

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»
(СФУ)

На правах рукописи



Брежнев Руслан Владимирович

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ
НЕОДНОРОДНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

05.13.17 – Теоретические основы информатики

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Маглинец Юрий Анатольевич

Красноярск – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА	12
1.1 Постановка задачи	12
1.2 Описание признаков пространственного объекта	19
1.3 Формализация модели объекта	22
1.4 Описание исходных данных	22
1.5 Анализ моделей пространственного объекта	24
1.5.1 Растровая модель пространственных объектов	26
1.5.2 Регулярно-ячеистая модель данных	27
1.5.3 Квадратомическая модель данных	28
1.5.4 Векторная модель пространственных объектов	30
1.5.5 Векторная топологическая модель	31
1.6 Пространственно-временные модели объектов	34
1.6.1 Модель снимка	34
1.6.2 Композитная модель	35
1.6.3 Модель, основанная на простой фиксации времени	36
1.6.4 Событийно-ориентированная модель	37
1.6.5 Трехдоменная модель	38
1.6.6 Модель исторического графа	39
1.7 Организация пространственных объектов	41
1.7.1 Модель «Объект-Отношение»	41
1.7.2 Модель «Сущность-Связь»	42
1.7.3 Объектно-реляционная модель	43
1.7.4 Объектно-ориентированная модель	43
1.8 Выводы	44

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПОСТАНОВКИ КОНЕЧНЫМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ДЗЗ.....	46
2.1 Анализ диалоговых средств по постановке КП задачи мониторинга.....	46
2.1.1 Указание наименования (типа) объекта.....	50
2.1.2 Географическая локализация объекта.....	50
2.1.3 Временная локализация точки актуализации данных об объекте	51
2.1.4 Указание дополнительных свойств объекта для его локализации	52
2.1.5 Указание свойств объекта, которые необходимо определить.....	52
2.2 Разработка информационного процесса постановки КП задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ	54
2.2.1 Формирование базы априорных данных экспертом.....	57
2.2.2 Разработка диалога задания начальных признаков модели объекта	59
2.2.3 Разработка диалога задания параметров мониторинга	61
2.2.4 Формирование последовательности операторов разрешения поставленной задачи	62
2.2.5 Разработка диалога по оценке результатов разрешения поставленной задачи.....	65
2.3 Разработка алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта	68
2.3.1 Описание общей структуры алгоритма	68
2.3.2 Получение данных ДЗЗ.....	70
2.3.3 Предварительная обработка и подготовка данных.....	72
2.3.4 Использование вегетационных индексов в задачах мониторинга объектов подстилающей поверхности Земли.....	78
2.3.5 Локализация неоднородных областей объекта	82
2.3.6 Определение состояний неоднородных областей объекта	89
2.4 Выводы.....	93
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМА	95

3.1 Разработка программного обеспечения для решения поставленной задачи .	95
3.1.1 Разработка базы данных пространственного объекта.....	97
3.1.2 Подсистема получения данных.....	101
3.1.3 Подсистема обработки ГПД.....	104
3.1.4 Разработка web-интерфейса системы.....	108
3.2 Результаты тестирования	114
3.2.1 Экспериментальные исследования алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта.....	114
3.2.2 Корреляционный анализ значений NDVI, полученных со спектрометра и в результате обработки спутниковых изображений	117
3.2.3 Корреляционный анализ значений NDVI и ряда вегетационных индексов	133
3.3 Выводы.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Справки о внедрении	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Исследование земной поверхности с применением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является востребованным направлением в научных исследованиях во всем мире. Данные ДЗЗ служат источником актуальной и независимой информации о наблюдаемых объектах, позволяющей осуществлять на регулярной основе мониторинг больших территориальных пространств, отдельных объектов или явлений. Дистанционный мониторинг нашел широкое применение в различных областях: нефтегазовой отрасли, лесоохране, гидрологии, предотвращении чрезвычайных происшествий, сельском хозяйстве и т.д.

В сельскохозяйственной отрасли на основе методов дистанционного мониторинга решается целый ряд тематических задач: оценка состояния и использования полей севооборотов, параметров плодородия почв и их деградации, состояния растительного покрова на пашне, залежах, сенокосных и пастбищных угодьях, прогнозирование урожайности и др. Данные работы развиты в трудах зарубежных и российских исследователей: Boryan C. Z., Johnson D., Wang C., Yang Z., Барталева С. А., Кашкина В. Б., Лупяна Е. А., Савина И. Ю., Сапрыкина Е. И., Шевырногова А. П. и др. Работы этих исследователей посвящены развитию различных аспектов обработки данных ДЗЗ, геоинформационных технологий, в том числе в области решения тематических задач агромониторинга.

Объектом агромониторинга являются земли сельскохозяйственного назначения (ЗСХН), для которых заданы требования к форме и пространственной структуре. Изменения, наблюдаемые на аэрокосмических снимках данных объектов, связаны с естественным ходом вегетации (сменой фенологических фаз), погодными условиями и проводимыми агротехническими мероприятиями (АТМ). В ряде случаев, результатом их влияния является изменение пространственной структуры объекта, проявляющейся в неравномерном развитии сельскохозяйственной культуры в пределах контура объекта. Таким образом, данный класс объектов мониторинга относится к классу пространственных

объектов с динамически изменяющейся структурой. Как показал обзор литературы, методы агромониторинга указанного класса объектов развиты недостаточно.

К настоящему времени в работах Claramunt B., Molenaar M., Nandal R., Ott T., Reuquet D., Renolen A., Yuan M., Королева Ю.К., Тикунова В.С. и др. сформированы общие принципы оперирования пространственно-временными аспектами динамически изменяющихся пространственных объектов. Разработаны событийно-ориентированная модель, трехдоменная модель, модель исторического графа и др. Однако рассмотренные модели ориентированы на представление объектов, изменяющих свои границы с течением времени, при этом недостаточно развит вопрос оперирования объектами с динамически изменяющейся структурой.

Кроме того, в литературе не получили достаточного развития методологические аспекты построения систем дистанционного агромониторинга, ориентированные на конечных пользователей (КП). В рассматриваемой проблемной области это – лица, принимающие решения, которые являются постановщиками задач дистанционного наблюдения хода вегетации и агротехнических мероприятий, проводимых на сельскохозяйственном объекте и потребителями результатов наблюдения, способными интерпретировать оценки состояния объекта. Таким образом, актуальны исследования и разработка моделей, методов и алгоритмов автоматизированного анализа и интерпретации пространственной структуры объектов по данным ДЗЗ, ориентированных на конечных пользователей.

Цель работы. Разработка методологических и алгоритмических аспектов взаимодействия конечных пользователей с системами агромониторинга для оказания информационной поддержки решения задач мониторинга объектов неоднородной динамически изменяющейся пространственной структуры (типа «земля сельскохозяйственного назначения») по данным дистанционного зондирования Земли.

Объектом исследования в диссертационной работе является пространственный объект сельскохозяйственного назначения с неоднородной

динамически изменяющейся структурой, представленный совокупностью данных дистанционного зондирования Земли и контекстной информации.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы информационной поддержки решения задач мониторинга пространственного объекта с неоднородной динамически изменяющейся структурой, ориентированные на конечного пользователя.

Решаемые задачи.

1. Анализ признаков пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой (земля сельскохозяйственного назначения) и разработка его информационной модели.

2. Разработка модели информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, предназначенная для использования конечным пользователем.

3. Разработка алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта, учитывающего ограничения значений признаков размера и формы неоднородностей.

4. Разработка системы агромониторинга, предназначенной для конечного пользователя, базирующейся на получении космических снимков для последующей обработки и анализа.

5. Экспериментальная апробация разработанных моделей и алгоритма.

Научная новизна.

1. Разработана динамическая модель пространственного объекта «земля сельскохозяйственного назначения», отличающаяся учетом его неоднородной пространственной структуры, позволяющая отслеживать изменение состояния объекта во времени в автономном режиме на основе анализа признаков неоднородных областей объекта.

2. Разработана модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, отличающаяся применением диалоговых средств, предназначенных для использования конечным

пользователем, позволяющая сформулировать задачу мониторинга пространственного объекта.

3. Разработан алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта, отличающийся учетом ограничений значений признаков размера и формы неоднородностей, позволяющий сформировать альтернативные объектно-реляционные структуры пространственного объекта.

Практическая значимость. Представленные в работе модели и алгоритм реализованы программно, обеспечены методически и встроены в систему агромониторинга на основе действующего программно-аппаратного комплекса центра ДЗЗ Сибирского федерального университета. Разработанная система применяется в масштабах ряда сельскохозяйственных предприятий и в отделе сельского хозяйства Сухобузимского муниципального района на основе открытых технологий. Результаты диссертационной работы были использованы при реализации проектов: грант ККФН «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель на примере Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот» в 2011 г.; грант РФФИ «Интеллектуальная технология активного экологического мониторинга освоения природных ресурсов по данным дистанционных и наземных исследований» в 2014 г.; грант ККФН «Региональная автоматизированная система космического мониторинга муниципальных районов Красноярского края» в 2014 г.; грант ККФН «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края» в 2015 г.; грант ККФН «Создание системы мониторинга динамики структуры естественных и антропогенных объектов с высокой степенью изменчивости на основе использования открытых спутниковых данных» в 2015 г.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы анализа изображений, сегментации и постсегментации изображений, обработки данных дистанционного зондирования Земли, проектирования информационных систем, системного анализа, ГИС-технологии,

теория графов, унифицированный язык моделирования UML, технология структурного анализа и проектирования SADT.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена практическими работами, выполненными по реальным данным, с использованием наземных, натурных экспериментов. Также достоверность подтверждается корректным использованием существующих, теоретически обоснованных и проверенных на практике методов предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Информационная динамическая модель пространственного объекта «земля сельскохозяйственного назначения».

2. Модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ.

3. Алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта, учитывающий ограничения признаков размера и формы неоднородностей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: IX Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов), г. Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2011 г.; X Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», г. Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2012 г.; Международная научно-практическая конференция «Робототехника и искусственный интеллект» (РИИ-2012), г. Железногорск Красноярского края, Центр прикладных исследований СФУ, 7 декабря 2012 г.; XI Международная конференция «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» PRIA-11-2013, г. Самара, 24–29 сентября 2013 г.; V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект» (РИИ-13), г. Железногорск

Красноярского края, Железногорский филиал СФУ, 15 ноября 2013 г.; I Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», г. Красноярск, ИКИТ СФУ, 23–26 сентября 2014 г.; Всероссийская конференция «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов», с. Усть-Сема, Республика Алтай, 24–28 августа 2015 г.; II Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформационные технологии в решении задач рационального природопользования», г. Ханты-Мансийск, Югорский НИИ, 20–21 октября 2015 г.; III Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», г. Красноярск, ИКИТ СФУ, 13–16 сентября 2016 г.

Внедрение результатов работы. Основная часть результатов работы была получена при выполнении государственных контрактов:

- грант Красноярского краевого фонда науки в 2011 г. «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель на примере Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот»;
- грант Российского фонда фундаментальных исследований в 2014 г. «Интеллектуальная технология активного экологического мониторинга освоения природных ресурсов по данным дистанционных и наземных исследований»;
- грант Красноярского краевого фонда науки в 2014 г. «Региональная автоматизированная система космического мониторинга муниципальных районов Красноярского края»;
- грант Красноярского краевого фонда науки в 2015 г. «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края»;
- грант Красноярского краевого фонда науки в 2015 г. «Создание системы мониторинга динамики структуры естественных и антропогенных объектов с высокой степенью изменчивости на основе использования открытых спутниковых данных».

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационное исследование соответствует области исследований специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики по п. 1 «Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей», п. 5 «Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений» и п. 7 «Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания».

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 14 статей, из них 5 – в журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве изданий, рекомендуемых для опубликования научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, 5 свидетельств о регистрации программ, зарегистрированных в Российском реестре программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации включает 159 страниц. Изложение иллюстрируется 69 рисунками и 18 таблицами. Список литературы на 14 страницах содержит 125 наименований. В приложении приведены документы о внедрении и практическом использовании результатов диссертации.

1 АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

1.1 Постановка задачи

Задан объект исследования – пространственный объект сельскохозяйственного назначения с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой, который характеризуется однородной растительностью. Таким объектом является земля сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) – далее объект или поле.

Требуется организовать информационный процесс постановки конечным пользователем задачи мониторинга объекта, позволяющий локализовать неоднородную динамически изменяющуюся пространственную структуру объекта (далее – неоднородности), возникающую внутри его контура в результате естественных природно-климатических (смена фенологических фаз) и техногенных (агротехнические мероприятия) воздействий. Результат локализации представить в форме карты неоднородностей.

Землями сельскохозяйственного назначения являются пашни, сенокосы, пастбища, залежи, земли, занятые многолетними насаждениями. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 30.07.2010 г. № 1292-р «Об утверждении концепции развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 года» необходимо осуществлять мониторинг состояния всхожести сельскохозяйственных культур и агротехнических мероприятий, проводимых в соответствующие заданные сроки, начиная от ранневесеннего боронования земель и заканчивая вспашкой зяби.

Под мониторингом понимается процесс измерения заданных параметров наблюдаемого объекта на заданном промежутке времени для оценки его

состояния и своевременного принятия управляющего решения в случае значительного отклонения нормативных значений измеряемых параметров от заданной нормы.

Целью агромониторинга является наблюдение хода сезонной вегетации, локализация аномальных проявлений, отслеживание АТМ и их результатов для оказания информационной поддержки КП в процессе решения задач дистанционного агромониторинга, связанного с определением неоднородностей.

С точки зрения сельскохозяйственной отрасли, конечными пользователями являются инженеры с/х предприятий, агрономы, представители контролирующих органов, агроэкологии, которых можно обобщенно назвать конечными пользователями – постановщиками задачи мониторинга (рисунок 1.1).

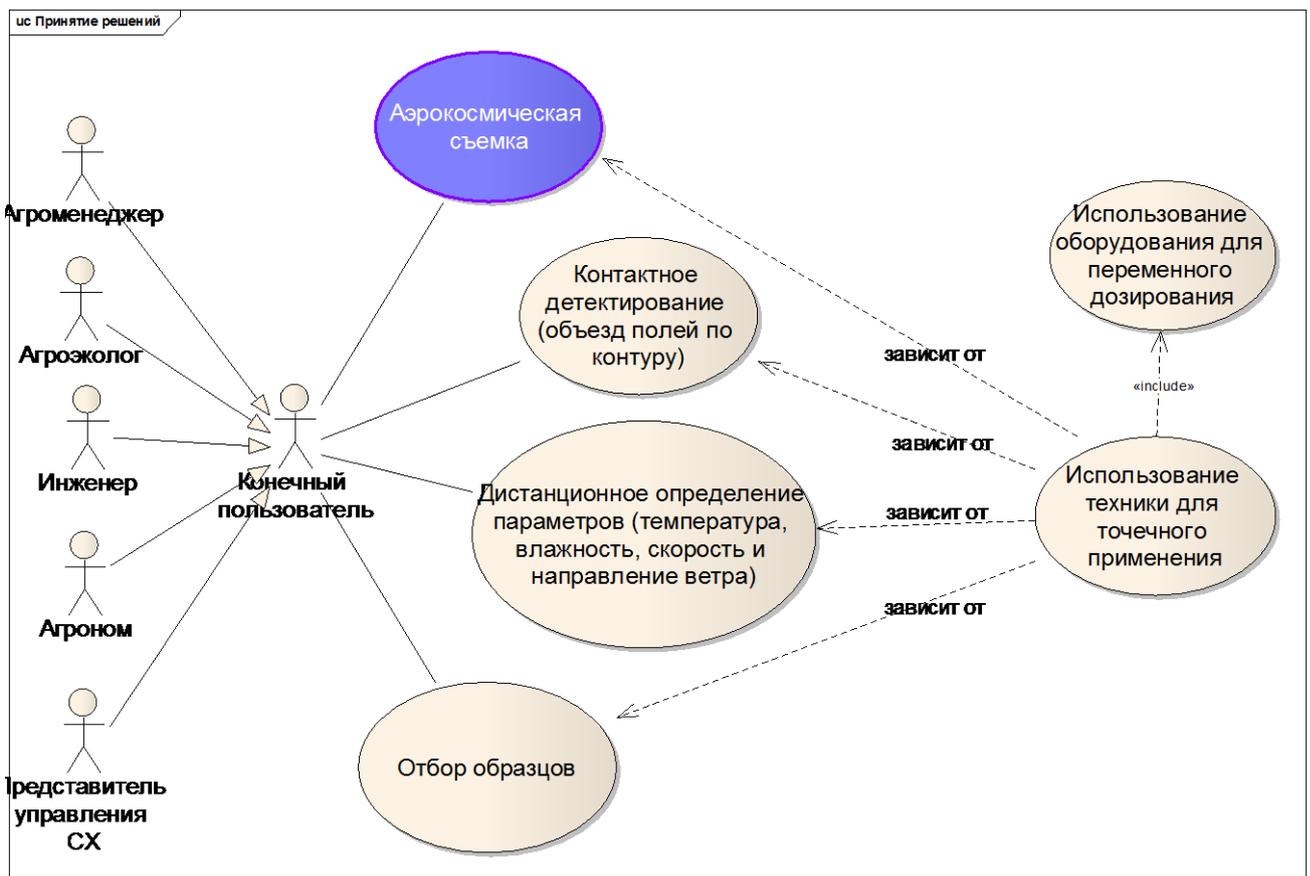


Рисунок 1.1 – Стратегия принятия решений КП, основанная на контролирующем подходе

Определение неоднородностей [28] и их состояния находит свое применение в рамках задач точного земледелия и требуется, наравне с данными полевых

исследований и информацией о химическом составе почв, для поддержки КП в принятии решений о точечном применении специализированных технических средств для дифференцированной обработки тех неоднородных участков, которые, в зависимости от выявленного состояния, этого требуют. Точечное применение техники оптимизирует затраты на обработку полей. При этом различают следующие подходы к принятию решений с учетом неоднородностей, описанные в работах В.В. Якушева и В.П. Якушева [77, 78]: прогностический и контролирующий подход.

Суть прогностического подхода состоит в анализе статистических показателей: истории изменения во времени показателей химического, гранулометрического состава, электропроводности почвы, используемых севооборотов и др. Суть контролирующего подхода состоит в регулярной актуализации статистических показателей в течение вегетационного периода. Актуализация показателей основывается на следующих мероприятиях:

- Отбор образцов почвы и биомассы для взвешивания, измерения химического состава и пр.
- Дистанционное определение температуры, влажности, скорости и направления ветра и пр.
- Контактное детектирование, основанное на использовании техники с прикрепленными датчиками биомассы.
- Аэросъемка или космосъемка, суть которой состоит в обработке мультиспектральных данных для выделения биофизических параметров культуры.

В диссертационной работе рассматривается аэрокосмическая съемка, в частности, спутниковый мониторинг в рамках контролирующего подхода в процессе управления объектами «ЗСХН».

«ЗСХН», как сельскохозяйственный объект, представляет собой статичный в пространстве объект с прямоугольным внешним контуром с соотношением сторон 1:2 или трапециевидным контуром, в котором углы при скошенных сторонах не менее 60°. Такая форма объекта является наилучшей с точки зрения

ведения сельскохозяйственных работ. При неправильной форме поля снижается производительность труда, увеличивается количество холостых прогонов техники, повышается расход горючего и все это приводит к увеличению коэффициента затрат на возделывание сельскохозяйственных культур.

Однако на практике, при закладке полей, не всегда удается достичь нормативной формы. Так, агроландшафты центральной группы районов Красноярского края зачастую характеризуются мелкоконтурностью, наличием колков, сложной формой границ, малой (менее 100 га) площадью. В целом объект обладает статичными контурами, определенными естественными природными (неровностями рельефа, оврагами, лесными массивами и водными объектами) или искусственными объектами (дорогами, строениями, лесополосами, границами населенных пунктов, коммуникациями).

