

**ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР¹**

С.В.Пьянков, Н.А.Калинин, Е.М.Свиязов, А.А.Смирнова, И.Б.Некрасов
Пермский государственный университет
E-mail: gis@psu.ru

METHOD OF COMPLEX EVALUATION OF CROP BIOMASS

S.V.Pyankov, N.A. Kalinin, E.M.Sviyazov, A.A. Smirnova, I.B.Nekrasov
Perm State University
E-mail: gis@psu.ru

Abstract. Agricultural production management, especially in the areas unsuitable for arable farming, must be carried out according to the following principles - constant control of land treatment measures based on agricultural and agrochemical engineering, phase crop development, control of crop yield and total yield. Remote (satellite) sensing can help to obtain objective regional level data on crops conditions over vast territories. The use of the data significantly reduces expenses on cultivated land monitoring over vast areas. Considering spatial nature of the abovementioned tasks geoinformation systems (GIS) are the most suitable tool for conducting research in this sphere.

In GIS Centre of Perm State University method of complex evaluation of crop biomass, which is aimed at prompt analysis of seeds and their growing conditions, has been developed. This method is based on geoinformation system ArcGIS 9.* (ESRI, USA). The underlying principle of the method is that data obtained from Earth remote sensing, subsatellite monitoring and biological productivity model is used for crops conditions monitoring in diagnostic areas. In order to carry out complex evaluation, geographical database of diagnostic areas has been created. Then on the basis of remote sensing data information about overall conditions, growing conditions and predicted crop productivity has been obtained. What is more, the results have been supported by the middle- and high-resolution space photographs taken from the satellites Terra, Landsat, IRS. To see the connection between the space photographs and actual plants conditions verifactory measurements of crop biomass on the diagnostic areas have been conducted.

The work has been done with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project 09-05-99027-г_офи).

Согласно концепции федеральной целевой программы «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006 – 2010 годы» сельскохозяйственное производство отнесено к числу приоритетных отраслей экономики. Эффективное управление сельскохозяйственным производством, особенно в регионах с рискованным земледелием, должно быть основано на принципах постоянного контроля проведения агротехнических и агрохимических мероприятий, оценки условий пофазового развития культур, уточнения урожайности и валовых сборов на разных территориальных уровнях от отдельного поля до административных районов субъектов РФ. Такой мониторинг должен проводиться как в условиях нормального воспроизводства, так и в неблагоприятных для произрастания растений условиях. Для достижения практически значимых результатов по прогнозированию урожайности, картированию засух, засоренности полей, а также для анализа причин снижения продуктивности угодий требуется сбор большого объема данных и построение имитационных моделей развития растений.

Объективные данные о состоянии сельскохозяйственных культур на больших территориях на региональном уровне можно получать только с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). При этом для установления связей между характеристиками космических снимков и фактическим состоянием растений должны производиться синхронные космосъемке подспутниковые измерения на сельскохозяйственных полях. За рубежом мониторинг сельскохозяйственных процессов осуществляется с применением данных аэро- и космической съемки, а также широким использованием средств спутниковой навигации (GPS). Материалы космической съемки помогают как в решении комплексных задач управления сельскохозяйственными территориями, так и в узкоспециализированных направлениях. Типичными задачами в этой области являются инвентаризация сельскохозяйственных угодий, контроль состояния посевов, в том числе озимых культур после перезимовки, выделение участков эрозии, заболачивания, засоленности и опустынивания, определение состава почв, слежение за качеством и своевременностью проведения различных сельскохозяйственных мероприятий. При систематической повторяемости съемок по ДДЗЗ осуществляется наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-05-99027-г_офи)

Многолетний опыт разнопланового практического применения ДДЗЗ накоплен в США. Здесь во всех штатах научно-исследовательские и прикладные работы проводятся как Сельскохозяйственной службой, так и рядом других подразделений. Прогноз урожая по данным космической съемки спутниками Landsat применялся в США еще в 70-е годы XX в. для выработки ценовой политики экспорта продовольствия. Космическая съемка широко применяется для мониторинга агропромышленного комплекса во многих развитых странах мира (Канада, США, страны ЕС, Индия, Япония, Китай и др.). Система MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing) стран Европейского сообщества позволяет определять площади посевов и урожайность сельскохозяйственных культур от государственного уровня вплоть до отдельных ферм. Результаты обследования используются для расчета налоговой базы, выработки гибкой системы цен и квот, планирования экспортно-импортных операций и других мероприятий. Германия вывела на орбиту многоспутниковую систему RapidEye со сканерами высокого разрешения, предназначенную для ежесуточного мониторинга сельскохозяйственных площадей.

