерения производятся с применением координатной привязки и фотофиксации места взятия пробы или аномалии посева.

В качестве дополнительного источника информации в системе мониторинга используется векторная карта масштаба 1: 50 000, которая содержит набор базовых объектов: границы административных единиц, границы населенных пунктов, автомобильные и железные дороги, объекты гидрографии, лесные массивы и другие объекты. При наличии почвенных данных система мониторинга интегрирует почвенные карты в векторном формате.

Структура базы данных системы мониторинга

Основным объектом анализа системы дистанционного мониторинга является совокупность однородных агрономических полей. Под однородным агрономическим полем в системе мы понимаем область, занятую пашней, ограниченную контуром с естественными устойчивыми границами (дорога, лесополоса, лесной массив, объекты гидрографии и т.д.), которая в текущем аграрном году засеяна одной культурой. Векторный слой контуров агрономических полей создается в системе аграрного мониторинга с использованием доступных актуальных космических снимков с максимально высоким пространственным разрешением путем оцифровки или экспорта в систему из внешних источников, при наличии данных наземной GPS-съёмки. Учитывая, что в Украине процесс реконфигурации полей происходит очень интенсивно, процедура редактирования контуров полей осуществляется каждый аграрный год. Система поддерживает пространственную и временную топологию структуры контуров агрономических полей, т.е. пользователь имеет возможность определить, в состав какого агрономического поля входила любая часть поля в предшествующие годы.

Тематический анализ совокупности спутниковых данных и данных полевых исследований

Тематический анализ совокупности данных космического мониторинга и данных полевых исследований осуществляется с помощью различных прикладных модулей математической обработки, интегрированных в систему космического мониторинга:

Модуль предварительной обработки спутниковых данных предусматривает проведение радиометрической и атмосферной коррекции, перепроецирование снимков, изменение пространственного разрешения, использование различных методов фильтрации, построение пирамид, построение композитных изображений. Предварительная обработка космических снимков включает также специальную процедуру автоматического распознавания пикселей снимка, занятых облаками и тенями от облаков, которая использует байесовский алгоритм распознавания образов. Процедура помечает соответствующие пиксели меткой NODATE, и в дальнейшем анализе пиксели, помеченные такой меткой, участия не принимают.

Модуль предварительной обработки реализован в форме набора дополнительных функций системы ARC GIS 10.1. [1].

Модуль вычисления вегетационных индексов. Традиционная технология анализа состояния культурной растительности предусматривает вычисление различных вегетационных индексов системы растительность – почва [2]. В частности, в системе дистанционного мониторинга вычисляются и анализируются дифференциальный нормализованный вегетационный индекс (NDVI), модифицированный дифференциальный нормализованный вегетационный индекс (MNDVI), зеленый нормализованный вегетационный индекс (GNDVI), индекс растительности (VI).

$$NDVI = \frac{R_{850} - R_{650}}{R_{850} + R_{650}}, \quad MNDVI = \frac{R_{700} - R_{650}}{R_{700} + R_{650}}, \quad GNDVI = \frac{R_{850} - R_{550}}{R_{850} + R_{550}},$$

$$VI = \frac{R_{2200} - R_{1650}}{R_{2200} + R_{1650}},$$

где R_{850} , R_{650} , R_{700} , R_{550} – спектральные отражательные способности поверхности в ближнем инфракрасном, красном, крайнем красном и зеленом диапазонах.

Вычисляются и анализируются нормализованный разностный водный индекс (NDWI) и нормализованный разностный снежный индекс (NDSI).

$$NDWI = \frac{R_{1650} - R_{850}}{R_{1650} + R_{850}}, \quad NDSI = \frac{R_{480} - R_{850}}{R_{480} + R_{850}},$$

где R_{480} , R_{1650} , R_{2200} – спектральные отражательные способности поверхности в голубом и коротковолновых инфракрасных (SWIR1 и SWIR2) диапазонах.

Модуль статистического анализа и картографирования неоднородностей состояния поля. Для практического анализа состояния растительности на агрономическом поле представляет интерес характеристика распределения различных, наблюдаемых методами дистанционного зондирования величин, в качестве которых могут быть использованы числовые значения спектральных яркостей или числовые значения любого из перечисленных выше индексов. Числовые значения анализируемой величины интерпретируются модулем как реализация распределения некоторой случайной величины, для которой вычисляются различные параметры распределения, в частности A – среднее значение параметра, S – среднеквадратическое отклонение параметра, задается значение $0 < \alpha \leq 1$. Найденные значения используются для разбиения распределения на классы, где значение A используется как нулевая точка оси, а величина $\alpha \cdot S$ – как единица шкалы. Таким образом, формируются $2n + 1$ класса, с диапазонами

$$[A - 3S, A - n\alpha S], \dots, [A - 3\alpha S, A - 2\alpha S], [A - 2\alpha S, A - \alpha S], [A - \alpha S, A + \alpha S],$$

$$[A + \alpha S, A + 2\alpha S], [A + 2\alpha S, A + 3\alpha S], \dots, [A + n\alpha S, A + 3S].$$

которые отображаются в некоторой цветовой шкале.