Следующим приближением рассматриваемого объекта является термин «сельскохозяйственный полигон» [19, 49], т. е. земля, ограниченная сельскохозяйственным контуром и занятая однородной растительностью.

Особенностью исследуемого объекта является возникновение пространственных неоднородностей внутри его контура в результате естественных природно-климатических (смена фенологических фаз) и техногенных (АТМ) воздействий. Это определяет неоднородность структуры объекта, причем характер неоднородности также обладает изменчивостью во времени Tm (рисунок 1.2).

Как показали исследования динамики вегетации на полях Сухобузимского района Красноярского края (порядка 1500 полей в период с 2013 по 2016 гг.), свойством однородности на протяжении всего сезона вегетации обладают лишь порядка 30 % сельскохозяйственных контуров.

С позиции АТМ объект может находиться в следующих состояниях f^{wi} , сформированных на основе плана АТМ (таблица 1.1): f^{w1} – боронование, f^{w2} – посев, f^{w3} – подкормка, f^{w4} – химическая прополка, f^{w5} – уборка, f^{w6} – вспашка. Сельскохозяйственная культура также может находиться в определенных состояниях f^{vi} , которые описываются фенологическими фазами,

имеющими определенный порядок следования во времени. Так, фазы для рассматриваемых в работе зерновых культур описывают следующие состояния объекта: f^{v0} – зарастание, f^{v1} – всхожесть, f^{v2} – кущение, f^{v3} – выход в трубку, f^{v4} – колошение, f^{v5} – цветение, f^{v6} – восковая спелость, f^{v7} – твердая спелость. На каждой из фаз вегетации с/х культура может перейти в состояние f^{v8} – деградация, что сигнализирует об отклонении развития культуры от нормы.

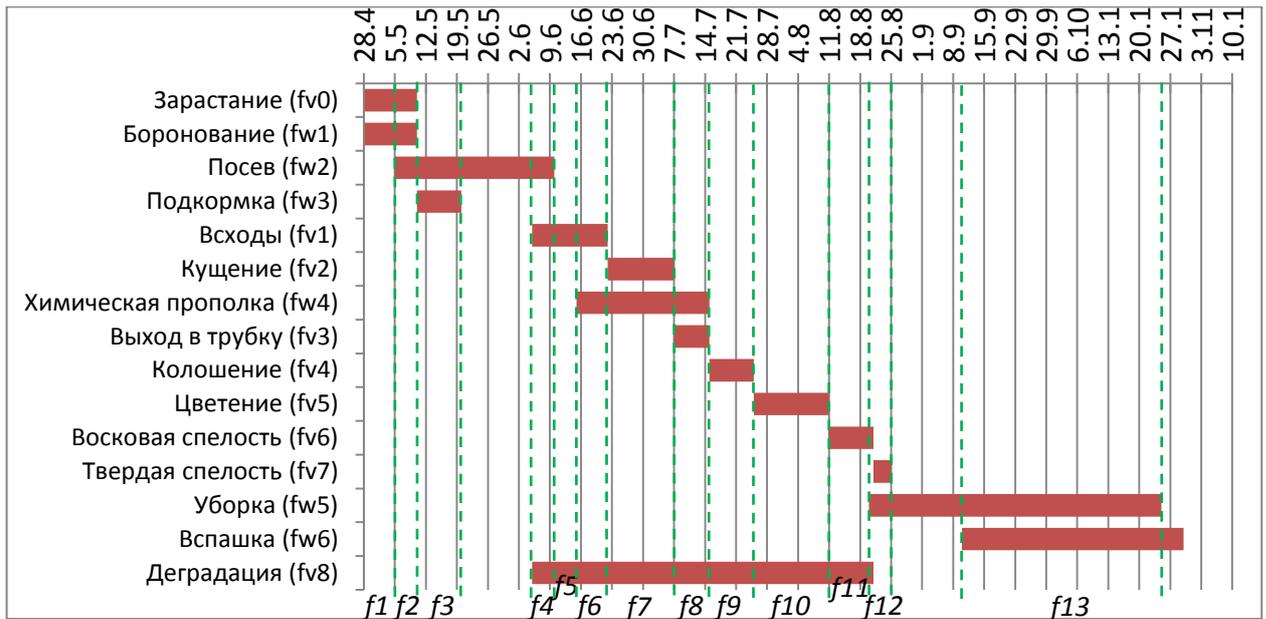


Рисунок 1.2 – Динамика изменения состояний объекта «ЗСХН» во времени

Для того чтобы принять решение о точечном применении техники, необходимо определить, в каком состоянии находится та или иная неоднородная область. С позиции АТМ и фенологических фаз объект может находиться в различных состояниях, которые приведены на диаграмме на рисунке 1.2.

На диаграмме по оси X расположены даты, а по оси Y расположены f^i состояния объекта, которые характерны для того или иного диапазона времени.

Пересечение нормативных диапазонов времени нахождения объекта в том или ином состоянии (красные линии на диаграмме) приводит к неоднородности структуры объекта и необходимости рассматривать составные состояния объекта, которые можно представить в форме диаграммы состояний и переходов G_i (рисунок 1.3):

$$G_i = (F, R), \tag{1.1}$$

где F – множество состояний объекта:

$$F = f^{vi} \cup f^{wj}; \tag{1.2}$$

R – совокупность переходов состояний:

$$R = r^1 \cup r^2 \cup r^3, \tag{1.3}$$

r^1 – множество операторов, описывающих развитие с/х культуры во времени (естественная смена фенофаз); r^2 – множество операторов, описывающих аномальные проявления в развитии с/х культуры; r^3 – множество операторов, моделирующих проведение АТМ.

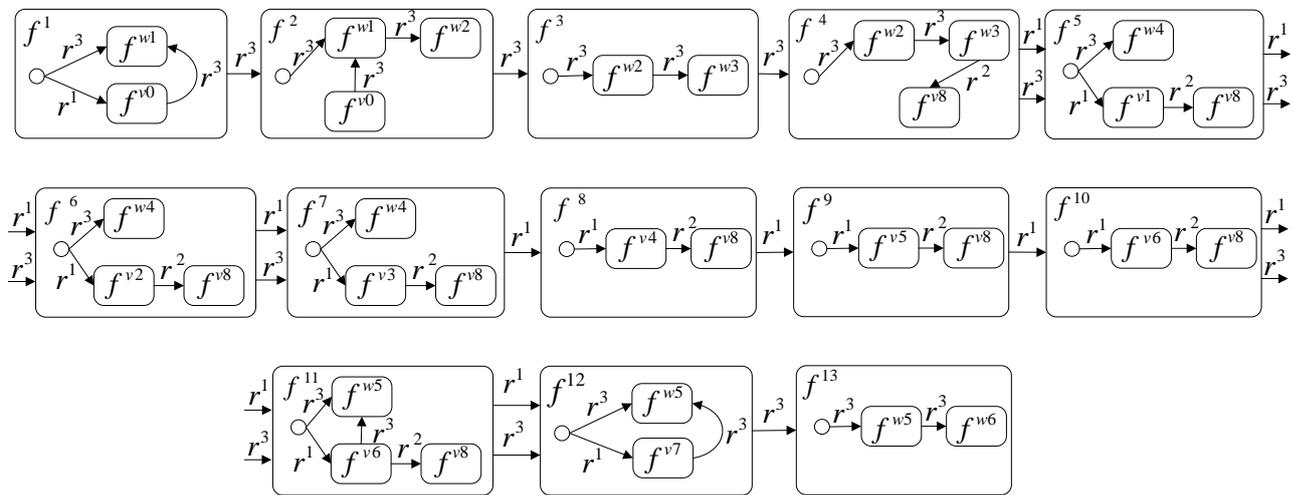


Рисунок 1.3 – Диаграмма изменения состояний объекта мониторинга во времени под воздействием естественных и техногенных факторов

Для отслеживания и интерпретации изменений, происходящих в структуре объекта, применимы методы ДЗЗ. С позиций организации спутникового мониторинга, важно выделить набор признаков, детектируемых на цифровых изображениях объекта, и установить связи между значениями признаков, фиксируемых на изображении с одной стороны и элементами множества F с другой. Неоднородности на спутниковом изображении представлены совокупностью сегментов, различающихся спектральными характеристиками. Примеры объектов неоднородной структуры приведены на рисунке 1.4.

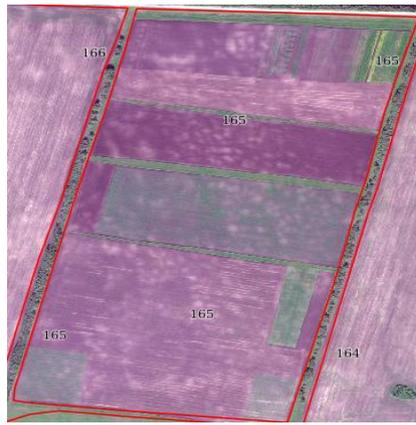
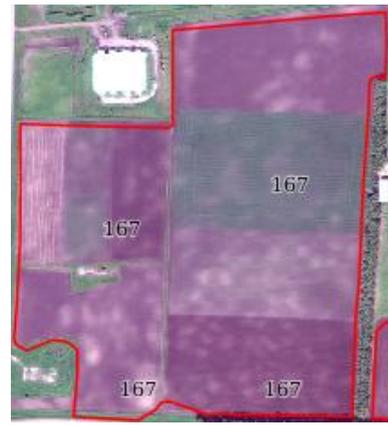
*a**б**в**г*

Рисунок 1.4 – Неоднородности внутри контуров: *a, б* – № 165, 167 по данным сверхвысокого разрешения WorldView-2 (0,5 м); *в* – № 686 по данным высокого разрешения Spot-6 (6 м); *г* – № 691 по данным среднего разрешения Landsat-8 (30 м)

Область изображения θ_i , интерпретируемая как объект, характеризуется вектором иконических признаков $Z = \{z_i\}$. Значение отдельного признака представляет собой числовую величину, усредненную по всем значениям пикселей, относящихся к объекту. Исследования, проведенные в работах [52, 73], показывают высокую корреляцию между измерениями на изображениях и свойствами растительного покрова. Это позволяет формулировать задачу синтеза эталонной функции s , сопоставляющей положение образа θ_i в признаковом пространстве и наблюдаемого состояния f^i объекта «ЗСХН».

Для θ_i , характеризующихся внутренней неоднородностью, прежде, чем проводить интерпретацию состояния соответствующего им поля, необходимо

осуществить сегментацию θ_i на области w_i , удовлетворяющие заданным критериям однородности. В отличие от θ_i , пространственные координаты которых фиксированы, положение w_i в пространстве требует локализации. Кроме того, в вектор признаков Z , формируемый для w_i , помимо иконических признаков, необходимо включить метрические характеристики, физическая интерпретация которых говорит о положении и форме неоднородностей внутри поля.

1.2 Описание признаков пространственного объекта

Каждое состояние f^i характеризуется набором признаков, которые являются существенными для распознавания, локализации и интерпретации неоднородностей объекта, а также которые необходимы для локализации области мониторинга конечным пользователем.

В рамках информационной поддержки КП при решении задачи дистанционного мониторинга пространственного объекта требуется, чтобы модель объекта учитывала следующие требования:

- средства представления нормативной траектории изменения объекта во времени;
- средства представления результатов измерения фактического (актуального) состояния объекта;
- средства анализа и представления результатов сравнения фактического состояния объекта с нормативным.

Концептуально объект характеризуется следующими группами характеристик, существенных для организации системы мониторинга:

- 1) Пространственная локализация (точные географические координаты объекта с учетом топологических особенностей).
- 2) Наименование и сорт сельскохозяйственной культуры текущего полевого сезона.
- 3) График сезонного хода вегетации, проявляющийся в смене фенологических фаз культуры.

4) Возможные аномалии (в привязке к фенофазам), такие как невсхожесть, переувлажнение почвы, засуха, засоренность и т. д.

5) Техногенное воздействие, выраженное в планируемых и осуществляемых агротехнических мероприятиях (АТМ) (таблица 1.1).

6) Характеристики сельскохозяйственной культуры (такие как интегральное состояние, фенологические фазы).

Для решения задачи распознавания неоднородностей на цифровых спутниковых изображениях в целях информационной поддержки КП в процессе дистанционного мониторинга объектов «ЗСХН» необходим перевод изображения от иконического уровня к уровню геометрических и реляционных структур, как описано в работах [17, 69].

В условиях описанных выше особенностей объекта и цели мониторинга, объектно-реляционная модель объекта «ЗСХН» должна учитывать следующие признаки:

1. **Метрические признаки** включают

- **географические координаты** объекта в заданной проекции $P_{\Pi} = \{(x_i, y_i)\}$, описывающие положение объекта в пространстве;

- **площадь** для объекта многоугольной геометрической формы, вычисляемая по формуле [10]:

$$NS = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|, \quad (1.4)$$

где $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ – последовательность координат соседних друг другу вершин многоугольника, $(x_{i+1}, y_{i+1}) = (x_1, y_1)$;

- **периметр** объекта:

$$NP = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (1.5)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – число вершин контура;

- **толщина** объекта, позволяющая описать форму неоднородности и обеспечить возможность задания ограничений форм рассматриваемых неоднородных областей:

$$T = 4\pi(NS/NP^2). \quad (1.6)$$

2. **Спектральные признаки** описывают объект в различных спектральных диапазонах. Для распознавания структуры «ЗСХН» хорошо себя зарекомендовал вегетационный индекс нормированной разности (NDVI) [25, 73]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1.7)$$

где NIR – значение в спектральном канале, соответствующему ближнему инфракрасному диапазону с длиной волны 0,76–1 мкм; RED – значение в спектральном канале, соответствующему видимой части спектра с длиной волны от 0,6–0,76 мкм (красной части спектра).

3. **Временные признаки** (Tm) характеризуют дискретные изменения состояний объекта.

Помимо перечисленных признаков для локализации объекта КП в процессе постановки задачи мониторинга важно учитывать разнородную семантическую информацию, связанную с объектом и описывающую особенности развития объекта во времени. К ней относятся:

- сельскохозяйственные культуры $K = \{k^i\}$, обладающие своей моделью развития во времени;
- события, запланированные во времени, влияющие на изменение состояния объекта $E = \{e^i\}$. С позиций информационной модели объекта под событиями понимается множество запланированных во времени АТМ (таблица 1.1).
- множество фенологических фаз $\varphi = \{\varphi^i\}$;
- множество состояний объекта F (выражение (1.3)). На цифровом спутниковом изображении под состоянием объекта понимаются значения спектральных признаков, рассчитанных в заданные временные интервалы, их

нормативных значений и контекстных описаний, позволяющих сопоставить локализованному участку w_i области изображения θ_i состояние f^i .

Эти данные являются входными и получены в результате взаимодействия с администрацией Сухобузимского района, ФГБУ Государственный центр агрохимической службы «Красноярский» и Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр).

1.3 Формализация модели объекта

На основе описанного пространства признаков информационная модель исследуемого объекта «ЗСХН» выглядит следующим образом:

$$ЗСХН = \langle ID, P_{II}, NS, NP, T, N, Tm, K, E, \varphi, F \rangle, \quad (1.8)$$

где ID – идентификатор (номер поля); P_{II} – множество координат объекта: $P_{II} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, где x, y – координаты широты и долготы точки соответственно; NS – площадь; NP – периметр; T – толщина; N – множество диапазонов значений $NDVI$, соответствующих определенной оценке состояния объекта; Tm – множество диапазонов времени изменения состояний объекта.

Выражение (1.8) описывает объект «ЗСХН» в объектно-реляционном представлении, что, с одной стороны, позволит вычислять спектральные и метрические признаки неоднородностей и установить взаимосвязи между этими признаками в заданные диапазоны времени, а с другой стороны, представить результаты локализации неоднородностей в виде карты неоднородностей.

Данная структура позволяет учитывать неоднородную пространственную динамически изменяющуюся структуру объекта. Она используется КП при постановке задачи мониторинга и оценке результатов мониторинга.

1.4 Описание исходных данных

Исходными данными для решения задачи информационной поддержки дистанционного мониторинга пространственного объекта являются:

- карта ЗСХН, на примере Сухобузимского района Красноярского края, верифицированная полевыми измерениями и данными сельскохозяйственных предприятий (СХП);

- технологическая карта, которая представлена планом агротехнических мероприятий, описывающим сроки проведения агротехнических мероприятий для зерновых культур, предоставленным отделом сельского хозяйства администрации Сухобузимского района (таблица 1.1);

Таблица 1.1 – Сроки проведения основных агротехнических мероприятий по выращиванию сельскохозяйственных культур

№ п/п	Выполняемая операция	Сроки работ	
		начало	окончание
1	2	3	4
I.	Ранневесеннее боронование	28.04	10.05
II.	Возделывание пшеницы яровой		
	1) Посев	05.05	10.06
	2) Химпрополка		
	а) первая обработка против болезней и вредителей	15.06	15.07
	б) вторая обработка против болезней и вредителей	10.07	15.08
	3) Уборка	25.08	15.10
III.	Возделывание ячменя		
	1) Посев	05.05	10.06
	2) Химпрополка		
	а) первая обработка против болезней и вредителей	15.06	15.07
	б) вторая обработка против болезней и вредителей	10.07	15.08
	3) Уборка	20.08	15.10
IV.	Возделывание овса		
	1) Посев	25.05	10.06
	2) Химпрополка		
	а) первая обработка против болезней и вредителей	15.06	15.07

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
	б) вторая обработка против болезней и вредителей	10.07	15.08
	3) Уборка	10.09	25.10
V.	Возделывание озимой ржи		
	1) Посев	20.08	10.09
	2) Подкормка	10.05	20.05
	3) Уборка	10.08	20.08
VI.	Возделывание кукурузы на сенаж		
	1) Посев	01.06	10.06
	2) Уборка, закладка в ямы	20.09	30.09
VII.	Возделывание рапса на зерно		
	1) Посев	10.06	25.06
	2) Химобработка	01.07	20.07
	3) Десикация	10.09	15.09
	4) Уборка	15.09	30.09
VIII.	Вспашка зяби		
		10.09	30.10

- спутниковые изображения среднего и высокого пространственного разрешения, доступные в архиве Региональной системы дистанционного зондирования Земли (РС ДЗЗ) и открытом архиве американской геологической службы (USGS);

- классификатор зерновых сельскохозяйственных культур;
- фенологические фазы зерновых сельскохозяйственных культур с указанием сроков, характерных для широт исследуемой территории, уточненных экспертом ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»;
- критерии однородности, полученные в результате полевых исследований, характерные для рассматриваемых тестовых объектов с зерновыми культурами на территории Сухобузимского района Красноярского края.

1.5 Анализ моделей пространственного объекта

Основываясь на требуемой модели пространственного объекта (1.8), проанализируем современное состояние исследований в области решения такой

актуальной проблемы, как моделирование пространственных объектов, изменяющихся с течением времени.

В настоящее время существует значительное количество работ, посвященных мониторингу пространственных объектов и явлений, разработано немало число информационных систем, ориентированных на решение данного класса задач [24, 38, 39, 42, 44, 50, 54, 82, 84, 87].

В работах по моделированию пространственных объектов [11, 13, 16, 30, 101] принято разделять пространственные модели и пространственно-временные модели объектов, соответственно, не учитывающие и учитывающие параметр времени. На рисунке 1.5 показана классификация основных видов моделей, представленных в литературе.