Значительный опыт использования космической информации для оценки состояния сельхозкультур накоплен в Казахстане, где развивается проект «Национальная система космического мониторинга для сельского хозяйства».

В нашей стране применение данных спутникового зондирования в сельском хозяйстве представляет собой быстро развивающееся и перспективное направление. Использование ДДЗЗ в сельскохозяйственном производстве проводится в ряде научных институтов и научных центров. Так, начиная с 2003 г., Главный вычислительный центр Министерства сельского хозяйства РФ совместно с Институтом Космических Исследований РАН, приступил к проведению мероприятий по внедрению методов дистанционного зондирования в агропромышленном комплексе России [Барталев С.А., 2006]. Ими проводится спутниковый мониторинг состояния растительности в аграрных регионах РФ на основе расчета вегетационных индексов растительности с использованием векторных масок полей и производится оценка растительности по году-аналогу.

Югорский НИИ информационных технологий (г. Ханты-Мансийск) разрабатывает методологию по прогнозированию урожайности зерновых культур для территории Тюменской, Новосибирской областей и Алтайского края на основе данных космического мониторинга и моделирования биопродуктивности в рамках решения следующих задач: 1) определение видового состава культур и границ полей по космоснимкам; 2) выделение видового состава культур и неоднородной структуры посевов; 3) прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе динамики изменения нормализованного индекса *NDVI* и расчета биологической продуктивности посевов с помощью имитационной модели EPIC (США), адаптированной к условиям Западной Сибири [Брыксин В.М., 2007].

В Самарском государственном аэрокосмическом университете и ОАО «Самара-Информспутник» также проводится оценка состояния сельскохозяйственных угодий на основе данных дистанционного зондирования с помощью имитационной модели биологической продуктивности. В 2008 г. ОАО «Самара-Информспутник» и научно-производственный «Поволжский центр космической геоинформатики» разработали и реализовали ГИС «Агропромышленный комплекс Самарской области».

По заказу Министерства сельского хозяйства Пермского края в ГИС центре ПГУ была создана геоинформационная система космического мониторинга сельскохозяйственных угодий для обеспечения заинтересованных пользователей объективной и оперативной информацией о состоянии и развитии основных сельскохозяйственных культур, эффективности использования земельных ресурсов. Для оперативного доступа пользователей к данным о сельскохозяйственных угодьях на сервере ГИС центра был создан сайт «Мониторинг состояния сельхозугодий Пермского края» (<http://agromap.perm.ru>), на котором можно получать информацию, не привлекая дорогостоящие и сложные в использовании программные комплексы [Связов Е.М., 2008].

В настоящее время ГИС центром ПГУ совместно с кафедрой метеорологии и охраны атмосферы в рамках гранта РФФИ-офи выполняется работа по разработке технологии комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур по ДДЗЗ на платформе геоинформационной системы (ГИС) ArcGIS 9.* (ESRI, США). Реализация технологии предполагает совместное использование космических снимков, подспутниковых наблюдений на полях и модели биопродуктивности для мониторинга развития сельскохозяйственных культур, а также прогноза урожайности на уровнях от отдельного поля до региона в целом. При этом выполняются следующие задачи:

- 1) создается географическая база данных по сельскохозяйственным угодьям тестового хозяйства.
- 2) производится мониторинг состояния фитомассы основных зерновых (озимая рожь, овес, ячмень, пшеница) и кормовых (клевер, люцерна, козлятник, тимopheевка) сельскохозяйственных культур в режиме реального времени;
- 3) осуществляется прогнозирование урожайности основных сельскохозяйственных культур с помощью модели биопродуктивности.