Модуль факторизации данных дистанционного зондирования. Пространственно-временной анализ состояния растительности производится с использованием совместного анализа всего множества космических снимков, полученных на протяжении всего процесса вегетации. Для анализа используются все доступные информативные спектральные каналы сенсоров RapidEye – 5 каналов и Landsat 8 – 6 каналов. В результате для каждой точки поля $(x_i, y_i), i=1..N$ система мониторинга формирует таблицу $Z(x_i, y_i), i=1..N$, размерность которой определяется количеством используемых снимков и спектральных каналов, размерность вектора к концу вегетационного периода может достигать 50–80 единиц информации. Количество точек N задается параметром шага регулярной сетки и может варьироваться в диапазоне от 5 до 90 метров. Удобно рассматривать $Z(x_i, y_i), i=1..N$ как многомерную случайную величину (*МСВ*). Отдельные компоненты *МСВ*, характеризующие распределение отражательной способности различных спектральных каналов, демонстрируют высокий уровень взаимной корреляции, что делает такое множество данных избыточным и малоприспособным для различных процедур анализа, особенно для проведения классификации и кластеризации посевов [3].

Для устранения избыточности без потери информативности и снижения размерности *МСВ*, необходимо представить все множество значений через описывающие их независимые компоненты. В рассматриваемой системе дистанционного мониторинга такая процедура осуществляется с помощью технологии факторного анализа по методу главных компонент с вращением по методу Варимакс. Как правило, в результате применения процедур удается снизить размерность *МСВ* до 4–10 независимых стандартизированных **главных факторов**, с сохранением не менее 95% пространственной изменчивости.

Модуль распознавания вида культуры. Важной и актуальной задачей сельскохозяйственного мониторинга является автоматизированное определение для каждого агрономического поля культуры произрастания из фиксированного множества культур. Для решения этих задач в системе используются различные подходы контролируемой классификации (классификации с учителем).

Для формирования обучающей выборки из всего множества агрономических полей для каждой культуры выбирается 3–8 полей, засеянных данной культурой, с максимальной вариативностью главных факторов. Как правило, для исследуемой территории количество культур, занимающих более 95% посевных площадей, не превышает 10 единиц и включает культуры (пшеница озимая, ячмень озимый, ячмень ярый, кукуруза, подсолнечник, соя, горох, рапс, сахарная свекла, многолетние травы, гречка).

В системе реализованы различные, наиболее эффективные подходы контролируемой поточечной (на сетке с заданным шагом) классификации: метод максимального правдоподобия Байеса в предположении нормального распределения случайной величины и метод ядерного сглаживания в предположении произвольной плотности функции распределения, метод ближайшего соседа, метод деревьев классификации, метод нейронных сетей. Результаты

классификации, полученные различными методами, подвергаются постобработке путем сопоставления между собой, а окончательное решение о принадлежности точки к одному из классов принимается на основании анализа окрестности исследуемой точки.

Процедура определения типа культур распадается на два этапа.

На первом этапе осуществляется выделение полей, засеянных озимыми культурами, среди которых распознаются основные озимые культуры (озимая пшеница, озимый ячмень, озимый рапс).

После посева и всходов яровых культур и на протяжении всего процесса вегетации происходит уточнение распределения посевов на полях яровых культур.

Модуль прогнозирования урожайности. Определение биологической урожайности культуры на каждом конкретном поле, а тем самым валовых сборов в некотором регионе, представляет собой наиболее интересную и вместе с тем наиболее трудоемкую процедуру. Очевидно, что применение чисто аналитических подходов для оценки урожайности на отдельном поле или отдельном регионе без проведения полевых испытаний в сочетании с данными дистанционного зондирования не может дать положительный результат и в состоянии лишь моделировать общие закономерности вегетации растений. В то же время на урожайность влияют множество случайных факторов: погодные условия, технологический уровень, свойства грунтов, продуктивные свойства сорта культуры и др. Учесть все многообразие случайных факторов и заложить их в аналитическую модель развития растения практически невозможно, в связи с этим в системе космического мониторинга аграрных ресурсов используется технология пространственной экстраполяции на базе параметрических и не параметрических регрессионных моделей урожайности [4].