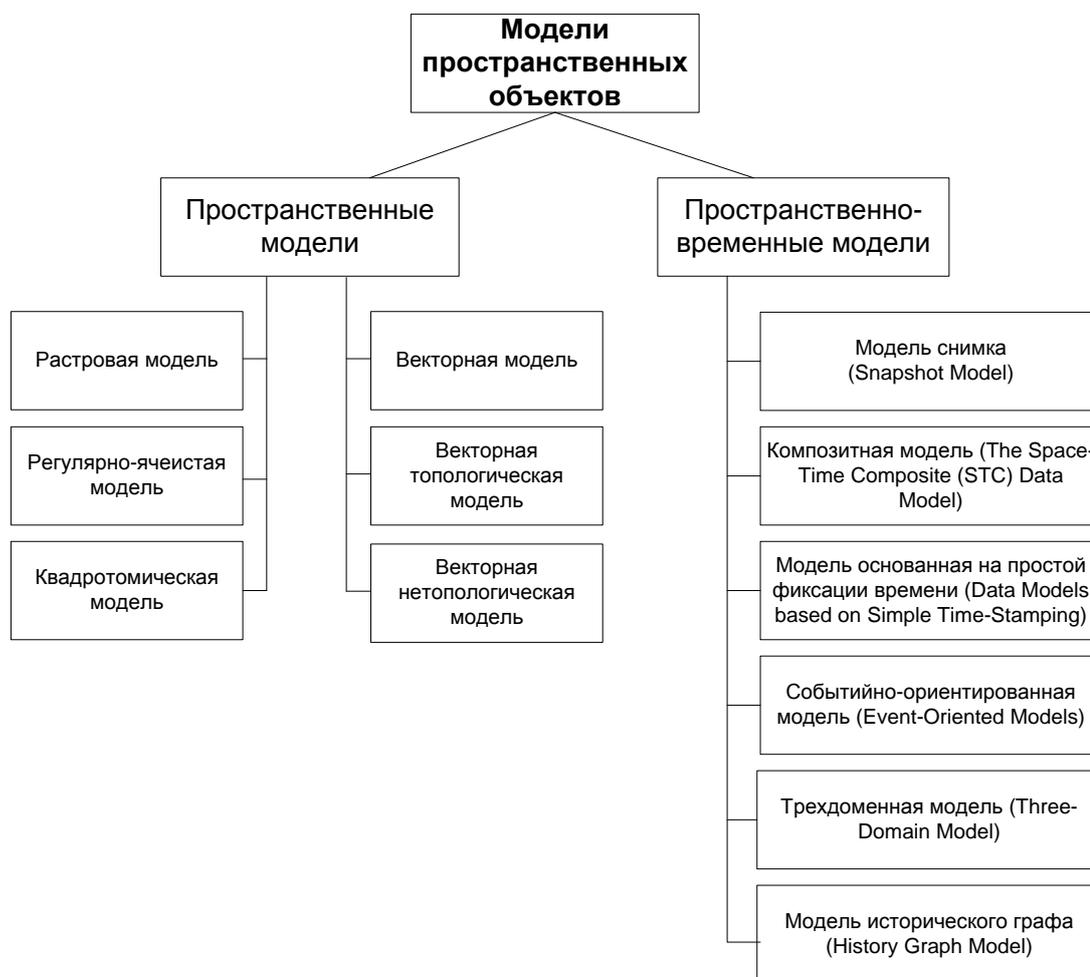


Рисунок 1.5 – Модели пространственных объектов

Рассмотрим данную классификацию более подробно с позиции соответствия предмету исследования.

1.5.1 Растровая модель пространственных объектов

Растровая модель, или матричная модель, предполагает разбиение пространства с составляющими его пространственными объектами на аналогичные пикселям дискретные элементы, упорядоченные в виде прямоугольной матрицы. Для цифрового позиционирования точечного объекта при этом будет достаточно указать его принадлежность к тому или иному дискретному элементу, учитывая, что его положение однозначно определено номерами столбца и строки матрицы, что позволяет при необходимости вычислить координаты пикселя, либо его центраида или любого угла. Пикселю присваивается цифровое значение, определяющее имя или атрибут объекта. Аналогичным образом описываются линейные и полигональные объекты: каждый элемент матрицы получает значение, соответствующее принадлежности или непринадлежности к нему того или иного объекта (пример – рисунок 1.6).

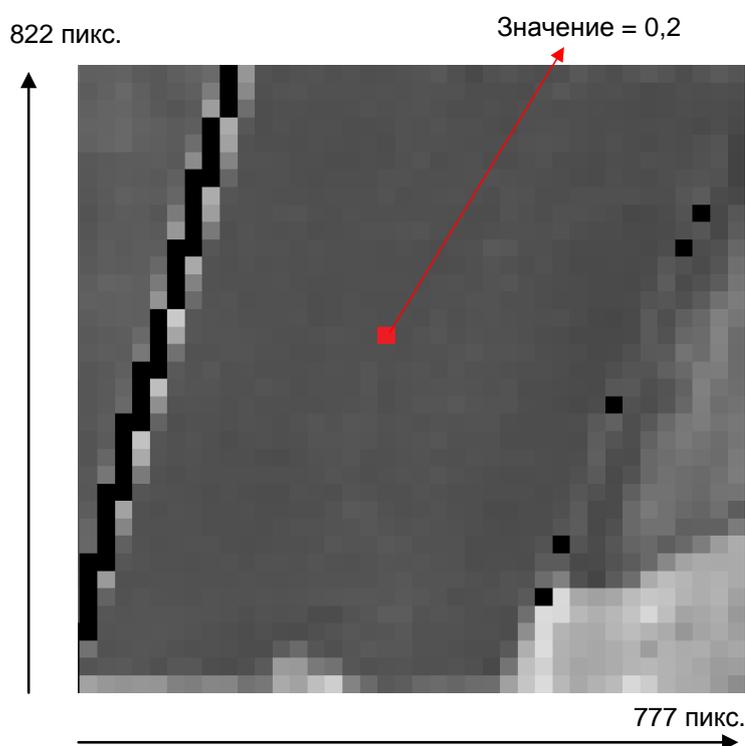


Рисунок 1.6 – Растровая модель пространственных объектов. Размерность матрицы 822x777, каждому элементу присвоено значение атрибута объекта

Полученная матрица образует растровый слой с однотипными объектами. Множество разнотипных объектов образует набор слоев, составляющих полное цифровое описание моделируемой предметной области. С каждым семантическим значением или кодом пикселя может быть связан неограниченный по длине набор атрибутов в различных вариантах представления, каждый из которых можно развернуть в производный слой, соответствующий размеру исходной матрицы.

Таким образом, пространственный объект в растровой модели можно выразить вектором иконических признаков $Z = \{z_i\}$, где каждый признак имеет числовое значение, относящееся или входящее в диапазон допустимых значений пикселей, характеризующих объект.

Особенности данной модели следующие:

- не обязательное разделение характеристик объекта на позиционную и семантическую составляющие;
- нет необходимости в особых средствах хранения и манипулирования метрикой и семантикой пространственных объектов, как это принято в векторных моделях;
- упрощаются аналитические операции, которые сводятся к попиксельному анализу с набором растровых слоев.

1.5.2 Регулярно-ячеистая модель данных

Регулярно-ячеистая модель схожа с растровой моделью пространственных объектов, поскольку также описывает объекты цифровых растровых изображений, состоящих из множества элементов – пикселей. Пиксель является далее не делимым элементом области изображения, содержащей пространственный объект. Пространство изображения, также как и в растровой модели, представляется в виде матрицы, элементы которой называются ячейками, содержащими некоторое множество атрибутов объекта, характеризующих принадлежность объекта к некоторому классу.

Однако, регулярно-ячеистая модель объекта идентична растровой модели в том случае, когда пиксель имеет квадратную (прямоугольную) форму. Таким

образом, отличие заключается в возможных формах ячеек. Применяются регулярные (или квазирегулярные) сети (решетки) с ячейками правильной треугольной, гексагональной или трапециевидной формы, равновеликих или квазиравновеликих. Несмотря на данное различие, регулярно-ячеистая модель может быть также описана вектором иконических признаков Z .

1.5.3 Квадратомическая модель данных

Квадратомическая модель пространственных объектов основана на подходе, известном как квадратомическое дерево или квадродерево. В его основе лежит разбиение изображения на вложенные друг в друга пиксели или регулярные ячейки (гомогенные блоки) с образованием иерархической древовидной структуры – декомпозиции пространства на участки правильной формы (квадраты, квадратные блоки, квадранты), каждый из которых делится рекурсивно на четыре вложенных до достижения некоторого уровня – числа Мортонa, обеспечивающего требуемую детальность описания объектов, эквивалентную разрешению изображения.

Основной целью использования данной модели является оптимизация использования машинной памяти для хранения данных по сравнению с растровой моделью.

В качестве примера данной модели можно привести некоторый упрощенный фрагмент растрового изображения, содержащий пять областей (полигонов) (рисунок 1.7, *а*) [11].

На первом этапе деления исходного участка на четыре квадратных блока (рисунок 1.7, *б*) и одновременном «ветвлении» квадродерева (рисунок 1.8) образуется один неделимый далее элемент № 1 (ему соответствует «лист» дерева на рисунке 1.8) и три «узла» делимых далее квадратов первого уровня иерархии. За исключением девяти гомогенных квадратов на втором иерархическом уровне все остальные элементы делятся далее, пока необходимость дальнейшего деления не будет исчерпана на последнем, четвертом этапе.

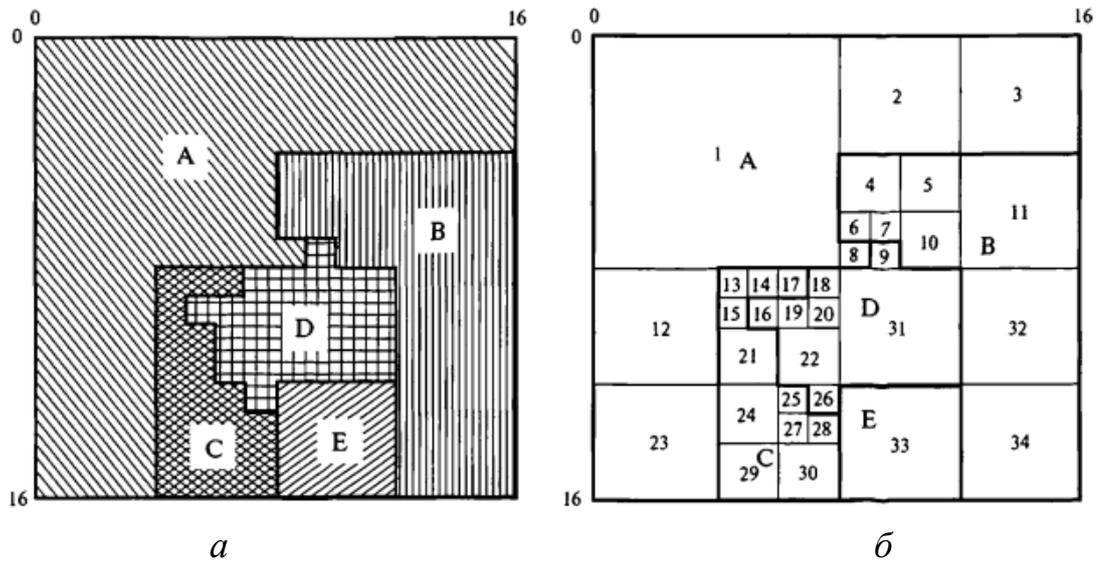


Рисунок 1.7 – Принцип разделения исходного изображения на участки правильной формы: *a* – исходный участок территории с пятью областями *A, B, C, D* и *E*; *б* – декомпозиция исходного участка на квадранты (1–34)

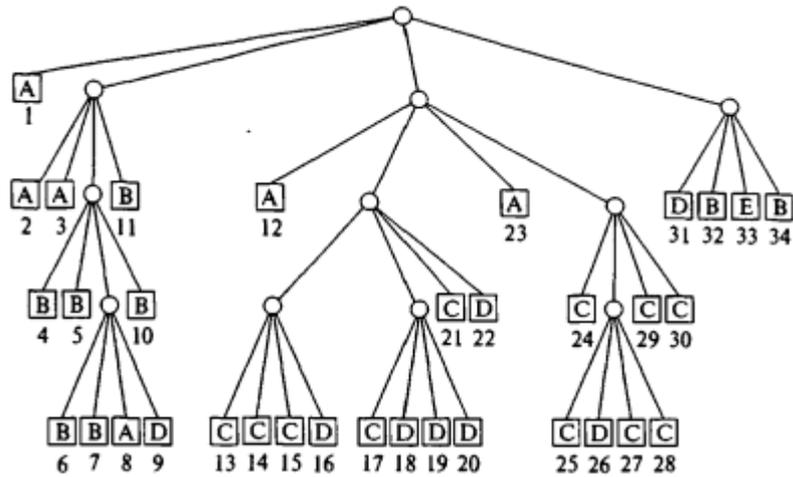


Рисунок 1.8 – Полученное квадродерево на основе декомпозиции изображения на рисунке 1.7, *a*

В данном подходе в отличие от предыдущих уже можно говорить о целостном представлении объекта, который изображен деревом однородных областей изображения, называемых квадрантами. В данном случае модель представления объекта может включать пространственные, текстурные, спектральные признаки:

$$M_O = \langle O_O, P_n, P_m, P_c \rangle, \tag{1.9}$$

где O_O – множество связанных однородных областей объекта.

Особенностью реализации этой модели является:

- Экономия программных и аппаратных ресурсов, которая значительней в сравнении с растровой моделью данных. Например, область E представлена одним квадратом под номером 33 (а не 16 элементами растра или ячеек регулярной сети), и ее цифровое описание подразумевает лишь формализованное представление структуры квадродерева, которое строится на основе матрицы Мортонa, определяющей оптимальный порядок ее кодирования и физической записи, обеспечивая оптимальный последовательный поиск.

- Большая эффективность при сохранении быстрого доступа к элементам описания пространственных объектов.

Квадротомическая модель практически реализована в немногих из известных программных средств ГИС (CGIS, Канада).

Она отличается от пирамидальных моделей, также рекурсивно организуемых и используемых при обработке цифровых изображений, включая данные дистанционного зондирования. В отличие от квадродерева, они представляют собой набор растровых слоев изображений с механически двукратно уменьшаемым разрешением, а потому более компактных, искусственно «загрубленных» в целях их быстрого воспроизведения.

1.5.4 Векторная модель пространственных объектов

Векторные модели разделяют на два типа:

- векторные топологические;
- векторные нетопологические.

Эти модели используются для цифрового представления точечных, линейных и площадных (полигональных) объектов. Векторная модель оперирует такими основными объектами, как точка, линия, полилиния, полигон, мультиполигон.

Множество точечных объектов, образующее набор однородных данных (например, населенные пункты), можно представить в виде векторного слоя с таблицей упорядоченных или неупорядоченных последовательностей записей, каждая из которых должна содержать по меньшей мере три атрибута: уникальный

идентификационный номер объекта, значение координаты X и значение координаты Y в некоторой системе координат. Векторная модель точечного объекта выглядит следующим образом:

$$M_{point} = \langle ID, X, Y \rangle, \quad (1.10)$$

где ID – идентификатор объекта; X и Y – пространственные координаты объекта.

Множество линейных объектов, к которым относятся кривые или границы полигонального объекта, могут быть представлены в виде последовательности образующих их точек, т. е. набором линейных отрезков прямых, образующих полилинию. Линейные объекты также представимы в виде векторного слоя, с которым ассоциируется таблица атрибутов, с тем отличием от точечных объектов, что запись линейного объекта, помимо идентификатора, характеризуется последовательностью координатных пар. Векторная модель линейного объекта выглядит следующим образом:

$$M_{line} = \langle ID, \{X\}, \{Y\} \rangle. \quad (1.11)$$

При описании множества полигонов каждый отрезок границы, заключенный между двумя узловыми точками (за исключением внешней границы полигонов), будет описан в этом случае дважды – по и против часовой стрелки. Такая модель данных для описания точечных, линейных и полигональных объектов носит наименование модели «спагетти». Она не является эффективной с точки зрения избыточности хранимых данных и возможностей использования аналитических операций. Другое ее наименование — векторная нетопологическая модель.

Векторная модель не учитывает иконических признаков объекта.

1.5.5 Векторная топологическая модель

Векторная топологическая модель связана с описанием полигональных объектов. Также модель носит название линейно-узловой. Главные элементы топологической модели (примитивы):

- промежуточная точка;
- сегмент (линейный сегмент, отрезок);
- узел;

- дуга;
- полигон (область, полигональный объект, многоугольник, контур, контурный объект):

- простой полигон, (рисунок 1.9, б);
- внутренний полигон, (рисунок 1.9, а);
- составной полигон, (рисунок 1.9, в);
- универсальный полигон (внешняя область) (рисунок 1.9, а).

Описание полигона в векторной топологической модели — это реляционная структура, содержащая следующие атрибуты:

$$M_{polygon} = \langle \Pi_O, P_{\Pi}, P_M, R_{\Pi} \rangle, \quad (1.12)$$

где Π_O — множество полигонов, составляющих объект, $\Pi_O \geq 1$. Но помимо этих элементов модели добавляются еще следующие: P_{Π} — множество пространственных атрибутов; P_M — множество метрических атрибутов; R_{Π} — множество пространственных топологических отношений между частями объекта.

Между этими элементами устанавливаются топологические отношения, необходимой характеристикой которых должна быть связь дуг и узлов, полигонов и дуг. Последним приписываются указатели разграничиваемых дугами правого и левого полигонов (рисунок 1.9, в).



Рисунок 1.9 – Виды полигонов

Соотношение между элементами векторной топологической модели пространственных объектов точечного, линейного и полигонального типов иллюстрируется на рисунке 1.10 [107].

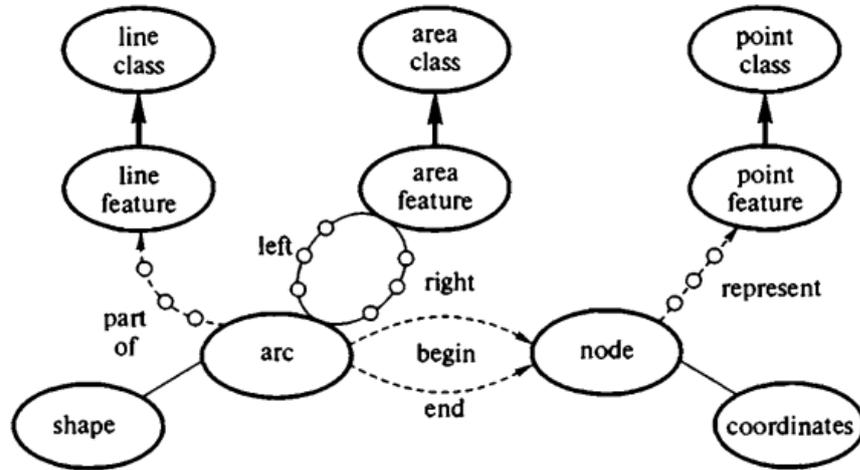


Рисунок 1.10 – Представление полигонального объекта в векторной топологической модели

Объекты точечного, линейного и полигонального типов (point, line, area features), дуги (arc), узлы (node), последовательности координат (coordinates), контуры (shape) связаны отношениями типа «часть чего-либо» (part of), «левый» и «правый» по отношению к чему-либо (left, right), «начало» и «конец» чего-либо (begin, end).

Связь между позиционными и атрибутивными характеристиками в топологической модели проиллюстрирована на рисунке 1.11 [32].