Для достижения поставленной цели была создана географическая база данных полей тестового хозяйства. В качестве тестовых были выбраны опытные поля Пермского научно-исследовательского института сельского хозяйства (ПНИИСХ) (с. Лобаново, Пермского района, Пермского края). Исходными данными послужили космические снимки IRS PAN (разрешением 5,8 м), векторные слои топографической карты, приобретенные в Федеральной службе геодезии и картографии России (М 1:200 000) и в ГУ

«Федеральное агентство кадастра объектов недвижимости по Пермскому краю» (М 1:10 000), а также карты агрохимического обследования (М 1:25 000), полученные от ГУ ФГЦАС «Пермский».

Географическая база данных, созданная специалистами ГИС центра ПГУ, состоит из картографического и атрибутивного блоков. Картографический блок содержит информацию о границах сельскохозяйственных угодий и предприятий, гидрографической сети, населенных пунктах, транспортных коммуникациях. В блоке атрибутивной информации находятся сведения о площади полей, произрастающих на них культурах, применяемых удобрениях, проводимых агрохимических обследованиях и агротехнических мероприятиях, а также метеорологические параметры в районе тестового хозяйства. Сведения о культурах включают в себя следующие показатели: название культуры, сорт, дату сева, засоренность, культуру-предшественник, биометрические параметры. Кроме того, на исследуемую территорию по данным оперативных съемок ДЗЗ генерируются карты температуры земной поверхности, индекса засухи, состояния растительности (нормализованного вегетационного индекса).

Для получения сведений о состоянии культур используются космические снимки Terra и Aqua (разрешением 250-1000 м), Landsat, IRS (разрешением 5,8 - 30 м). Обработка космических снимков производится на базе программных средств ScanEx Image Processor. Результаты обработки помещаются в географическую базу данных в виде производных растровых слоев. По мере получения новой информации проводится ее анализ, выявление изменений и тенденций, которые включают в себя определение динамики процессов в течение сезона. В процессе оперативного мониторинга за вегетационный период 2008 г. на основе ДЗЗ среднего и низкого разрешения создан архив карт температуры подстилающей поверхности, состояния растительности и индекса засухи за бездождевой период с маской сельскохозяйственных полей. Архивные данные позволяют получать текущие оценки объемов зеленой фитомассы, типичных для данного места в данный период времени.

Для характеристики термических условий подстилающей поверхности используются значения яркостной температуры, полученные из соответствующих тепловых каналов космических снимков Terra MODIS. Расчет температуры производится в программном пакете ScanEx Image Processor с использованием масок облачности и водных объектов, полученных по параметрам, вычисленным для территории Пермского края. При обработке снимка в пакете ArcGIS отсекаются все пиксели, содержащие заведомо низкие значения на границе облачного слоя и водных объектов.

Изменение термических условий существенно сказывается на вегетации сельскохозяйственных культур. Особенно сильно влияние температуры почвы и приземного слоя на растения в фазы прорастания, цветения, начала формирования урожая. Для определения динамики изменения тепловых условий подстилающей поверхности вычисляется тенденция температуры подстилающей поверхности, и строятся соответствующие карты средствами модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS.

Количественные оценки состояния растительности проводятся с помощью нормализованного вегетационного индекса (*NDVI*), который рассчитывается следующим образом:

$$NDVI = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1},$$

где R_2 — значение отражения в ближней инфракрасной области спектра; R_1 — значение отражения в красной области спектра. *NDVI* может быть рассчитан на основе спутниковой информации, имеющей спектральные каналы в красном (0,62–0,69 мкм) и ближнем инфракрасном (0,75–0,9 мкм) диапазонах. В общем случае принимается, что величина *NDVI* пропорциональна общей биомассе растений. Космоснимки территории исследования, полученные в виде цифровых многоканальных изображений, обрабатывались в программном пакете ScanEx Image Processor. При расчете *NDVI* исключались пиксели изображения, соответствующие водным объектам, облачности и снежному покрову путем расчета масок. После обработки, содержащей процедуры настройки отображения каналов изображения, информация сохранялась в растровый формат и экспортировалась в базу данных по сельскохозяйственным угодьям. Для получения карт состояния растительности это изображение подгружалось в проект ArcGIS, где последовательно выполнялись процедуры по отнесению значений к одному из классов состояний и попиксельному экспорту значений *NDVI* в формат базы данных. Поскольку космическое изображение охватывает значительную территорию, то на карте распределения *NDVI* представлено не только состояние сельскохозяйственной растительности, но также лесов и необрабатываемых территорий. Для исключения лишней информации на карту *NDVI* накладывалась маска сельскохозяйственных полей территории исследования, по которой «вырезались» значения *NDVI*, относящиеся к полям.

Нормализованный вегетационный индекс характеризует плотность растительности, а, следовательно, продуктивность угодий. Состояние растительности, оцененное через *NDVI*, существенно изменяется в процессе развития растений. Так, от момента начала вегетации сельскохозяйственные растения накапливают фитомассу и, следовательно, величина индекса увеличивается; в конце июня – июле величина фитомассы достигает максимума, после которого в процессе формирования урожая и уборки отмечается ее уменьшение и, следовательно, снижение значений *NDVI*. Для оценки изменения в ходе *NDVI* в период массового созревания зерновых культур оценивается тенденция состояния растительности на основе сравнения карт *NDVI* за разные даты.

Выявление признаков засухи производится с помощью индекса засухи ID (Index of Drought). Засуха — это явление, сопровождающееся повышенным фоном ночных и дневных значений температуры при отсутствии выпадения осадков, поэтому ID рассчитывается как отношение суммы дневной (максимальной) (T_d) и ночной (минимальной) (T_n) суточных значений температуры к значению нормализованного вегетационного индекса за эти же сутки [Щербенко Е.В., 2004]:

$$ID = \frac{T_d + T_n}{NDVI}.$$

Здесь T_d и T_n приведены в единицах яркостной температуры. Значения температуры берутся из соответствующих спектральных каналов Terra MODIS. Чем выше значение индекса засухи, тем с большей вероятностью на исследуемой территории отмечается засуха. Значение индекса 1200–1400 свидетельствует о наступлении слабой засухи (растения угнетены, но жизнеспособны), 1400–1600 — средней и сильной засухи (растения существенно угнетены), более 1600 — катастрофической засухи (полная гибель растений). Расчет индекса засухи производился в программном комплексе ArcGIS с помощью модуля Spatial Analyst. Засуха не является быстроразвивающимся и быстропротекающим явлением, ее наступление происходит в результате накопления причин, вызывающих угнетение растений, поэтому отслеживать признаки начала засухи необходимо при благоприятных условиях ее развития, отмечающихся за длительный промежуток времени.

Данные ДЗЗ служат не только для оперативной оценки качественного состояния растительности и подстилающей поверхности. По данным космосъемки может быть определен ряд специфических агрономических характеристик. Но поскольку данные зондирования являются неконтактной информацией, то они требуют разработки определенных алгоритмов перехода от яркостной отражаемости в различных спектральных каналах снимка к принятым агрономическим характеристикам. Для этого, а также для получения и анализа ряда сведений о состоянии посевов на полях необходимо производить сравнение полученных значений по ДДЗЗ с данными контактных подспутниковых наблюдений. По данным синхронных наблюдений на сельскохозяйственных полях оцениваются дата сева, фаза развития культуры, количество и высота растений, урожайность зеленой массы, содержание и сбор сухого вещества, биологическая урожайность и т.д. Такие характеристики с одной стороны расширяют сведения о состоянии сельскохозяйственных культур, с другой — служат критерием точности и нормировки идентификационных параметров ДДЗЗ. Накопление и выявление статистических связей между ДДЗЗ и данными подспутниковых наблюдений при достижении удовлетворительной точности результатов дешифровки дистанционными средствами позволят практически полностью отказаться от контактных наблюдений на полях, за исключением обязательных агрономических обследований. Кроме того, определение видового состава сельскохозяйственных культур по ДДЗЗ позволит контролировать соблюдение севооборота и оценивать площади обрабатываемых земель.