Оценка или измерение биологической урожайности на контрольных полях осуществляется в контрольных точках экспертным методом на ранних фазах вегетации по косвенным признакам развития растений. На фазе полной спелости производится оценка урожайности в контрольных точках поля методом измерения количества готовой продукции или, при возможности, используются данные урожайности с комбайнов. Полученные данные урожайности $Pr(i), i = 1..M$ используются как зависимые переменные регрессионной модели, в качестве независимых переменных используются главные факторы $f_1(i), f_2(i), \dots, f_n(i), i = 1..M$, полученные как результат дистанционного зондирования с дальнейшей обработкой методом главных компонент. Выбор контрольных точек замера урожайности в поле осуществляется в точках, которые обеспечивают максимальную вариативность главных факторов.

В качестве параметрических моделей используются модели полиномиального типа не выше третьего порядка, для построения непараметрических моделей применяется нейронно-сетевая технология построения регрессионной модели [5].

Результатом является модель вида $Pr = F(f_1, f_2, \dots, f_n)$, которая позволяет вычислить значение урожайности для всего поля значений наблюдаемых главных факторов и оценить среднее значение урожайности на каждом конкретном поле.

Опыт применения такого подхода свидетельствует о его эффективности, отклонение значений оценки биологической урожайности от непосредственно измеренной хозяйственной урожайности не превышает 10%.

Геопортал как технология предоставления информационных услуг

Геопортал является одним из видов интернет-портала, который используется для доступа к геопространственной информации и подключенным атрибутивным данным через Интернет. Геопортал предназначен для быстрого доступа ко всем наборам данных про агропроизводство конкретного сельскохозяйственного предприятия, что позволяет обеспечить управление предприятием, анализируя массивы фактических данных о состоянии различных сфер производства; упростить контроль над технологическими процессами, чтобы обеспечить накопление и сохранение информации; создавать и поддерживать хронологию землепользования и бизнес-процессов в самой удобной форме – «единого окна».

Геопортал имеет функциональные возможности и соответствующий набор инструментов, которые помогают ему выполнять следующие задачи:

- интерактивную навигацию по карте;
- картометрические исследования изображений;
- создание слоев геопространственной информации;
- поиск необходимых объектов из геопространственной базы данных;
- выявление объектов и получение подробной информации из базы данных о выбранном объекте;
- создание запросов к базе геопространственных данных с формированием соответствующих отчетов;
- создание тематических изображений карт на основе пространственной и атрибутивной информации из базы данных;
- аналитическую обработку и моделирование отдельных объектов, процессов и явлений.

Одним из преимуществ этой технологии является то, что пользователь не должен иметь специальные знания в области геоинформационных технологий, компьютеров или географии. Основной целью тематического геопортала является предоставление доступа к тематическим сельскохозяйственным информационным сервисам, созданным на основе спутниковых снимков и другой картографической и статистической информации, поступающей из различных источников. Важной особенностью геопортала является возможность работать со всеми вышеупомянутыми источниками данных независимо от места их физического расположения. Геопортал как интерактивная информационная среда создается с использованием технологии Microsoft Silverlight. Вся информация об агропроизводстве и тематических сельскохозяйственных сервисах хранится в двух базах данных: геоинформационной – в среде ArcGIS Server и реляционной – в среде Microsoft SQL Server.

Технологические решения, реализованные в системе мониторинга, прошли апробацию на протяжении двух аграрных лет на территории Монастырищенского района Черкасской области. Мониторинг проводился для 1600 аграрных полей общей площадью около 65 тыс. га.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: перевод. с английского. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
2. Borzuchowski J. Schulz K. Retrieval of Leaf Area Index (LAI) and Soil Water Content (WC) Using Hyperspectral Remote Sensing under Controlled Glass House Conditions for Spring Barley and Sugar Beet, *Remote Sensing* **2010**, 2, pp. 1702–1721.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072.
4. Майорова В.И., Банников А.М., Гришко Д.А. и другие. Контроль состояния сельскохозяйственных полей на основе прогнозирования динамики индекса NDVI по данным космической мультиспектральной и гиперспектральной съёмки, Наука и образование (электронный научно-технический журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана), с. 200-225, 2013 <http://technomag.bmstu.ru/doc/577991.html>.
5. Hardle W. Applied nonparametric regression, 1990. 349 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2014