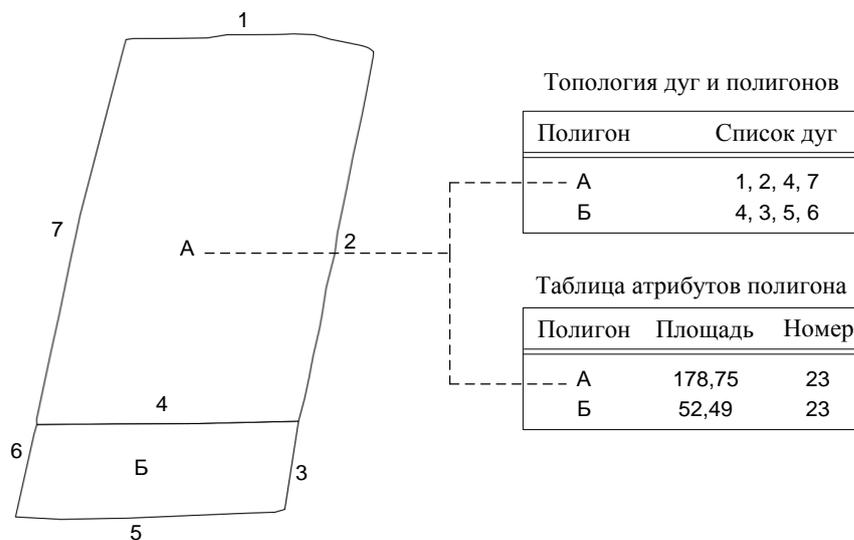


Рисунок 1.11 – Связь пространственной и атрибутивной части данных в векторном представлении полигонального слоя

1.6 Пространственно-временные модели объектов

Перечисленные выше модели не учитывают динамику изменения объекта во времени, следовательно, невозможно описать события, влияющие на изменения, и различать состояния объекта. Таким образом, следует рассмотреть модели, позволяющие фиксировать время. Такие модели называются пространственно-временными и описаны в работах [101, 104, 105, 110, 120].

1.6.1 Модель снимка

Модель снимка (The Snapshot Model) является наиболее популярной моделью данных. Существует и идентичная с данной модель Time Layers, которая, *описывая по сути пространственную модель объекта в растровом представлении, учитывает и временную составляющую*. Временная информация содержится в наборе растровых слоев, содержащих наблюдаемый объект, зафиксированный в определенный момент времени. Особенностью данной модели является:

- Хранение данных с регулярным интервалом времени. Данный пункт зависит от периодичности (повторяемости) орбитальной съемки.
- Отдельные наборы данных для каждого момента времени, т. е. один слой объектов повторяет весь набор атрибутов и не связан с предыдущим или последующим моментом фиксации времени.
- Классификация объектов не зависит от времени.

Данная модель не позволяет описывать геометрию объектов, изменяющуюся с течением времени. Каждый снимок или слой характеризует объект только в пространстве текстурных и спектральных признаков. В задачах проведения сравнительного анализа и выявления отличий одного объекта в разные моменты времени требуется сделать полный снимок, дублирующий даже те параметры, которые не изменяются.

Основываясь на растровой модели объекта (§ 1.5.1), опишем модель снимка следующим образом:

$$M_O = \langle L, T, P_{\Pi}, P_T, P_C \rangle, \quad (1.13)$$

где L – множество растровых изображений объекта, содержащих наблюдаемый объект в различные моменты времени T .

По сути, модель (1.13) является расширенной версией растровой за счет добавления множества одновременных изображений объекта.

Таким образом, данная модель подходит для решения задач, где нет необходимости проводить сравнительный анализ, а есть необходимость фиксировать параметры объектов в заданный момент времени.

1.6.2 Композитная модель

Композитная пространственно-временная модель данных (The Space-Time Composite (STC) Data Model) была предложена в работе [98]. Эта векторная модель представления объектов учитывает динамику изменения объекта с течением времени (рисунок 1.12).

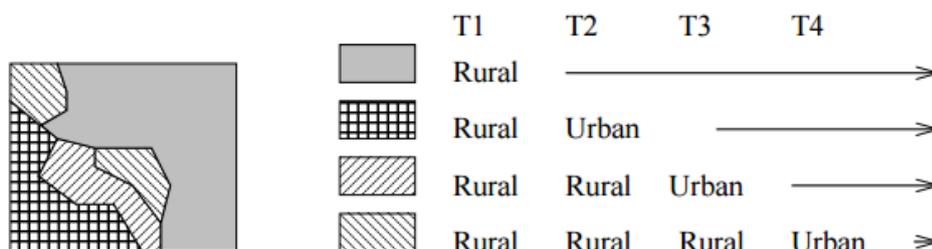


Рисунок 1.12 – Пример композитной модели объектов

Изменения объекта фиксируются в различные моменты времени, после каждого измерения объект добавляется к уже существующему слою, образуя композит. На композите объект представляет собой множество полигонов, которые могут пересекаться между собой, разделяя объект исследования на полигональную сетку. Каждый полигон в этой сети содержит свои атрибуты, отражающие историю его изменения.

Согласно векторной модели полигонального объекта, выражение (1.12), композитная модель выглядит следующим образом:

$$M_{polygon} = \langle P_O, P_{II}, P_M, R_{II}, T \rangle, \quad (1.14)$$

где T – множество моментов времени, за которое изменялся объект.

Композитная модель по сути является расширением векторной модели полигонального объекта с добавлением временной характеристики.

Модель имеет ряд недостатков, которые связаны с пространственно-временными запросами о динамике объектов и их отношениях. Это связано с добавлением нового полигона объекта к уже существующему базовому. При таком подходе происходит изменение идентификатора базового объекта на несколько идентификаторов вновь созданных объектов, при этом теряются отношения между ними. Данная модель не рассматривает непрерывно изменяющиеся объекты. Кроме того, неизвестно, как модель поведет себя при работе с большими наборами данных [99].

1.6.3 Модель, основанная на простой фиксации времени

Еще одним простым подходом к фиксации времени объекта является модель данных, основанная на простой фиксации времени (Data Models based on Simple Time-Stamping) [94]. Ее суть состоит в том, что создается два параметра времени: время создания и время прекращения существования объекта. Время прекращения существования задается специальными значениями: «NOW», «CURRENT» или «NULL» [117].

Данная модель основана на линейном, дискретном представлении времени. Она связана с векторной моделью представления объектов и является ее модификацией, суть которой заключается в том, что объект представлен в виде набора собственных версий, соответствующих временному ряду. Эти версии на практике могут быть представлены в различном формате. Так, авторы рассматривают данную модель в реляционном виде.

Недостаток модели состоит в том, что таблицам с базовой версией объекта соответствует множество кортежей, характеризующих прошлые версии и запланированные, которые не связаны между собой, поэтому практически невозможно отследить и показать динамику изменения конкретного объекта.

Этот недостаток может быть устранен путем добавления прямых ссылок на прошлые и последующие версии объекта. Данная идея заимствована из объектно-

ориентированной модели [115], где вводится временное изменение объекта, которое представляет собой объект, содержащий набор ссылок.

Модель, основанную на простой фиксации времени, для полигонального объекта можно представить следующим образом:

$$M_O = \{V_O\}, \quad (1.15)$$

где V_O – множество версий объекта. Каждая версия объекта $V_O^i = \{P_O, P_{II}, P_M, R_{II}, T\}$, измеренных за единицу времени $t_i \in T$.

1.6.4 Событийно-ориентированная модель

Предыдущие модели не идентифицировали индивидуальные изменения или состояния объекта. Попытки устранить эти недостатки были предприняты в событийно-ориентированной модели (Event-Oriented Models). Она основывается на протоколировании в журнал транзакций всех действий с наборами пространственных данных. Действие по изменению объекта является событием. Журнал транзакций представляет собой таблицу базы данных, содержащую последовательную историю изменений объектов.

Событийно-ориентированная модель является развитием векторных моделей объектов и может быть описана следующим образом для полигонального объекта:

$$M_O = \langle E_O, P_O, P_{II}, P_M, R_{II}, T \rangle, \quad (1.16)$$

где E_O – множество событий, связанных с изменением объекта за единицу времени $t_i \in T$.

Данный подход к моделированию является весьма сложным в техническом плане, поскольку не унифицированы структура журнала транзакций, интерфейсы межсистемной интеграции журналов, операторы анализа и обработки записей.

Примером создания ГИС, основанной на данной модели, является ГИС TEMPEST, рассмотренная в работе [114].

1.6.5 Трехдоменная модель

Трехдоменная модель (Three-Domain Model) [85, 106, 125] представляет объект как совокупность связанных между собой доменов, которые являются аналогией с тематическими областями данных в реляционных моделях.

Множество доменов можно представить как

$$D_O = \langle D_{Sem}, D_S, D_T \rangle, \quad (1.17)$$

где D_O – множество доменов, описывающих объект, связанных между собой семантическими идентификаторами; D_{Sem} – семантический домен, представляет собой множество сущностей, содержащих семантическую информацию; D_S – пространственный домен, представляет собой множество версий некоторого объекта, $D_S = V_O$ как в выражении (1.15); D_T – временной домен, представляет собой дискретное время измерения параметров объекта, $D_T = T, T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$.

Пространственный полигональный объект в данной модели можно описать представлением вида:

$$M_O = \langle D_O, P_O, P_{II}, P_M, R_{II}, T \rangle. \quad (1.18)$$

Например, в отличие от других моделей, где землепользователь является атрибутом земельного участка, в трехдоменной модели он является семантическим объектом, который связан с пространственным объектом (земельным участком) и временными объектами (датами).

Архитектура трехдоменной модели представлена на рисунке 1.13.

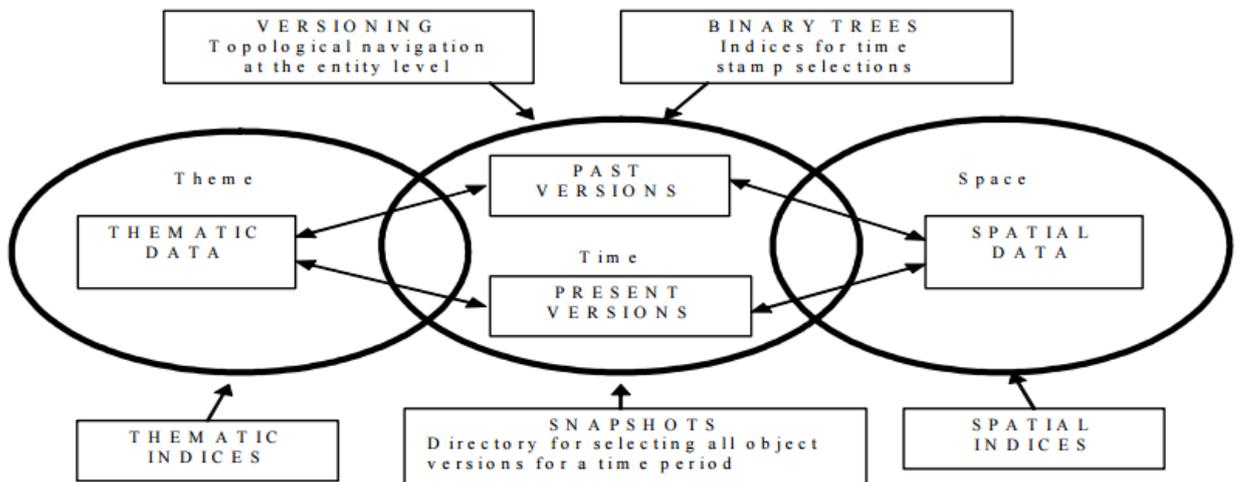


Рисунок 1.13 – Трехдоменная модель данных

Преимуществами модели являются:

- возможность описать связи между пространственными и временными характеристиками объекта в виде набора семантик, что уже является заделом для определения некоторых *состояний объекта*;
- возможность описать непрерывно изменяющиеся объекты.

1.6.6 Модель исторического графа

Главная идея модели исторического графа (History Graph Model) описана в работе [117] и состоит в определении поведения объекта во времени и влияющих на поведение событий, что позволяет делать заключения о возможном состоянии объекта.

Полигональный объект в данной модели можно выразить следующим образом:

$$M_O = \langle E, F, T \rangle, \quad (1.19)$$

где E – множество событий, влияющих на изменение объекта; F – множество состояний объекта $F = \{f^i\}$, $i = 1, 2, 3$, при этом в данной модели различают следующие состояния: статическое f^1 (иначе называется версией, то же самое, что в выражении (1.15)); изменяющееся f^2 ; прекратившее существование f^3 .

Модель исторического графа имеет свою графическую нотацию (рисунок 1.14), которая отображает атрибуты объекта на временной линии. В нотации статическое состояние объекта обозначается прямоугольником. Состояние изменения объекта обозначается прямоугольником с закругленными углами и показывает переходы между версиями. Эллипсы обозначают случаи скачкообразного изменения состояния.

Каждая версия объекта идентифицируется двумя временными метками, описывающими интервал времени, в который состояние объекта является актуальным. Каждый переход является сущностью, связывающей версии объекта с его последующими и предшествующими версиями, что также характеризуется двумя временными метками, описывающими период времени, в который

происходил переход. Связи между состояниями отображают отношения потомок-родитель. Таким образом, история изменения объекта может быть описана через серию последовательных версий и переходов. Объекты, которые изменялись скачкообразно, описываются переходами с нулевой продолжительностью. На рисунке 1.15 изображены шесть типов изменений объекта, описанных в данной нотации.

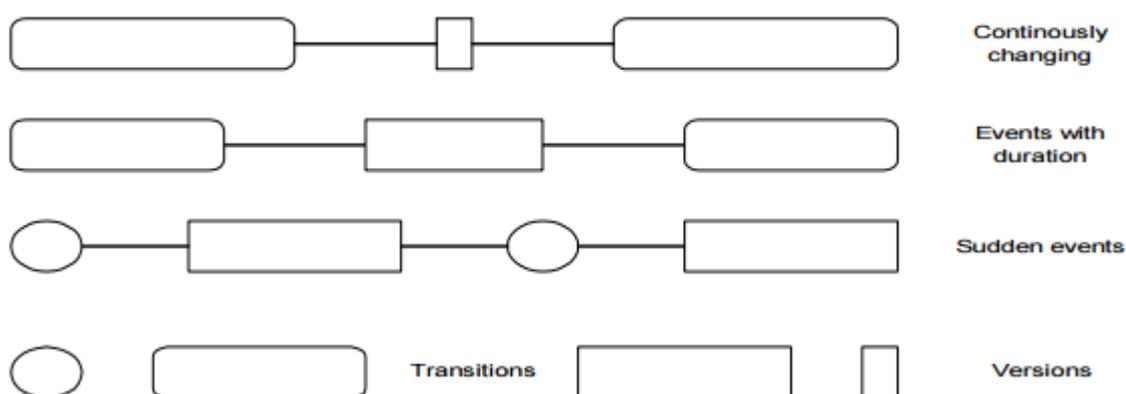


Рисунок 1.14 – Нотация модели исторического графа, отображающая поведение объекта во времени

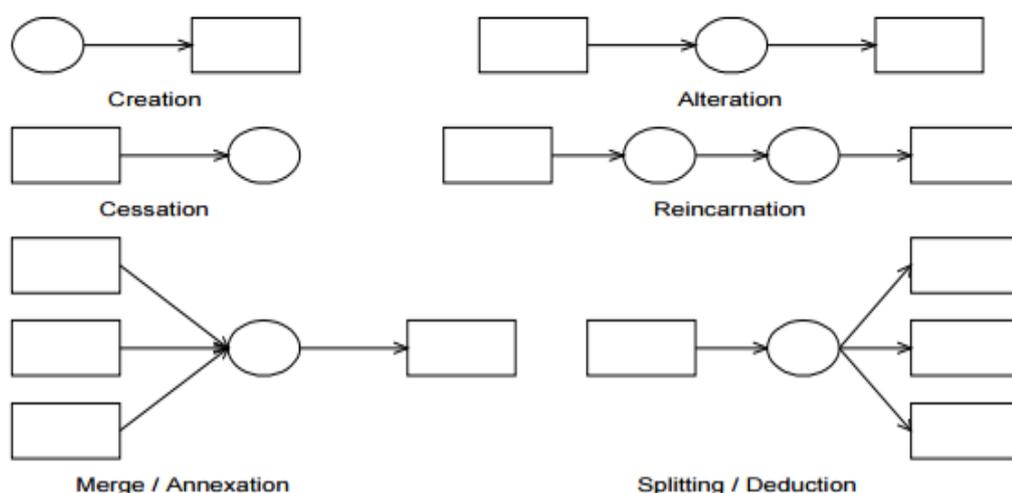


Рисунок 1.15 – Шесть базовых типов изменений в модели исторического графа

Данная модель объединяет два подхода: событийно-ориентированную модель и модель, основанную на простой фиксации времени. Она подходит для

описания событий в ограниченном промежутке времени и не всегда описывает пространственные изменения объекта.

1.7 Организация пространственных объектов

Существует несколько подходов к представлению моделей пространственных объектов, рассмотренных в разных работах [32, 112]. Выделяют следующие подходы:

- модель «Объект-Отношение»;
- модель «Сущность-Связь»;
- объектно-реляционная модель;
- объектно-ориентированная модель.

Перечисленные модели применяются для проектирования и реализации моделей данных в различных предметных областях. Проанализируем применимость данных подходов к реализации модели пространственного объекта с целью выбора оптимальной.

1.7.1 Модель «Объект-Отношение»

Модель «Объект-Отношение» (Object-Relationship (O-R) Model) описана в работах [87, 113]. Подход основан на классификации концептов предметной области (рисунок 1.16) и в этом схож с онтологическим подходом к представлению объектов. Достоинствами данного подхода являются:

- возможность фиксировать дискретные и непрерывные изменения объекта;
- семантическое описание взаимосвязей между концептами предметной области за счет введения множества отношений. Это позволяет описывать события и состояния объектов;
- возможность экспортировать модель в реляционную СУБД, где связь между сущностями будет основана не на ключах, а на отношениях между объектами.

Подход не распространен, что является его основным недостатком. Отсутствует универсальный слой функций и операторов для работы с моделями данных, основанными на данном подходе.

Графическое представление модели «объект-отношение» (рисунок 1.16) иллюстрирует элементы графической нотации и их назначение на примере нескольких объектов («Дерево», «Строение», «Река», «Озеро», относящихся к родительскому объекту «Участок земли») и семантические отношения между классами объектов.

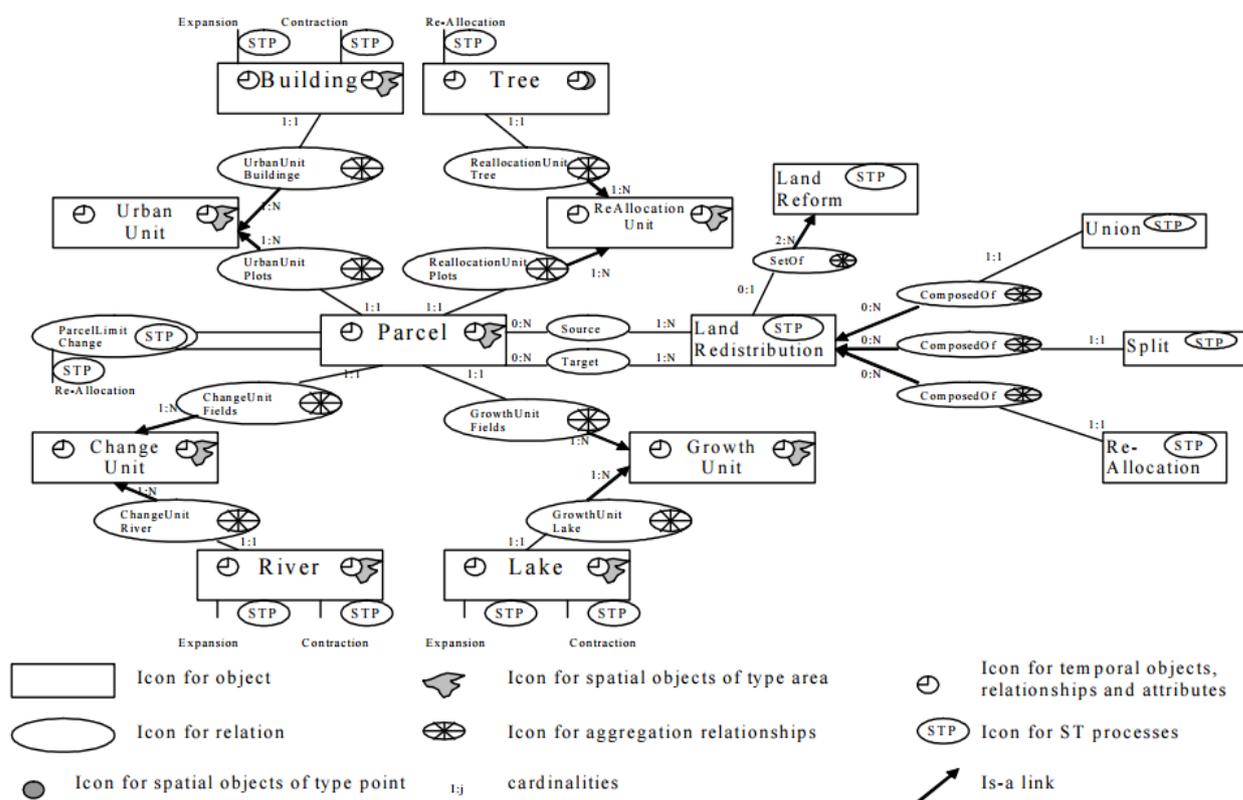


Рисунок 1.16 – Графическое представление модели «Объект-Отношение»

1.7.2 Модель «Сущность-Связь»

Модель «Сущность-Связь» (The Spatio-Temporal Entity-Relationship (STER) Model), применительно к представлению пространственных объектов, описана в работах [122, 123]. Данная модель основывается на разделении объектов на сущности – совокупности однотипных объектов, обладающих одинаковым набором свойств. В случае с ЗСХН этими свойствами являются: номер поля,

площадь, периметр, плановая и фактическая культуры, юридический адрес хозяйства и т. д.