Для идентификации (определения видового состава) посевов были выбраны единовременные мультиспектральные снимки IRS за 2008 г. и данные полевых обследований за эти же годы. Причем снимки были выбраны за период с конца июня по начало июля, когда большинство посевов сельскохозяйственных культур максимально накапливают фитомассу, что соответствует наибольшим значениям $NDVI$. Значения яркости из спектральных каналов осреднялись в пределах контуров тестовых полей и наносилась на график в виде точек, где по оси X были отложены значения яркости в красном диапазоне, а по оси Y — значения яркости в ближнем инфракрасном диапазоне (рис.1). В результате по значениям яркости сельскохозяйственных полей в пространстве спектральных признаков были выделены три области. Первая область — поля, находящиеся под паром — располагается вблизи линии почв [Книжников Ю.Ф., 2004]. Вторая область, расположенная на графике правее и чуть выше первой, соответствует полям с картофелем. Такое расположение области объясняется особенностями возделывания этой культуры, с учетом того факта, что среднее по полю значение яркости складывается из значений яркости растений картофеля и значений яркости междурядий, где почва практически свободна от растительности. Третья область значений расположена в левой части графика выше линии почв. Значения яркости в этой области относятся к полям с зерновыми культурами и многолетними травами. Она образована пересечением двух зон: одна из них относится к полям с многолетними травами, другая к полям с зерновыми культурами. Поля с многолетними травами, имеющими высокие значения фитомассы и, как следствие, высокие значения яркости в ближнем инфракрасном диапазоне, могут быть идентифицированы по данному графику, так как они расположены в левой верхней части графика и не перекрываются зоной соответствующей зерновым культурам.

При использовании разновременных снимков одной и той же территории была получена следующая картина распределения сельскохозяйственных полей в пространстве спектральных признаков (рис. 2). Здесь по оси X отложено значение $NDVI$ на дату, близкую к максимальным значениям данного индекса ($NDVI_1$). По оси Y — значения $NDVI$ по снимкам, полученным через месяц ($NDVI_2$). По данному графику видно, что кроме паров и полей с картофелем хорошо выделяются поля с озимыми культурами. Это связано с тем, что на дату получения снимка (конец июля) у озимых начался процесс созревания зерна и, как следствие, уменьшение фитомассы растений.

Таким образом, для более качественного и подробного разделения сельскохозяйственных культур по видовому составу необходимо учитывать условия фазового развития растений. Учет заключается в анализе

динамики развития культур по серии снимков, получаемых в течение вегетационного периода. Кроме того, необходимо выбрать оптимальный способ идентификации.

Для решения задач прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур нами был проведен ряд подготовительных работ. В частности, для исследования возможности использования ДДЗЗ в расчете ожидаемых урожайностей, были построены регрессионные зависимости значений фитомассы сельскохозяйственных растений и ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур от нормализованного вегетационного индекса. Входными данными для построения уравнений регрессии послужили результаты подспутниковых наблюдений на опытных полях и карты *NDVI*. Подспутниковые обследования включали наблюдение за следующими показателями: урожайность зеленой массы, сбор сухой массы, густота всходов и стояния растений, фенологические наблюдения, высота растений. Перед уборкой по показателям зерновых культур определялась структура урожая и биологическая урожайность зерна. Показатели рассчитывались в результате отбора проб на опытных полях. Данные дистанционного зондирования применялись для вычисления вегетационного индекса, т.е. для создания карты *NDVI* (значения, близкие к максимальным за вегетационный период).

Уравнения регрессии для получения прогноза урожайности были построены следующим образом. На карту *NDVI* накладываются точки отбора проб. После этого в данных точках определялись значения индекса как в пикселях, соответствующих местоположению точек отбора проб, так и его значения в соседних пикселях. Далее находились средние значения *NDVI* для каждой точки. Данные о структуре урожая с опытных полей и средние значения вегетационного индекса, полученные в точках отбора, подвергались статистической обработке. В результате были построены три уравнения регрессии в зависимости от типа сельскохозяйственных культур.