Преимущества данного подхода состоят в следующем:

- к параметрам объекта добавляется параметр «время» и появляется возможность фиксировать время изменения параметров объекта;
- возможность связывать сущности с помощью ключей, обеспечивающих целостность представления информации о каждом объекте;
- возможность вести историю дискретных или непрерывных изменений параметров объекта;
- возможность разработать правила вывода информации об объекте и семантически описать атрибуты, связи и аспекты существования объекта.

Недостатком данного подхода является раздельное хранение параметров объекта от его геометрии, что затрудняет фиксацию и анализ пространственных изменений объекта и затрудняет связь объекта с его описанием.

1.7.3 Объектно-реляционная модель

Развитием модели «Сущность-связь» стала объектно-реляционная модель, применяемая, в том числе, и к представлению пространственных объектов [8, 35, 47, 68, 72]. В объектно-реляционном подходе появилась возможность использовать нестандартные типы данных – объекты. В различных объектно-реляционных СУБД (PostgreSQL, Oracle Spatial и др.) появился тип данных «geometry», который позволяет хранить в реляционном виде растровые и векторные объекты в евклидовой системе координат, в частности, полигоны. Растровые объекты хранятся в двоичной системе счисления, а векторные – в шестнадцатеричной. Также объектно-реляционные СУБД предоставляют набор функций и операторов для работы с пространственными объектами.

1.7.4 Объектно-ориентированная модель

В объектно-ориентированном подходе (Spatio-Temporal Object-Oriented (O-O) Data Models) реализуются базовые принципы парадигмы объектно-

ориентированного программирования относительно организации пространственных объектов [9, 31, 72]. Подход включает достоинства объектно-реляционной модели и расширяет функциональные возможности управления пространственными объектами.

Основные отличия объектно-ориентированного подхода [80, 108] от объектно-реляционного заключаются в применении объектно-ориентированных СУБД (Oracle, DB2 и др.), что позволяет хранить в виде объекта с функциональной оболочкой не только геометрию или изображение пространственного объекта, но и любые его параметры, включая время. Таким образом, один экземпляр класса пространственных объектов может представлять всю историю изменений.

Недостатком подхода является невозможность прямого обращения к какому-либо параметру объекта через простой запрос, что усложняет разработку приложений и, как следствие, является непопулярным подходом при разработке геоинформационных систем [70].

1.8 Выводы

Исследуемый объект «ЗСХН» представляет собой пространственный объект сельскохозяйственного назначения с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой, ограниченный естественными природными или искусственными объектами. В процессе жизненного цикла объекта, характеризуемого природно-климатическими (смена фаз) и техногенными (АТМ) факторами, возникают пространственные неоднородности внутри контура объекта, которые с точки зрения динамической модели объекта (1.1) характеризуются составными состояниями.

Для оказания информационной поддержки КП при решении задачи дистанционного мониторинга объекта разработана информационная динамическая модель объекта «ЗСХН», учитывающая различные факторы, инициирующие изменения объекта, и фиксирующая его фактические изменения с учетом внутренней структуры объекта.

В процессе анализа существующих моделей двумерных полигональных пространственных объектов были выделены трехдоменная модель и модель исторического графа, как наиболее соответствующие требованиям к модели объекта «ЗСХН». Трехдоменная модель (1.18) позволяет учитывать множество пространственных признаков объекта, множество топологических отношений между частями объекта, множество моментов времени, за которое происходят изменения объекта, и множество состояний объекта. Модель исторического графа (1.19), в отличие от трехдоменной, включает и множество событий, влияющих на изменение состояний объекта. В настоящей работе предлагается расширить модель исторического графа за счет включения множества составных состояний объекта и набора метрических и спектральных признаков, позволяющих рассмотреть объект с точки зрения многообразия его структурных элементов.

В результате анализа подходов к организации предлагаемой модели пространственного объекта был выбран объектно-реляционный подход. Данный подход позволяет:

- организовать в единой информационной среде целостное представление множества признаков объекта с учетом его динамически изменяющейся структуры (1.8);
- структурировать информацию об объекте с учетом временных связей между событиями и связанными с ними состояниями;
- анализировать изменение объекта.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПОСТАНОВКИ КОНЕЧНЫМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ДЗЗ

2.1 Анализ диалоговых средств по постановке КП задачи мониторинга

Актуальность разработки модели информационного процесса постановки КП задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ обусловлена рядом факторов. На сегодняшний день в научном сообществе сложилось понимание значимости применения методов аэрокосмического мониторинга земель, однако вопросы построения систем агромониторинга, использования данных ДЗЗ и способов их обработки для задач агромониторинга проработаны недостаточно. Практически отсутствуют работы, где были бы рассмотрены вопросы взаимодействия между системами мониторинга и, в частности, агромониторинга и конечным пользователем [41, 59].

Ниже рассмотрены современные разработки в области предоставления диалоговых средств, ориентированных не на экспертов, а на КП для взаимодействия с пространственными объектами, в частности, позволяющих КП формулировать задачи мониторинга для получения актуального состояния заданного объекта. Следует раскрыть данные типы пользователей подробнее.

Конечный пользователь – агроэколог или агроменеджер – представитель (инженер, агроном) сельскохозяйственного предприятия, отдела сельского хозяйства муниципального района, являющийся специалистом в вопросах землепользования, агротехнических мероприятиях, но не являющийся специалистом в вопросах обработки спутниковых данных и соответствующих инструментальных средствах.

Эксперт – специалист в области ДЗЗ и применении геоинформационных технологий, владеющий соответствующими программно-техническими средствами. Как правило, ДЗЗ включает процессы приема орбитальных данных, их первичной обработки, тематической обработки с учетом дешифрирования

изображений и распознавания объектов, хранения, визуализации, предоставления данных. Геоинформационные технологии включают процессы структурирования и анализа геопространственных данных в соответствии с заложенной моделью пространственных объектов.

Основным классом систем, предоставляющих подобные диалоговые средства, являются геоинформационные системы (ГИС) [14]. Особенностью геоинформационных технологий является возможность объединения по признаку локализации разнородной пространственной информации, возможность совместно обрабатывать и анализировать эту информацию при условии открытых баз данных, поэтому ГИС рассматривают в различных аспектах [6, 66]:

- *В качестве систем поддержки принятия управленческих решений.* ГИС предназначены для оказания информационной поддержки принятия управленческих решений в области управления пространственными объектами в различных областях хозяйственной деятельности, на основе используемых технологий пространственного анализа, преобразования и синтеза пространственных данных.

- *В качестве автоматизированных информационных систем.* Широкая сфера применения ГИС приводит к тому, что данные системы интегрируют функциональные возможности, присущие другим классам известных информационных систем: автоматизированных систем научных исследований (АСНИ), систем автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированных справочно-информационных систем (АСИС).

- *В качестве геосистем.* ГИС интегрируют возможности систем управления картографической информацией, фотограмметрических, кадастровых систем и т. п.

- *В качестве систем, использующих базы данных.* ГИС используют широкий набор разнородных данных, интегрируя возможности реляционных, объектно-реляционных и объектно-ориентированных СУБД.

- *В качестве систем моделирования.* ГИС интегрируют различные методы и подходы пространственного моделирования.

- *В качестве систем получения проектных решений.* В ГИС реализованы возможности решения задач проектирования.

- *В качестве систем представления информации.* Специализированные ГИС включают возможности ведения отчетности и обмена информацией и в этом смысле являются развитием систем электронного документооборота (СЭД).

По характеру использования зарубежные и отечественные ГИС можно разделить на следующие типы, основываясь на исследованиях «Ассоциации развития рынка геоинформационных технологий и услуг» и работе [51]:

- Инструментальные системы представляют программный пакет, включающий такой набор функционала, который покрывает все стадии технологической цепочки: ввод – обработка и анализ – вывод результатов. К данному типу относятся, например, ГИС ППР, примерами которых являются [2, 26, 62, 63, 67, 68, 79, 83, 84, 90, 91, 92, 95, 103, 118].

- ГИС-вьюеры (ArcView1 и 2 (ESRI, США), WinCAT (Simens Nixdorf, Германия)).

- Справочные картографические системы. Это закрытые в отношении формата и адаптации оболочки, содержащие простой механизм запросов и отображения. КП, как правило, лишен возможности изменения данных. Примерами могут являться электронные карты городов.

- Средства пространственного моделирования. Предназначены для решения задач моделирования пространственно-распределенных параметров.

- Векторизаторы. Поскольку основная аналитическая работа в ГИС реализуется на векторных моделях данных, то существует обширная группа задач по обработке отсканированных растровых картографических изображений.

- Специальные средства обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ERDAS Imagine, ER Mapper, ENVI, Scanex ImageProcessor). Также к данному типу систем относятся распределенные комплексы, осуществляющие помимо автоматизированной обработки данных ДЗЗ еще и автоматический прием, обработку и публикацию данных [1, 20, 37, 43, 48, 54, 55, 58, 65, 81, 124].

По способу предоставления функциональных возможностей ГИС можно разделить на настольные приложения и web-ГИС.

В данной работе анализируются диалоговые средства нескольких типовых примеров настольных и web-ГИС (рисунок 2.1), ориентированных на использование в сельском хозяйстве на разных уровнях для хранения, структурирования и анализа ЗСХН.

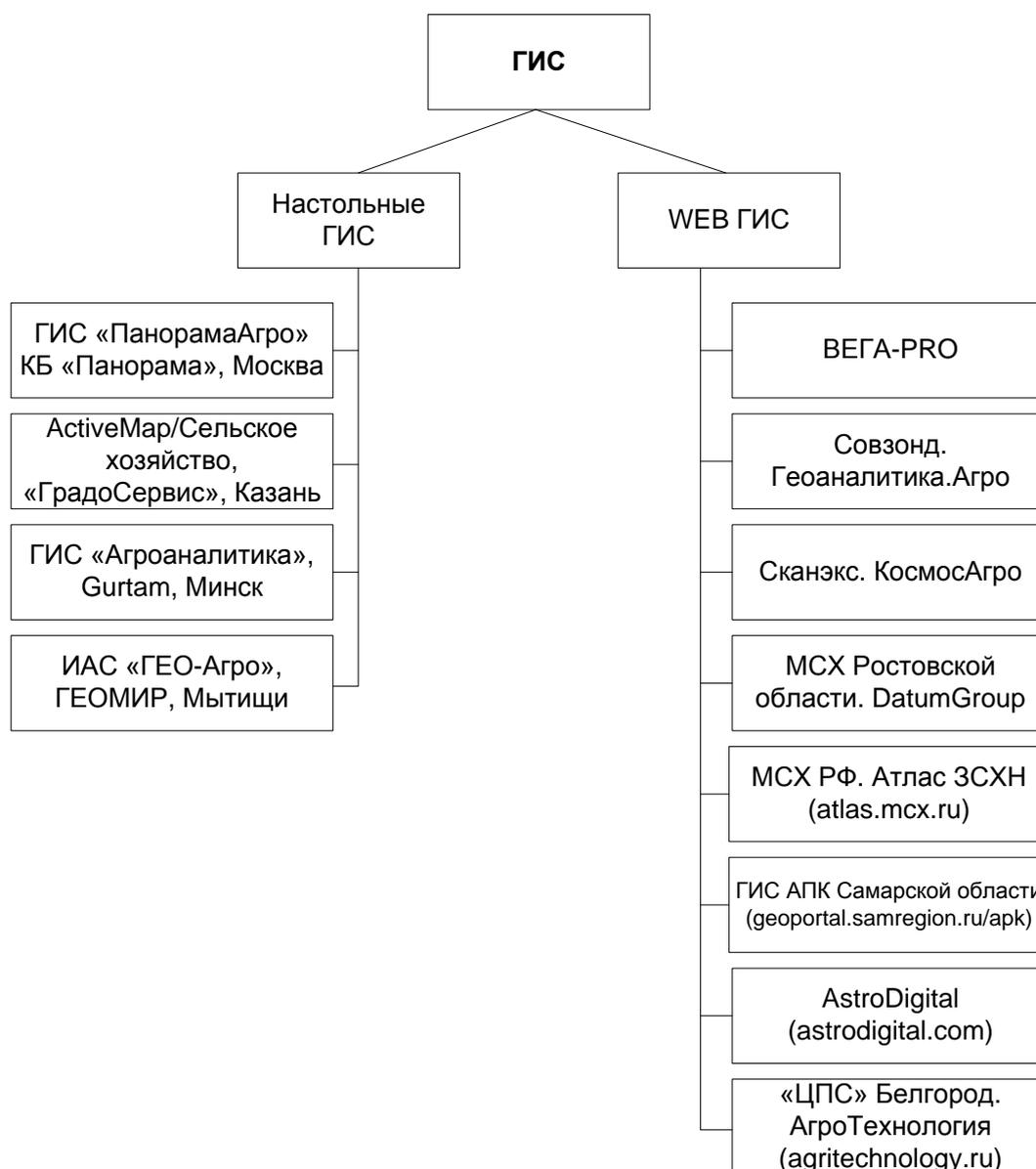


Рисунок 2.1 – Примеры настольных и web-ГИС

Выделим основные критерии, по которым анализируются перечисленные выше программные продукты с точки зрения требований к диалоговым средствам

и формам взаимодействия для организации общения КП и ИС, которые позволяют локализовать объект и сформировать задачу мониторинга:

1. Указание наименования (типа) объекта.
2. Географическая локализация объекта.
3. Временная локализация точки актуализации данных об объекте.
4. Указание дополнительных свойств объекта для его локализации.
5. Указание свойств объекта, которые необходимо определить.

Рассмотрим перечисленные шаги подробнее.

2.1.1 Указание наименования (типа) объекта

Данный шаг включает следующие действия:

- 1) Непосредственное задание наименования объекта либо подстроки наименования в поле для ввода.
- 2) Выбор наименования объекта в иерархическом меню на основе представленных в системе классификаторов объектов.
- 3) Указание объекта на карте.

Используется один из указанных способов либо их комбинация. Так, после задания наименования объекта (способ 1) возможна визуализация всех объектов с точным либо неточным соответствием наименованию и последующий выбор пользователем нужного объекта (способ 3).

После указания наименования при помощи способов 1, 2 система может отобразить: а) список обнаруженных объектов (в табличном виде с возможностью перемещения к объекту на карте); б) векторный слой, на котором представлены все обнаруженные объекты. Пользователь может дополнительно отфильтровать нужные ему объекты, выбрав их в списке либо на карте.

2.1.2 Географическая локализация объекта

Для географической локализации объекта указывают:

- 1) Географические координаты области поиска (долготу и широту левой верхней и правой нижней координат области поиска).

- 2) Координаты GPS/ГЛОНАСС (для одиночных объектов).
- 3) Контур области поиска.
- 4) Непосредственно объект на карте (для одиночных объектов).
- 5) Наименование единицы административно-территориального деления территории, в которой находится объект.

Способы 1–4 обеспечивают однозначную локализацию области поиска. Однако, если способы 1–2, строго говоря, не требуют никакой дополнительной информации, способы 3–4 предполагают использование диалоговых средств, позволяющих варьировать слои, визуализируемые пользователю. Как правило, используются растровые слои на основе композитных спутниковых изображений, векторные слои на основе накопленных системой тематических карт на ту или иную местность либо их комбинации.

Способ 5 может давать неоднозначные значения ввиду омонимичности наименований географических объектов. В этом случае для точной локализации региона используются те же диалоговые средства, что и в шаге диалога (1).

2.1.3 Временная локализация точки актуализации данных об объекте

В данном случае рассматриваются запросы о *текущем* состоянии наземных объектов, однако это понятие следует пояснить: различные объекты подстилающей поверхности обладают различной динамикой, следовательно, интервал актуализации данных может иметь различную протяженность, от суток до месяцев. Система должна обладать такой информацией и предоставлять пользователю сведения о предполагаемом интервале актуализации (в днях либо месяцах назад по временной шкале от текущего момента). У пользователя должна быть возможность откорректировать интервал в ту или иную сторону путем указания конкретного значения (дней, месяцев), либо указания даты актуализации (данные, не старше указанной даты).

2.1.4 Указание дополнительных свойств объекта для его локализации

Каждому типу объектов в системе установлен predetermined набор свойств. Пользователь может ввести ограничения на значения свойств искомым объектов с целью дополнительной фильтрации.

Свойства объектов измеряются на основе применения шкал, как правило, количественных либо номинальных. Количественные шкалы дополнительно характеризуются шагом дискретизации и единицей измерения. Диалоговые средства для ввода ограничений на значения свойств, соответственно, сводятся к указанию интервалов значений, совокупности номиналов, а также комбинаций свойств на основе логических высказываний. По умолчанию все ограничения фильтра свойств соединены на основе логического «И».

2.1.5 Указание свойств объекта, которые необходимо определить

Система должна обладать знаниями о видах искомым атрибутов, свойственных тому или иному объекту. Диалоговые средства сводятся к выбору пользователем из predetermined меню одного или более атрибутов, которые необходимо определить.

Как правило, в качестве результата запроса пользователя интересуют простые метрические характеристики – площадь (для площадных объектов), протяженность (для линейных объектов), количество объектов. В более сложном случае пользователя могут интересовать данные об объектах с учетом их классификации. Так, детализируя приведенный выше пример, пользователя могут интересовать площади сельхозугодий какого-либо фермерского хозяйства с посадками зерновых культур в разрезе типизации культур. Результат такого запроса представим в виде таблицы (в общем случае – многомерной), формы визуализации результатов – таблицы, диаграммы, графики, отсортированные в соответствии с фильтром векторные слои.

Рассмотренные диалоговые возможности обобщают рассмотренные системы, которые реализуют смешанный подход, основанный на втором и частично третьем поколении средств общения.

Второе поколение средств общения предполагает, что КП не обязан уметь взаимодействовать с системой на формальном языке и может решать различные задачи, взаимодействуя с системой на ограниченном подмножестве естественного языка в форме таблиц или текстов.

Третье поколение предполагает возможность изменения целей КП в процессе взаимодействия с системой, что влечет за собой большой функционал. Также, ввиду многообразия решаемых задач, сложно определить глобальную структуру диалога.

В контексте рассматриваемого типа систем реализация второго и третьего подходов предполагает, что КП разбирается в методах обработки, структурирования и представления геопространственных данных, что противоречит определению КП в данной работе и существенно отличается от требуемой структуры диалога.

Перечисленные диалоговые средства можно рассматривать как набор требований к диалоговым средствам и формам взаимодействия для организации общения КП и ИС.

Основными характеристиками, определяющими качество диалоговых средств для КП, которым отдается предпочтение в данной работе, являются:

- Высокая функциональность системы при минимальном количестве шагов диалога, выполняемых КП при постановке задачи.
- Возможность корректировать результаты разрешения поставленной задачи.
- Возможность не согласиться с результатами и уточнить запрос, рассматриваемая системой как очередная итерация решения задачи с последующим оцениванием результатов.

2.2 Разработка информационного процесса постановки КП задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ

Требуется разработать модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, учитывающую возможность использования КП специализированных средств получения, обработки и представления данных ДЗЗ для оказания информационной поддержки решения задач агромониторинга на примере пространственного объекта «ЗСХН» с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой.

Под постановкой задачи понимается задание признаков исходной и требуемой модели объекта (1.8).

Процесс постановки задачи мониторинга рассматриваемого типа пространственных объектов «ЗСХН» имеет существенную особенность, которая определяет специальные требования, предъявляемые к организации информационного процесса. Особенность заключается в ориентированности процесса постановки задачи на КП – лица, принимающего решения, а не на эксперта [45, 82].

В условиях описанной особенности рассматриваемого информационного процесса постановки задачи дистанционного мониторинга пространственного объекта, его модель должна учитывать применение диалоговых средств, предназначенных для использования КП при взаимодействии с информационной системой. Основными диалогами, относящимися к процессу постановки КП задачи мониторинга пространственного объекта, являются:

- Диалог задания начальных признаков объекта.
- Диалог задания параметров мониторинга.
- Диалог по оценке результатов разрешения поставленной задачи, который должен визуализировать пользователю актуальное состояние объекта F_A с учетом его неоднородной динамически изменяющейся пространственной структуры.

В целом информационный процесс постановки задачи включает следующие основные этапы (рисунок 2.2):

1. Формирование базы априорных данных.
2. Задание начальных признаков модели объекта.
3. Задание параметров мониторинга.
4. Формирование последовательности операторов разрешения поставленной задачи.

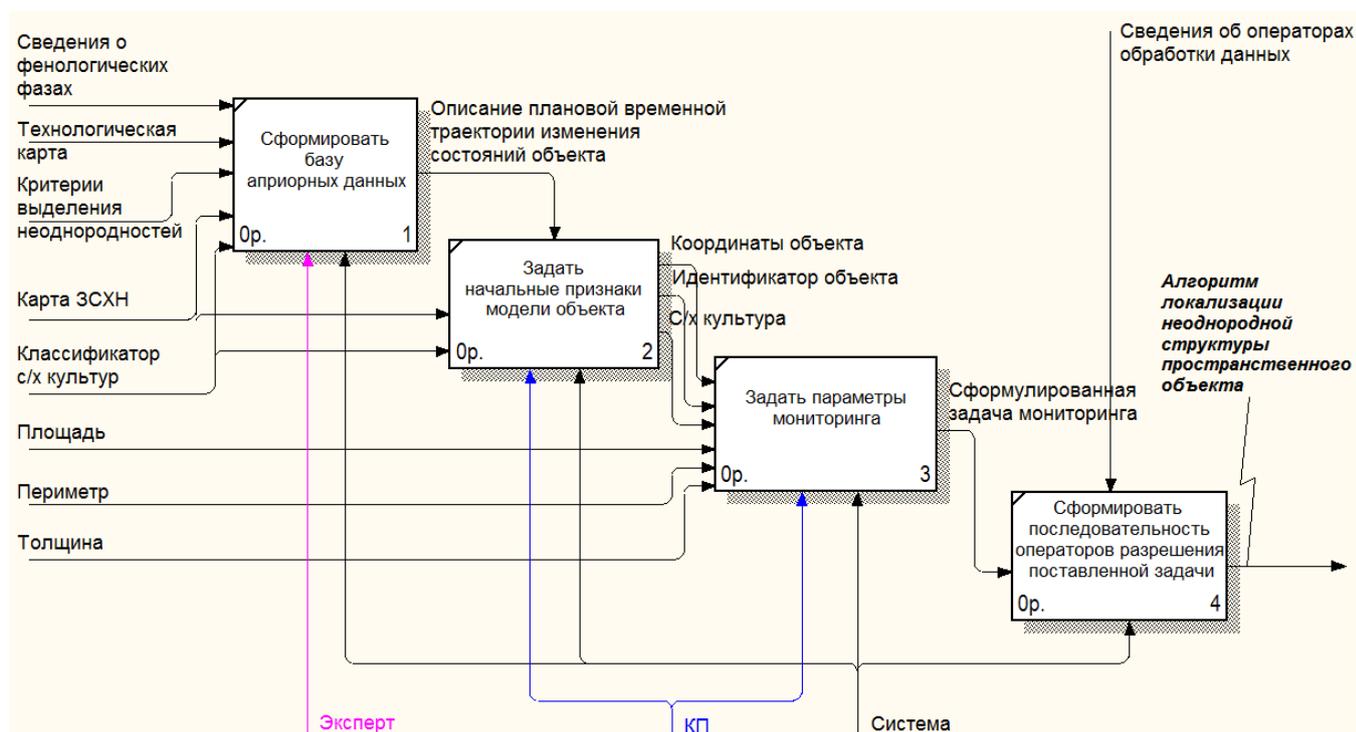


Рисунок 2.2 – Структура информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, ориентированная на КП

Новизна предлагаемой модели информационного процесса состоит в разработанной структуре диалога, ориентированного на использование специализированных средств обработки спутниковых изображений при решении задач агромониторинга КП.

Поскольку КП решает ограниченное множество фиксированных задач, то разработка структуры диалога основана на использовании средств общения второго поколения, описанных в работе [21]. Суть подхода, основанного на

средствах общения второго поколения, заключается в том, что данный подход предоставляет КП возможность взаимодействовать с информационной системой при постановке задачи мониторинга не на формальном языке, что потребовало бы от КП определенных знаний и квалификации, а на ограниченном подмножестве естественного языка. При этом, применяемые диалоговые средства базируются на визуальной локализации объекта, таблицах, списках и графиках, в рамках терминологии предметной области КП. При таком подходе КП имеет возможность корректировать результаты решения задачи в случае несогласия с полученным решением.

В процессе диалогового взаимодействия КП преследует цель актуализации состояния заданного пространственного объекта «ЗСХН» с учетом его неоднородной динамически изменяющейся пространственной структуры. Данная цель определяет глобальную структуру диалога, под которой понимается процесс непротиворечивого взаимодействия участников, которое осуществляется благодаря согласованности целей участников [100].

С другой стороны на способ построения диалога оказывает влияние структура конкретной задачи, решаемой участниками в диалоге. Решаемая задача определяет тематическую структуру диалога [36, 93]. Построение шагов диалога основано на задании признаков исходной и требуемой модели заданного пространственного объекта «ЗСХН», описанной в (1.8).

Формально диалог постановки КП задачи мониторинга объекта можно представить в виде ориентированного графа:

$$Gr = (P, V), \quad (2.1)$$

где P – множество вершин, определяющих характер действия (операции) в диалоге; V – множество направленных ребер, задающих пути выполнения операций. Множество вершин графа состоит из двух подмножеств (таблица 2.1):

$$P = S \cup EU, \quad (2.2)$$

где S – подмножество операционных вершин системы; EU – подмножество операционных вершин пользователя. Шагу диалога соответствует дуга и вершина, из которой она выходит.

Таблица 2.1 – Перечень операционных вершин

Операционные вершины системы		Операционные вершины пользователя	
№	Наименование	№	Наименование
S_1	Отображение карты объектов «ЗСХН»	EU_1	Выбор объекта на карте объектов «ЗСХН»
S_2	Выделение объекта на карте	EU_2	Закрепление объекта за СХП
S_3	Отображение панели операций над объектом	EU_3	Задание с/х культуры выбранному объекту
S_4	Задание ID объекта	EU_4	Задание ограничения площади неоднородностей
S_5	Отображение карты выбранных объектов «ЗСХН»	EU_5	Задание ограничения толщины неоднородностей
S_6	Отображение карты объектов «ЗСХН» с заданными с/х культурами	EU_6	Подтверждение запроса
S_7	Отображение признаков объекта	EU_7	Выбор карты
S_8	Отображение карты объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП	EU_8	Выделение контура однородной области объекта «ЗСХН» на карте неоднородностей
S_9	Отображение списка карт		
S_{10}	Отображение спутникового изображения		
S_{11}	Отображение карты неоднородностей		

Конкретизацию перечисленных этапов информационного процесса, отражающую последовательность шагов взаимодействия пользователей и ИС, рассмотрим в формате описания прецедентов UML [64].

2.2.1 Формирование базы априорных данных экспертом

Формирование базы априорных данных осуществляется экспертом в области сельского хозяйства, либо самим КП. На данном этапе в систему вносят классификатор с/х культур (рисунок 2.3), сведения о фенологических фазах (рисунок 2.4), технологическую карту (или план агротехнических мероприятий, рисунок 2.5), карту ЗСХН (рисунок 2.6), критерии выделения неоднородностей. Результатом формирования базы системы является описание

плановой временной траектории изменения состояний объекта, пример которой изображен на рисунке 1.2 в главе 1.

ID	Название	Сорт	Вид	Отчет	Статус
<input type="checkbox"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="checkbox"/> x	<input type="checkbox"/> x
2	зерносмесь			0	0
3	картофель		Картофель	1	1
4	кукуруза на зерно			1	0
5	многолетние травы		Кормовые	0	0
6	морковь				0
7	овес		Яровые зерновые	1	0
8	однолетние травы		Кормовые		0
9	рожь озимая		Озимые зерновые	1	0
12	пшеница		Яровые зерновые	0	0
14	рожь		Зерновые	1	0
16	ячмень		Яровые зерновые		0

+ Add Edit View Delete Excel Стр. 1 из 5 Просмотр 1 - 20 из 88

Рисунок 2.3 – Классификатор с/х культур

ID	Название	Дата начала	Дата завершения	Пояснения
<input type="checkbox"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x
7	Зарастание	2017-04-28	2017-05-10	
11	Всходы	2017-06-05	2017-06-22	
12	Кушение	2017-06-22	2017-07-07	
13	Выход в трубку	2017-07-07	2017-07-15	
14	Колошение	2017-07-15	2017-07-25	
15	Цветение	2017-07-25	2017-08-11	
16	Восковая спелость	2017-08-11	2017-08-21	
17	Твердая спелость	2017-08-21	2017-08-25	

Рисунок 2.4 – Сведения о фенологических фазах

ID	Название	Рекомендуемая дата начала	Рекомендуемая дата заверше	Пояснения
<input type="checkbox"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x	<input type="text"/> x
2	Боронование	2017-04-28	2017-05-10	
3	Посев	2017-05-05	2017-06-10	
4	Подкормка	2017-05-10	2017-05-20	
5	Химическая прополка	2017-06-15	2017-07-15	
6	Уборка	2017-08-20	2017-10-25	
7	Вспашка	2017-09-10	2017-10-30	

Рисунок 2.5 – План агротехнических мероприятий

ID	С/х предприятие	План	Факт	Площадь введенная	Площадь рассчитанная	NDVI
127	Крестьянское (фермерск		овес		97.24	0.15
128					53.64	0.47
129					38.73	0.48
130	ЗАО племзавод «Таежны		пар	62	79.36	0.43
131	ЗАО племзавод «Таежны		озимая рожь	122	113.45	0.45
132					11.36	0.39
133					10.17	0.45
134	Сельскохозяйственный п			38	34.44	0.23
135	Сельскохозяйственный п			173	175.39	0.2
136	Крестьянское (фермерск			78	76.1	0.15
137	ЗАО племзавод «Таежны		пшеница	108	111.2	0.15
138	ЗАО племзавод «Таежны			8	7.83	0.28

Рисунок 2.6 – Объекты «ЗСХН»

2.2.2 Разработка диалога задания начальных признаков модели объекта

Процесс задания КП начальных признаков модели объекта является конкретизацией формальной модели диалога (2.1) и представляет собой диалог, который можно представить в виде графов Gr_1 (рисунок 2.7) и Gr_2 (рисунок 2.8). Диалог включает *пространственную локализацию объекта* и *указание ему с/х культуры*.

Входные данные

1. Карта объектов «ЗСХН».
2. Технологическая карта.
3. Классификатор с/х культур.
4. Сведения о фенологических фазах с/х культур.

Предусловия

Перечисленные входные данные должны быть внесены в систему на этапе формирования экспертом базы априорных данных.

Основные шаги диалога:

- 1. Пространственная локализация объекта:**

- 1.1. ИС отображает карту объектов «ЗСХН» района.
- 1.2. КП локализует объект (или объекты, путем множественного выбора) на основе карты объектов «ЗСХН».
- 1.3. ИС визуально выделяет объект на карте.
- 1.4. ИС отображает панель операций над объектом.
- 1.5. КП закрепляет объект за СХП.
- 1.6. ИС задает идентификатор ID_j закрепленного объекта, за которым закрепляются его координаты $P_{Пj}$.
- 1.7. ИС отображает карту выбранных объектов «ЗСХН».

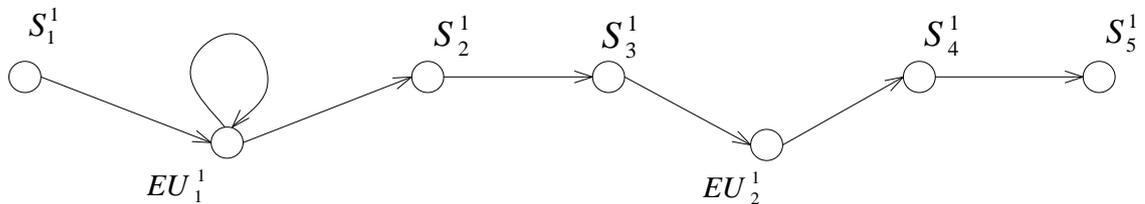


Рисунок 2.7 – Граф Gr_1 : Диалог задания начальных признаков объекта.
Пространственная локализация объекта

2. Указание с/х культуры:

- 2.1. ИС отображает карту объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП.
- 2.2. КП локализует объект (или объекты, путем множественного выбора) на основе объектов «ЗСХН» СХП.
- 2.3. ИС визуально выделяет объект на карте.
- 2.4. ИС отображает панель операций над объектом.
- 2.5. КП задает с/х культуру k_j^i выбранному объекту на основе классификатора, для которой экспертом на этапе формирования базы априорных данных определены нормативные временные точки T_m актуализации состояния объекта в зависимости от времени смены фенологических фаз φ_j^i и проведения АТМ e_j^i . Объект обладает индивидуальными временными диапазонами смены состояний,

поскольку время отсчитывается от фактической даты посева с/х культуры.

2.6. ИС отображает карту объектов «ЗСХН» с заданными с/х культурами.

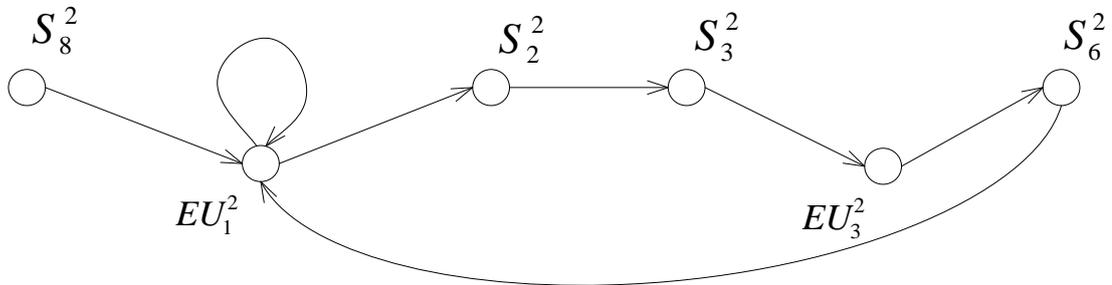


Рисунок 2.8 – Граф Gr_2 : Диалог задания начальных признаков объекта. Задание с/х культуры

Выходные данные

Результат постановки КП задачи мониторинга объекта можно представить в виде множества признаков исходной модели объекта на основе выражения (1.8):

$$ЗСХН_j = \langle ID, P_{Пj}, Tm, e_j^i, \varphi_j^i, k_j^i \rangle. \quad (2.3)$$

2.2.3 Разработка диалога задания параметров мониторинга

Задание параметров мониторинга КП также можно представить в виде графа диалога Gr_3 (рисунок 2.9). Диалог включает шаги задания ограничений на значения рассчитываемых метрических признаков размера NS и формы T , в целях оптимизации количества и формы неоднородностей, что на практике способствует оптимизации дифференцированного внесения удобрений, точечного применения средств защиты растений и посева.

Входные данные

1. Карта объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП.

Предусловия

Карта объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП, должна быть сформирована КП на этапе задания начальных признаков модели объекта.

Основные шаги диалога:

1. ИС отображает карту объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП.
2. КП локализует объект (или объекты, путем множественного выбора) на основе объектов «ЗСХН» СХП.
3. ИС визуально выделяет объект на карте.
4. ИС отображает панель задания параметров мониторинга.
5. КП задает ограничения на значения рассчитываемых признаков размера NS и формы T .
6. КП подтверждает запрос.

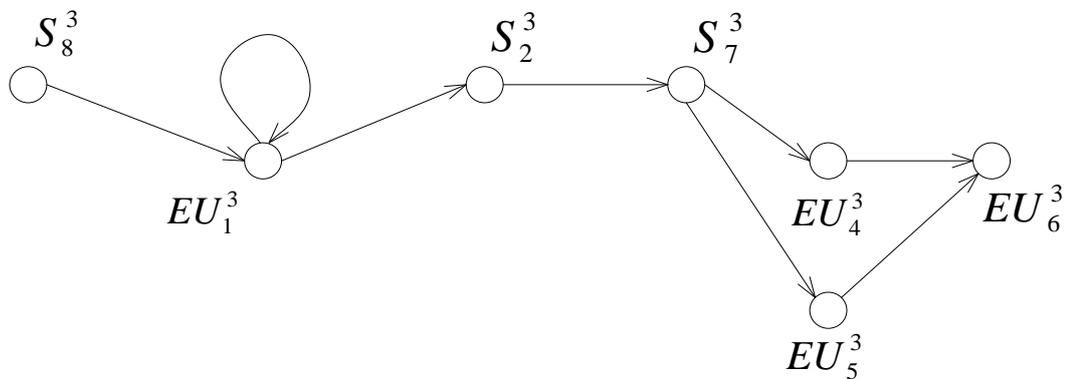


Рисунок 2.9 – Граф Gr_3 : Диалог задания параметров мониторинга. Задание ограничений размера и формы

Выходные данные

В результате задания КП параметров мониторинга формируются ограничения к модели актуального состояния пространственного объекта F_A .

2.2.4 Формирование последовательности операторов разрешения поставленной задачи

Исходя из заданных КП признаков, система подбирает последовательность релевантных операторов, составляющих алгоритм разрешения поставленной КП задачи, на основе информации о доступных операторах обработки данных.

Процесс формирования операторов разрешения поставленной КП задачи представлен в виде алгоритма (рисунок 2.10). Алгоритм включает следующие шаги.

Постановка КП задачи мониторинга, которая осуществляется в диалогах с ИС, описанных в § 2.2.2, § 2.2.3. В результате постановки задачи формируется запрос к БД, в которую заносятся заданные признаки, и формируется новое задание, под которым понимается процесс определения и выполнения релевантной поставленной задаче последовательности операторов.