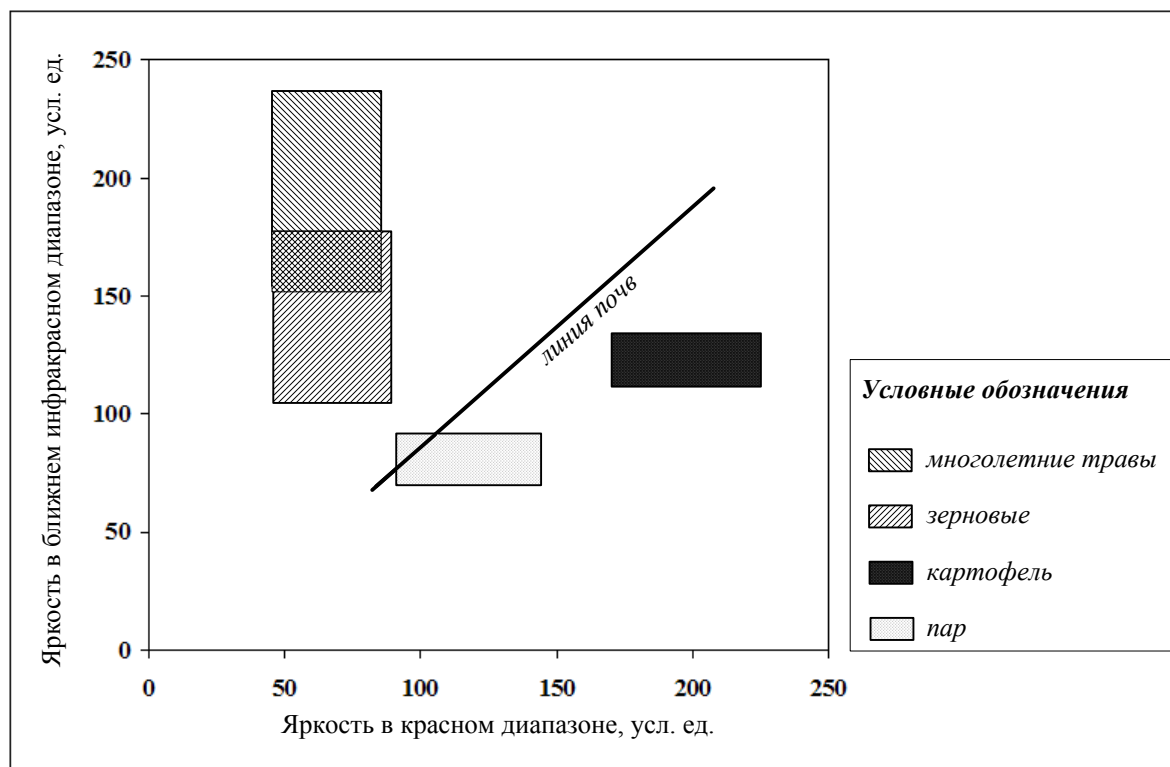


Рис.1. Распределение полей с различными сельскохозяйственными культурами в пространстве спектральных признаков, полученное по данным одного снимка