Планировщик Stop выполняет запуск модуля запуска процессов с частотой 1 раз в 1 минуту, который в свою очередь обращается к БД с запросом новых заданий и, в случае наличия заданий, определяет релевантный алгоритм разрешения поставленной задачи и производит последовательный запуск операторов алгоритма.

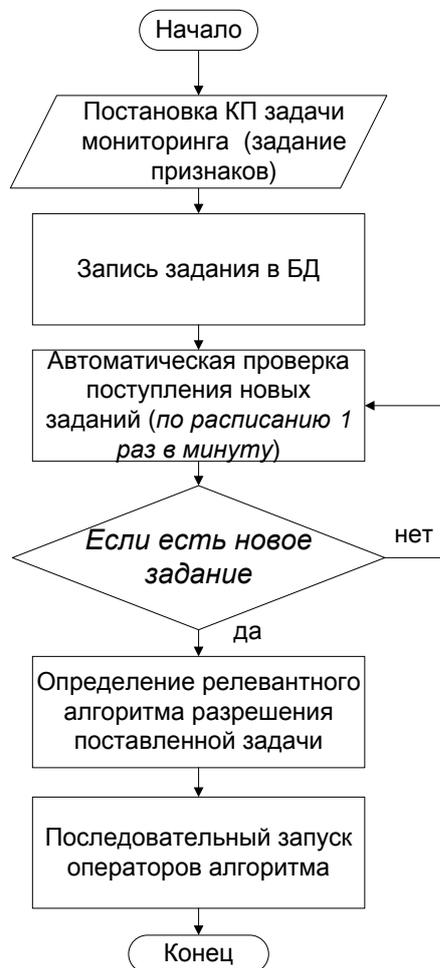


Рисунок 2.10 – Алгоритм формирования последовательности операторов разрешения поставленной КП задачи

В рамках реализации, процесс формирования операторов разрешения задачи мониторинга выделен в отдельную подсистему, которая представлена в виде структуры взаимодействия между ее элементами (рисунок 2.11).

Определение релевантного алгоритма выполняется на основе заданного идентификатора *ID* объекта мониторинга, который представлен в виде объектно-реляционной модели, выражение (1.8) (реализация приведена на рисунках 3.3, 3.4). За объектом мониторинга закреплены априорные данные и признаки, которые требуется актуализировать в процессе мониторинга. Каждому признаку соответствует некоторый оператор, который принимает на вход заданные параметры и возвращает результат их преобразования. Фрагмент модели данных, соответствующий подсистеме, приведен на рисунке 2.12.

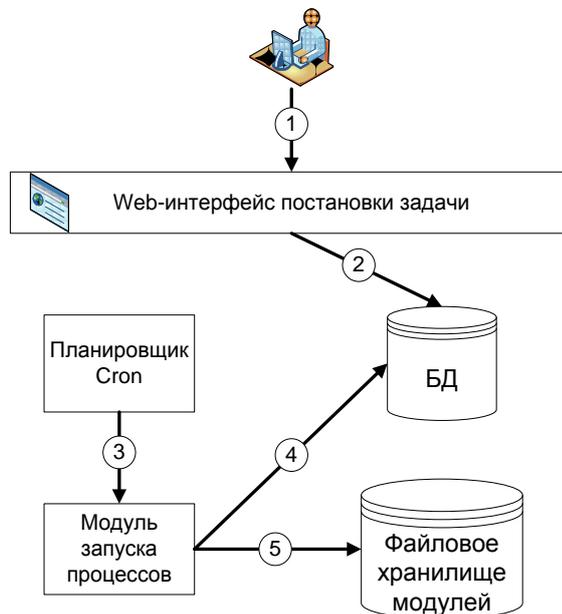


Рисунок 2.11 – Структура подсистемы формирования последовательности операторов разрешения задачи мониторинга

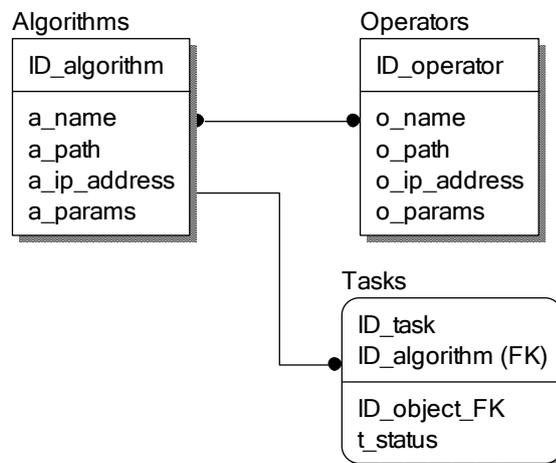


Рисунок 2.12 – Фрагмент модели данных, соответствующий подсистеме формирования последовательности операторов разрешения задачи мониторинга

2.2.5 Разработка диалога по оценке результатов разрешения поставленной задачи

Оценка результатов разрешения поставленной задачи осуществляется КП и предусматривает использование диалоговых средств. Структуру данного диалога можно представить в виде графа диалога Gr_4 (рисунок 2.13). Диалог основан на применении общепринятых диалоговых средств, используемых в большинстве ГИС, которые были рассмотрены в § 2.1.

Входные данные

Входные данные рассматриваемого прецедента расширяют входные данные прецедента **Задание КП начальных признаков модели объекта**, описанного в § 2.2.2, и включают:

1. Спутниковое изображение на территорию СХП, на котором КП может визуально оценить ход вегетации или АТМ.
2. Карту неоднородностей, на которой КП может наблюдать результаты локализации системой однородных областей для заданного объекта «ЗСХН», в виде векторных контуров с контекстной информацией, содержащей рассчитанные метрические и спектральные признаки, позволяющие идентифицировать актуальное состояние данных областей.

Предусловия

Получение спутникового изображения и карты неоднородностей заданного объекта осуществляется алгоритмом локализации неоднородной структуры пространственного объекта, который описан в § 2.3.

Основной поток действий

1. ИС отображает список карт в виде растровых и векторных слоев.
2. КП выбирает спутниковое изображение, по которому были локализованы неоднородности.
3. ИС отображает спутниковое изображение, полученное на заданную дату, соответствующую текущей фенологической фазе или АТМ.
4. КП выбирает карту объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП.

5. ИС отображает карту объектов «ЗСХН», закрепленных за СХП.
6. КП выбирает карту неоднородностей, локализованных на заданную дату.
7. ИС отображает карту неоднородностей поверх спутникового изображения.
8. КП выделяет контур однородной области объекта «ЗСХН» на карте неоднородностей.
9. ИС визуально выделяет контур однородной области на карте.
10. ИС отображает панель с рассчитанными метрическими и спектральными признаками выделенной однородной области, а также интерпретацией актуального состояния области.
11. КП визуально оценивает результаты локализации пространственных неоднородностей объекта.

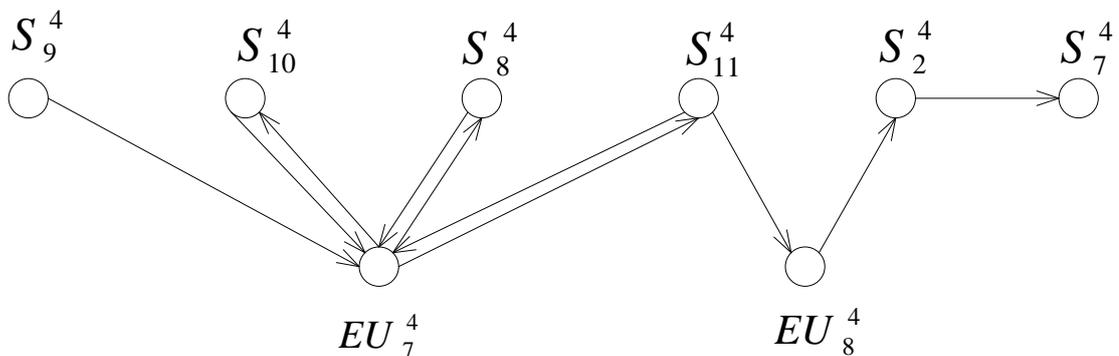


Рисунок 2.13 – Граф Gr_4 : Диалог оценки результатов разрешения поставленной КП задачи

Постусловия

У пользователя должна быть возможность не согласиться с решением системы – в области точности результатов либо при обнаружении ошибок, и сформулировать запрос на коррекцию полученных решений. Диалог по поводу корректировки решения задачи должен рассматриваться системой как уточнение постановки исходной задачи, в результате которой инициируется новая итерация решения задачи с последующим оцениванием результатов. Кроме того, в случае неудовлетворительного результата КП может провести полевые исследования.

Постусловия

Рассмотренная структура диалога приводит КП к результату интерпретации актуального состояния заданного объекта и позволяет визуализировать любую

информацию в рамках модели объекта (1.8) в форме растровых спутниковых изображений, векторных карт, атрибутов, таблиц, графиков, что в комплексе позволяет оказать КП информационную поддержку при решении задачи дистанционного мониторинга объектов «ЗСХН» с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой. Результат оценки влияет на принятие решения относительно точечного применения средств дифференцированной обработки земель (полива, химической прополки, посева и т. д.).

Помимо основных рассмотренных шагов диалога КП может выполнять следующие действия, реализованные в системе агромониторинга, но не рассматриваемые подробно в данной работе:

- Отобразить ретроспективную информацию об объекте, которая включает:
 - историю план-фактного учета с/х культур, соответствующих объекту, в форме таблицы;
 - динамику изменения индекса вегетации в рамках контура объекта за период времени в форме графика;
 - историю СХП, за которыми был закреплён объект.
- Отобразить среднее значение вегетационного индекса нормированной разности \bar{N} , рассчитанного на заданный объект без учета его пространственной структуры, в форме градиентного векторного слоя.
 - Изменить состав и временные диапазоны плана АТМ.
 - Изменить состав и временные диапазоны фенологических фаз с/х культур.
 - Изменить состав атрибутов объекта.
- Отобразить результаты агрохимического обследования в форме векторного слоя.
 - Распечатать фрагмент составленной карты.
 - Распечатать автоматически формируемые отчеты: план посевных площадей, справка о посевных площадях, учет планируемых и фактических сельхозкультур.

- Экспортировать полученные данные в требуемые форматы (для настольной ГИС, электронных офисных систем, генераторов отчетов и пр.).

2.3 Разработка алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта

2.3.1 Описание общей структуры алгоритма

Алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта основывается на получении, обработке и интерпретации данных ДЗЗ [17, 34, 121]. Алгоритм предназначен для локализации неоднородной пространственной структуры объекта «ЗСХН», расчета признаков неоднородностей объекта и определения их актуального состояния в соответствии с динамической моделью объекта (1.1). Алгоритм учитывает ограничения на значения геометрических признаков неоднородностей и позволяет получать альтернативные варианты решения поставленной задачи во взаимодействии с КП в виде карты неоднородностей.

Предусловием алгоритма является завершение конечным пользователем основного потока действий, описанной выше структуры диалога постановки задачи дистанционного мониторинга пространственного объекта (§ 2.2).

В алгоритме можно выделить следующие основные этапы (рисунок 2.14):

- Получение данных ДЗЗ из открытого источника. Включает следующие шаги:
 - Формирование поискового запроса на сервер USGS.
 - Получение списка релевантных запросу данных ДЗЗ.
 - Загрузка данных ДЗЗ в архив Региональной системы ДЗЗ ИКИТ СФУ.
 - Распаковка архива с данными.
- Предварительная обработка и подготовка данных для последующего анализа:
 - Атмосферная коррекция каналов изображения.
 - Определение наличия неинформативных (облачных) пикселей и их удаление из каналов RED и NIR.
 - Объединение RED и NIR каналов в один многоканальный файл.

- Обрезка изображения по заданной векторной маске объекта «ЗСХН».
- Расчет вегетационного индекса NDVI.

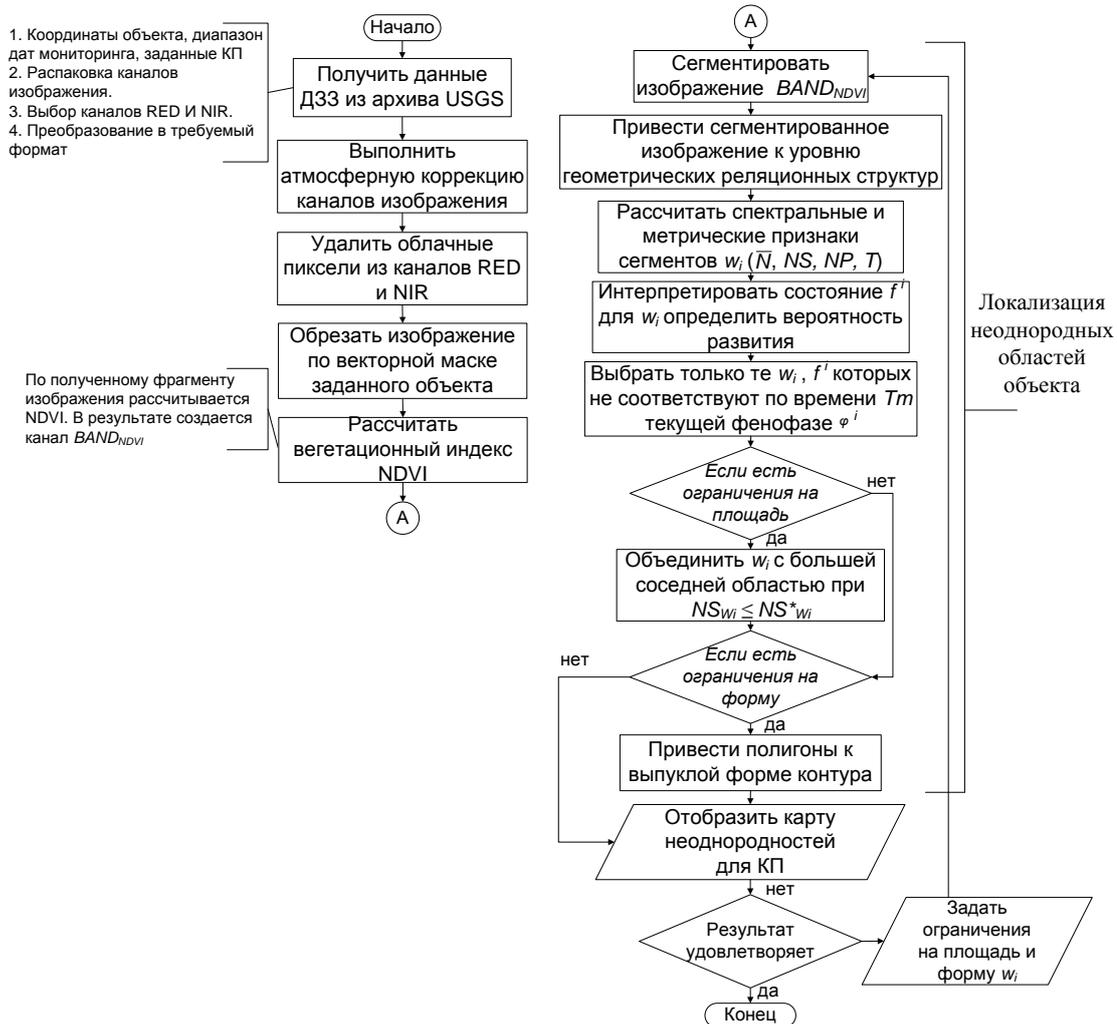


Рисунок 2.14 – Блок-схема алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта

- Локализация неоднородных областей объекта включает:
 - Сегментацию изображения по спектральному признаку NDVI.
 - Приведение сегментированного изображения к уровню геометрических реляционных структур.
 - Расчет спектральных и метрических признаков сегментов.
 - Проверку ограничений на минимальную площадь и форму учитываемых сегментов.
 - Определение состояния неоднородных областей объекта.
 - Оценка точности определения состояния.
 - Отображение карты неоднородностей, полученной в условиях

заданных ограничений.

Далее подробно приведены основные этапы алгоритма.

2.3.2 Получение данных ДЗЗ

В работе был использован открытый источник данных ДЗЗ Американской геологической службы (United States Ground Survey – USGS) [45, 46], на котором публикуются данные программ Landsat, Aqua, Terra, Sentinel и некоторые другие. Данный алгоритм рассчитан на поиск и получение данных Landsat-8 и Sentinel-2A.

Landsat-8 является продолжением программы Landsat разработки Orbital Sciences Corporation (OSC) и Ball Aerospace США, поставляя данные для различных отраслей экономики и в частности для сельского хозяйства. Основные спектральные характеристики съемочной аппаратуры космического аппарата (КА) Landsat-8 приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Спектральные характеристики съемочной аппаратуры КА Landsat-8

№	Диапазон, мкм	Описание	Пространственное разрешение (в надире), м
B1	0,43–0,45	Фиолетовый или coastal. Чувствителен к темно-синим и фиолетовым цветам	30
B2	0,45–0,52	Синий	30
B3	0,53–0,60	Зеленый	30
B4	0,63–0,68	Красный	30
B5	0,85–0,89	Ближний ИК	30
B6	1,36–1,39	Cirrus покрывает очень узкую полосу длин волн – 1370 ± 10 нанометров, которые почти полностью поглощаются атмосферой	30
B7	1,57–1,65	SWIR-1 (shortwave infrared)	30
B8	2,11–2,29	SWIR-2	30
B9	0,50–0,68	Панхроматический	15
B10	10,6–11,19	TIRS 1 (thermal infrared) для измерения температуры поверхности	100
B11	11,5–12,51	TIRS 2	100

КА Sentinel-2A предназначен для съемки среднего пространственного разрешения в 12 спектральных диапазонах. Данный КА особенно перспективен для картографирования, мониторинга землепользования, наблюдения за изменениями растительности, контроля водных ресурсов. В таблице 2.3 приведены спектральные характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-2A.

Таблица 2.3 – Спектральные характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-2

№	Диапазон, мкм	Описание	Пространственное разрешение (в надире), м
B1	0,433–0,453	Coastal aerosol	60
B2	0,458–0,523	Синий	10
B3	0,543–0,578	Зеленый	10
B4	0,65–0,68	Красный	10
B5	0,698–0,713	Красный растительный покров	20
B6	0,733–0,748	Красный растительный покров	20
B7	0,773–0,793	Красный растительный покров	20
B8	0,785–0,9	Ближний ИК	10
B8a	0,855–0,875	Узкий ИК	20
B9	0,935–0,955	Water vapour	60
B10	1,36–1,39	Коротковолновый ИК – Cirrus	60
B11	1,565–1,655	Коротковолновый ИК	20
B12	2,1–2,28	Коротковолновый ИК	20

Рассмотрим этап получения спутниковых данных из открытого источника USGS.

Входные данные

Входные данные для процесса получения данных ДЗЗ обусловлены форматом информационного запроса к системе USGS, который включает:

1. Учетные данные ИС в системе поиска данных ДЗЗ.
2. Ограничения процента облачности не более 10 %.
3. Координаты области интереса, заданные в десятичных градусах или в значениях мировой системы привязки WRS Path и Row.

4. Заданный диапазон времени получения данных.

Перечисленные условия являются фильтром данных ДЗЗ, предоставляемых USGS.

Предусловия

1. ИС должна иметь учетную запись в системе поиска данных ДЗЗ Американской геологической службы.

2. Формы информационных поисковых запросов данных ДЗЗ должны быть заранее описаны в информационной модели ИС.

Основная последовательность действий

1. Подготовить поисковый запрос на сервер USGS. Поисковый запрос формируется на основе заданных КП координат и временных рамок, соответствующих текущей фенологической фазе или АТМ.

2. Авторизоваться на сервере USGS. Авторизация осуществляется на основе заранее созданной учетной записи.

3. Алгоритм запрашивает метаданные изображений, релевантных запросу, и выбирает наиболее актуальное по дате изображение.