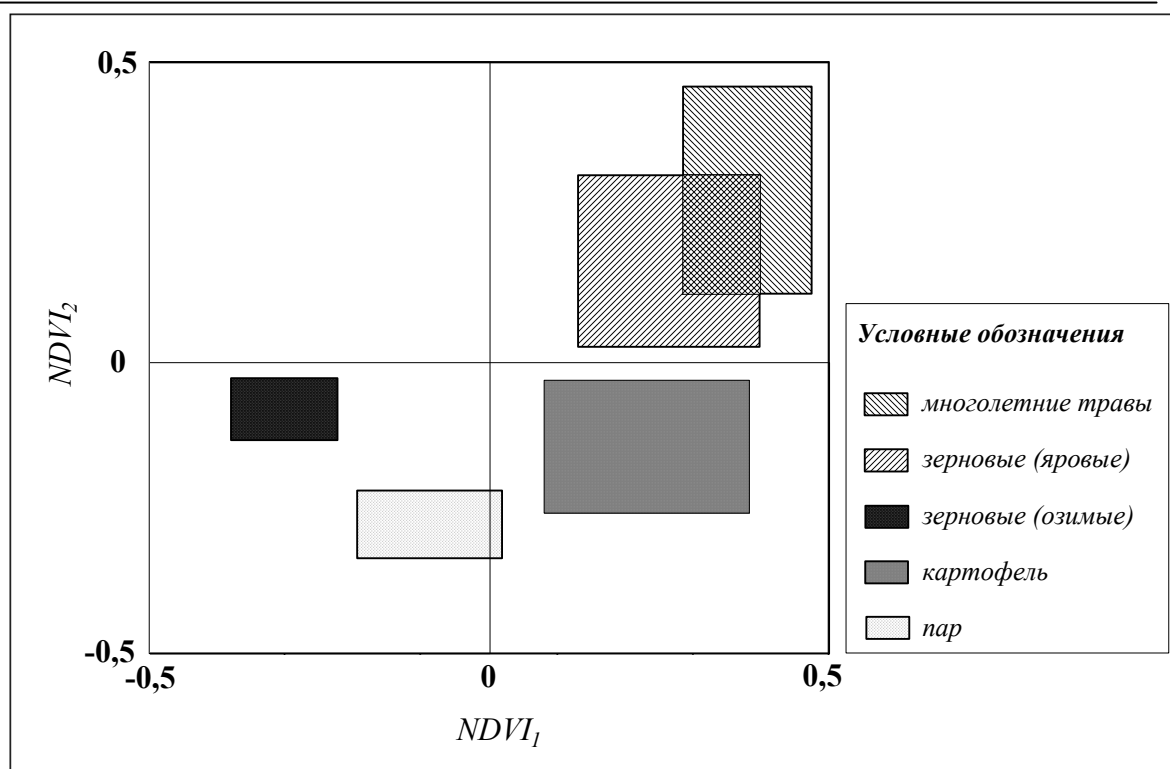


Рис.2. Распределение полей с различными сельскохозяйственными культурами, полученное по значениям нормализованного вегетационного индекса по данным двух разновременных снимков

1. Для расчета урожайности зеленой массы кормовых культур (козлятник, люцерна, викоовсяная смесь):

$$Y = 40,96 \text{ NDVI} + 1,53.$$

2. Биологическая урожайность яровых зерновых (пшеница, овес, ячмень):

$$Y = 4,66 \text{ NDVI} + 0,17.$$

3. Биологическая урожайность озимых зерновых (рожь, пшеница):

$$Y = 4,29 \text{ NDVI} + 1,94.$$

В этих уравнениях урожайность измеряется в тоннах с гектара.

Далее планируется разработать блок автоматизации расчета $NDVI$ и значений фитомассы в качестве входных данных для модели ЕРІС. Оценка прогностической фитомассы будет осуществляться по фактическим значениям (подспутниковые наблюдения), определенным на полях тестового хозяйства. В ходе выполнения проекта будет проведена адаптация модели ЕРІС к условиям Пермского края для основных сельскохозяйственных культур. Таким образом, совмещение различных способов оценки состояния сельскохозяйственных культур и изменения их фитомассы в процессе вегетации позволяют получить наиболее полную картину развития растений и формирования их урожайности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из Космоса, М.: 2006. №3. С. 68-75.
2. Брыксин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности ЕРІС и космических снимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2007. Том 5, выпуск 2. С. 20 – 26.
3. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
4. Свиязов Е. М., Пьянков С. В., Некрасов И. Б., Смирнова А. А., Онегов Д. В., Русаков В. С., Тимофеев П. К., Шпаков М. А. Геоинформационная система космического мониторинга сельскохозяйственных угодий Пермского края // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края. Сборник научных трудов. Пермь. 2008. С. 52-56.
5. Щербенко Е.В., Шорохова М.А., Дронин Н.М., Скабелкин Ю.А. Обнаружение засухи по данным космических съемок // ArcReview. Современные геоинформационные технологии. М.: Дата+, 2004. № 2. С. 8-9.