4. В случае отсутствия любых данных алгоритм предупреждает КП и переходит в режим ожидания до повторения итерации поиска, которая осуществляется 1 раз в день. Данные Landsat-8 обновляются 1 раз в 8 дней, Sentinel-2A – 1 раз в 5 дней.

5. Если данные найдены, то выполняется функция загрузки.

Выходные данные

В результате выполнения алгоритма получения изображений на сервер системы загружается один архив с каналами спутникового изображения.

2.3.3 Предварительная обработка и подготовка данных

Входные данные

1. Архив спутниковых данных, содержащий каналы изображения и метаданные. Для Landsat-8 распакованные данные имеют следующую структуру (см. таблицу 2.2):

- LC81420212016162LGN00_B1.TIF – файл спектрального диапазона 1. В имени файла закодирована следующая информация:

LC8 – спутник Landsat-8 и сенсор;

142 – путь пролета (path), **021** – ряд пролета (row) по мировой системе позиционирования WRS-2;

2016 – год съемки данных;

162 – номер дня в году;

LGN00 – код наземной станции, захватившей сигнал и создавшей изображение;

B1 – спектральный диапазон 1 (band 1).

- LC81420212016162LGN00_BQA.TIF – файл канала качества изображения.
- LC81420212016162LGN00_MTL.txt – файл метаданных изображения.

Для Sentinel-2A распакованные данные имеют схожую структуру (см. таблицу 2.3). В именах файлов закодирована следующая информация:

- "MMM_MSIL1C_YYYYMMDDHHMMSS_Nххуу_ROOO_Tххххх_<Product Discriminator>.SAFE"

В названии указаны две даты. Первая дата (YYYYMMDDHHMMSS) является датой получения данных. Вторая дата <Product Discriminator> длиной 15 символов используется для отличия производных продуктов от исходного набора данных.

MMM: Идентификатор миссии (S2A/S2B);

MSIL1C: обозначает уровень обработки Level-1C;

Nххуу: исходный номер обработки (например, N0204);

ROOO: относительный номер орбиты (R001 – R143);

Tххххх: номер тайла;

SAFE: формат данных (Standard Archive Format for Europe).

2. Красный канал (RED).
3. Ближний инфракрасный канал (NIR).
4. Векторный контур заданного объекта для обрезки изображения.

Атмосферная коррекция спутниковых данных

Поскольку анализ состояния растительности и хода АТМ основывается на значениях спектрального индекса NDVI, то для получения корректных значений индекса целесообразно произвести атмосферную коррекцию полученных данных. Суть атмосферной коррекции заключается в снижении влияния различных явлений атмосферы (водяной пар, кислород, углекислый газ, метан, озон, молекулы аэрозоли, частицы пыли) на снимок. Для проведения атмосферной коррекции использована методика, разработанная Pat S. Chavez в 1988 г. и позднее усовершенствованная им в 1996 г. Методика была разработана для данных Landsat ETM+, но основываясь на том, что спектральные диапазоны каналов Landsat ETM+ и OLI близки по значениям, то данную методику можно использовать и для полученных данных Landsat-8, Sentinel-2.

Методика включает следующие этапы:

1. Сконвертировать значения яркости пикселей (Digital Numbers – DN) исходного «сырого» изображения в значения излучения на сенсоре по формуле:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \cdot (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + L_{min\lambda}, \quad (2.4)$$

где L_{λ} – спектральная радиация на сенсоре; $L_{max\lambda}$ и $L_{min\lambda}$ – максимальное и минимальное значения спектральной радиации, имеющие свои значения для каждого канала изображения (значения берутся из файла метаданных); $Q_{cal\ max}$ и $Q_{cal\ min}$ – максимальное и минимальное значения яркости пикселей канала, соответствует радиометрическому разрешению сенсора, например, для OLI – 2^{16} или от 1 до 65535; Q_{cal} – значение DN «сырого» снимка.

2. Рассчитать значения излучения на сенсоре «темного объекта» для каждого канала по формуле:

$$L = \frac{0.01 \cdot E_{SUN} \cdot \cos^2 Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (2.5)$$

где d – значение расстояния от Земли до Солнца в точке получения снимка в момент съемки; Q – значение зенитного расстояния (берется из метафайлов);

E_{SUN} – коэффициент солнечного спектрального излучения. Значение берется из заранее рассчитанных таблиц, либо вычисляется по формуле:

$$E_{SUN} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot Radince_Maximum}{Reflectance_Maximum}, \quad (2.6)$$

где $Radince_Maximum$ – максимальное значения радиации, поступающей на сенсор; $Reflectance_Maximum$ – максимальное значение радиации, отраженной от поверхности Земли. Данные поставляются оператором в метафайле.

3. Рассчитать константу газовой коррекции для каждого канала изображения по формуле:

$$L_{haze} = L_{\lambda} - L. \quad (2.7)$$

4. Рассчитать атмосферно-скорректированные значения отраженной радиации для каждого канала изображения по формуле:

$$P_{\lambda} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot Q_{cal} - L_{haze}}{E_{SUN} \cdot \cos^2 Q}. \quad (2.8)$$

Результатом атмосферной коррекции являются каналы изображения с нормализованными значениями пикселей (рисунок 2.15).



a

б

Рисунок 2.15 – Результаты атмосферной коррекции: *a* – цветосинтезированное изображение без коррекции; *б* – цветосинтезированное изображение с коррекцией

Определение наличия неинформативных пикселей

Несмотря на то, что поисковый запрос учитывает заданные ограничения облачности, полученные данные могут содержать не более 10 % облачности, что рассматривается как наличие неинформативных пикселей с точки зрения локализации неоднородностей, так как облачность может попадать на изображение заданного объекта «ЗСХН» и повлиять на результат расчета спектральных признаков. Например, расчет NDVI при наличии облачных пикселей снижает истинные показатели хода сезонной вегетации, а следовательно, может привести к ошибочным решениям в процессе управления ЗСХН. Выходом из такой ситуации является исключение неинформативных пикселей из используемых каналов, в частности RED и NIR. Например, в случае с данными Landsat-8 для этого используется информация канала качества $Band_{BQA}$.

Канал $Band_{BQA}$ преобразуется в двумерный массив, в котором каждый пиксель кодируется в соответствии с правилами, описанными в [97]. Пиксель канала $Band_{BQA}$ содержит целочисленное значение, представляющее битовые комбинации условий поверхности, атмосферы и датчика, которые могут влиять на общую полезность данного пикселя. Для определения пикселей, затронутых облачностью, их значения должны быть переведены в 16-разрядную двоичную форму, где каждый разряд справа налево интерпретируется в соответствии с таблицей 2.4.

Таблица 2.4 – Интерпретация значений пикселя в двоичной форме

Бит	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0				
Описание	Облака		Перистые облака		Снег/лед		Зарезервированы (не используются)		Зарезервированы (не используются)		Вода		Зарезервирован (не используется)		Поверхность рельефа		Утерянные данные		Нет данных	

Для одиночных битов (0, 1, 2 и 3):

- 0 = Нет, это условие не существует.
- 1 = Да, это условие существует.

Комбинации битов воды и снега / льда (4-5, 10-11) обозначают:

- 00 = Нет, это условие не существует.
- 10 = Да, это условие существует.

Комбинации из двух битов (6-7, 8-9, 12-13 и 14-15) представляют собой процент вероятности существования условия:

- 00 = «Не определен». Статус условия не определен.
- 01 = «Нет». Существует низкая вероятность в том, что это условие существует (вероятность 0–33 %).
- 10 = «Возможно». Существует средняя вероятность в том, что это условие существует (вероятность 34–66 %),
- 11 = «Да». Существует высокая вероятность в том, что это условие существует (доверие 67–100 %).

Таким образом, определение пикселей, затронутых облачностью, сводится к преобразованию целочисленных значений пикселей в двоичную форму и интерпретации комбинаций битов 12-13 и 14-15 для каждого пикселя, и в случае существования облачности задается нулевое значение соответствующему пикселю в используемых каналах RED и NIR, что формально выглядит следующим образом:

$$\mu_k(i, j) = 0$$

при ($bit_{15} = 1$ и $bit_{14} = 0$) или ($bit_{15} = 1$ и $bit_{14} = 1$) (2.9)

или ($bit_{13} = 1$ и $bit_{12} = 0$) или ($bit_{13} = 1$ и $bit_{12} = 1$)

где $\mu_k(i, j)$ – функция яркости k -го канала изображения.

Объединение RED и NIR каналов в один многоканальный файл изображения в формате GeoTIFF с сохранением привязки и проекции выполняется с помощью инструментов GDAL.

Обрезка изображения по заданной векторной маске объекта «ЗСХН». Обрезка позволяет уменьшить объем и время обработки изображения.

Расчет вегетационного индекса NDVI выполняется по формуле (1.7). В результате создается канал изображения со значениями NDVI ($Band_{NDVI}$) (рисунок 2.16, а).

2.3.4 Использование вегетационных индексов в задачах мониторинга объектов подстилающей поверхности Земли

Вегетационные индексы широко применяются при изучении характеристик растительности в решении различных мониторинговых задач. Наиболее широко вегетационные индексы используются в исследовании экологической обстановки, лесном хозяйстве и, в частности, сельском хозяйстве. Существует большое количество работ зарубежных и российских исследователей [1, 24, 37, 42, 86], в которых рассматриваются различные методики и алгоритмы локализации и распознавания различных объектов подстилающей поверхности Земли природного и техногенного характера по многоспектральным данным ДЗЗ. Описаны подходы к оценке урожайности и управлению ЗСХН на основе методов анализа изображений, включающих методы сегментации, классификации, анализа текстурных и спектральных признаков.

В основном можно выделить подходы, основанные на следующих методах:

- Методы сегментации изображений с целью локализации объектов.
- Методы классификации изображений, основанные на обучающих наборах данных.
- Методы автоматической классификации изображений без обучения.
- Методы нейронных сетей [86].
- Деревья решений.

Входными наборами данных ДЗЗ для таких методов являются как отдельные каналы аэрокосмических изображений, характеризующиеся диапазоном спектральных значений, так и изображения, полученные в результате различных

преобразований. Например, исходными данными могут являться изображения, содержащие значения различных спектральных или текстурных признаков [89].

В частности, для задач агромониторинга широкую популярность получил индекс NDVI, по значениям которого проводится анализ ЗСХН с целью оценки урожайности [4, 22, 29, 52, 53, 60, 61, 74, 88, 102, 119], прогнозирование урожайности, состояния посевов и т. д.

В качестве примеров работ, где описывается применение спектральных индексов, можно привести работу [111]. В работе описан подход картирования с/х культур и оценки состояния урожайности. Авторы используют сегментацию по разновременному набору данных Landsat-7 и индексу NDVI.

В работе [88] используется метод объектно-ориентированного анализа изображений, дерево решений и индексы растительности, что в совокупности позволяет детектировать большое количество типов культур и оценивать состояние полей. Индекс NDVI используется для определения основных групп культур.

Авторы в [61] применяют NDVI для сравнительного анализа спектральных характеристик яровой пшеницы с ожидаемой урожайностью в районе Северного Казахстана. Результаты, полученные по NDVI, сравниваются с другими вегетационными индексами, такими как DVI, RVI, WdVI, SAVI и др. Отмечается, что все спектральные индексы, а также собственные значения спектральных каналов RED и NIR могут быть одинаково успешно применены для оценки состояния культуры.

Схожая задача решалась в [119], где используются временные ряды NDVI для оценки площадей рисовых полей в северо-восточной Индии. NDVI рассчитывается по данным MODIS с учетом фенологических фаз развития риса. Точность оценки площадей составляет 93 %.

По данным NDVI проводились исследования посевов зерновых культур на юге России [22, 29], аналогичные работы проводились в Новосибирской области [52, 53], также корреляция спутниковых и наземных исследований

растительности в Республике Хакасия [74], Красноярском крае [23]. Для исследования использовались временные ряды накопленных архивов данных MODIS, SPOT, Landsat. Авторами отмечается высокое влияние индекса NDVI на точность локализации ЗСХН и анализ динамики вегетации по разновременным наборам данных.

Спектральные индексы используются и при решении задач классификации застройки городских районов [102]. Классификация осуществляется с использованием комбинации данных системы метеорологической спутниковой программы (Operational Linescan System – DMSP-OLS), изображений Landsat и данных GlobeLand30, которые предоставляют информацию по растительному покрову с разрешением 30 м. В качестве способа уточнения результатов классификации и оптимизации обучающей выборки авторы используют вегетационный индекс NDVI с заданием порогов значений точек, соответствующих растительности и городской застройке. Предлагаемый авторами метод показал улучшенный результат локализации областей городской застройки с точностью до 96 %, что лучше обычной классификации на 7 %.

В большей степени рассмотренные работы ориентированы на изучение сравнительных характеристик различных подходов и алгоритмов распознавания объектов подстилающей поверхности Земли, в частности ЗСХН.

Развитием задач агромониторинга являются задачи точного земледелия, где применение методов ДЗЗ и, в частности, спектральных вегетационных индексов не менее актуально и является одним из перспективным инструментов изучения структуры земель [5]. На основе индексных карт осуществляется контроль фактической всхожести культуры, пестроты посевов, прироста биомассы.

Задачи точного земледелия, сформулированные несколько десятков лет назад [33, 109, 116], определили несколько направлений применения аэрокосмических данных в агромониторинге. К таким направлениям относятся:

- Детектирование в рамках контура поля аномальных проявлений в развитии с/х культур, возникающих под влиянием как естественных, так и техногенных

факторов, в результате которых растительность подвержена засоренности, поражению вредителями, недостатку влаги, питательных элементов.

- Измерение спектральных вегетационных индексов и установление взаимосвязи между диапазонами их значений и биофизическими параметрами растительности.

- Разработка методов оценки продуктивности растительного покрова для оказания поддержки принятия решений.

Немаловажной и актуальной задачей в точном земледелии является и оптимизация использования с/х техники [71]. Использование с/х техники, с точки зрения точного земледелия, связано с процессами дифференцированной обработки неоднородных участков почвы. Такая обработка включает точечное внесение удобрений и гербицидов, средств химической защиты растительности, точечный посев, орошение и др.

Методы ДЗЗ, включая вегетационные индексы, информацию о химическом составе почв (который по сравнению со значениями индексов инвариантен) позволяют создавать «карты-задания», на основе которых создаются файлы предписаний для использования в навигационной аппаратуре с/х техники для точечной обработки неоднородных участков поля.

Использование систем глобального позиционирования позволяет внедрять в с/х технику системы курсоуказания, которые позволяют указывать водителю направление для точного вождения по параллельным рядам в ходе агротехнических работ как в рамках контура целого поля, так и в рамках отдельно взятых неоднородных участков поля. Такой подход позволяет значительно (по разным оценкам от 10 до 30 %) снизить расходы на ГСМ, посадочный материал, минеральные и органические удобрения, средства защиты растений, а также минимизировать пропуски или перекрытия.

При условии, что агротехнологические работы выполняются по всему полю, задание курсов для параллельного вождения ограничивается рамками контура поля, которые в идеале представляют прямоугольную выпуклую форму. Однако если работы проводятся на локализованных неоднородных участках поля, то

необходимо, чтобы такие участки имели правильную выпуклую форму контура. При этом не менее важен размер и ширина контура неоднородности, которые должны соответствовать ширине используемого с/х оборудования (сеялка, борона и пр.), крепящегося к технике.

Сегменты, соответствующие неоднородным участкам, полученные в результате анализа аэрокосмических изображений, зачастую не имеют правильной выпуклой формы и подходящих размеров, при условии, что методы анализа применялись корректно. Задача построения маршрута параллельного вождения в таком случае является сложной, а проведенный обзор литературы по данному вопросу показал, что получение контуров напрямую связано с объездом полей с GPS приемником.

Решением такой задачи может быть приведение результатов анализа изображений от иконического уровня или уровня сегментов к уровню геометрических структур, на котором полученные сегменты представлены контурами полигонов, которые возможно преобразовать к правильной, с точки зрения организации параллельного вождения, выпуклой форме. Особенностью данной задачи является вариативность требуемых размеров и формы контуров неоднородностей, зависящая от размеров используемого с/х оборудования и применяемых технологий обработки земель.

В литературе недостаточно освещены вопросы, связанные с локализацией неоднородностей с учетом ограничений на значения геометрических признаков размера и формы, поэтому разработка алгоритма, позволяющего получать альтернативные варианты локализации неоднородностей в зависимости от заданных КП ограничений форм и размеров неоднородных областей поля, является актуальной.

2.3.5 Локализация неоднородных областей объекта

Задача локализации неоднородных участков объекта «ЗСХН» и определения их состояний по данным ДЗЗ рассматривается как задача сегментации спутникового изображения по спектральным признакам с целью выделения

пространственных неоднородностей в рамках контура объекта. Для изображения задана функция яркости $f(x, y)$, которая преобразуется оператором вида:

$$TH: f(x, y) \rightarrow s(x, y),$$

$$s(x, y) = \begin{cases} \lambda_i & \text{при } D_i \leq f(x, y) < D_{i+1}, \\ \lambda_0 & \text{при } f(x, y) \leq D_0, \\ \lambda_{m-1} & \text{при } f(x, y) > D_{m-1} \end{cases} \quad (2.10)$$

где $s(x, y)$ – сегментированное изображение; M – число результирующих сегментов; $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{m-1}$ – метки сегментов; D_0, D_1, \dots, D_{m-1} – величины порогов, упорядоченные так, что $D_0 < D_1 < D_{m-1}$.

Сегментация позволяет разбить конечное подмножество плоскости Θ_i (область изображения объекта) на M непустых непересекающихся подмножеств $w_i, i = 1, 2, \dots, M$ в соответствии с заданными критериями однородности, которые построены на основе диапазонов значений спектрального признака $NDVI$:

$$s(x, y) = \begin{cases} \lambda_0 = \text{фон} & \text{при } -1 \leq f(x, y) < 0,025, \\ \lambda_1 = f^{w1} \text{ or } f^{w6} & \text{при } 0,025 \leq f(x, y) \leq 0,26, \\ \lambda_2 = f^{w2} \text{ or } f^{w5} & \text{при } 0,26 < f(x, y) \leq 0,43, \\ \lambda_3 = f^{v1} \text{ or } f^{v6} \text{ or } f^{v7} & \text{при } 0,43 < f(x, y) \leq 0,57, \\ \lambda_4 = f^{v2} & \text{при } 0,57 < f(x, y) \leq 0,65, \\ \lambda_5 = f^{v3} & \text{при } 0,65 < f(x, y) \leq 0,72, \\ \lambda_6 = f^{v4} \text{ or } f^{v5} & \text{при } 0,72 < f(x, y) \leq 0,85 \end{cases} \quad (2.11)$$

Вектор признаков X , формируемый для w_i , помимо иконических признаков должен включать пространственные, временные, метрические признаки, физическая интерпретация которых описывает динамическую пространственную структуру объекта. Перечисленные условия являются входными данными и справедливы для рассматриваемых объектов с зерновыми культурами на территории Сухобузимского района Красноярского края. Схожие работы проводились в [4, 60].

Также для интерпретации открытой почвы были приняты во внимание результаты исследований [12], приведенные в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Интерпретация типов объектов по значениям NDVI

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Входные данные

1. Критерии однородности (2.11).
2. Изображение со значениями спектрального признака.

Предусловия

На предыдущих этапах алгоритма должны быть получены и подготовлены спутниковые изображения на заданную область.

Поток действий

1. Сегментация изображения по спектральному признаку NDVI ($Band_{NDVI}$) (рисунок 2.16, б) на основе разметки точек области θ_i пороговым методом (2.10) [3, 7, 15, 17, 18, 27]. Методика выбора порогов яркости точек основывается на ранжировании значений индекса NDVI в соответствии с условиями, заданными в выражении (2.11). Таким образом, определяется принадлежность пикселя тому или иному диапазону значений. На выходе создается сегментированное изображение, обозначим его как $Band_{segment}$.

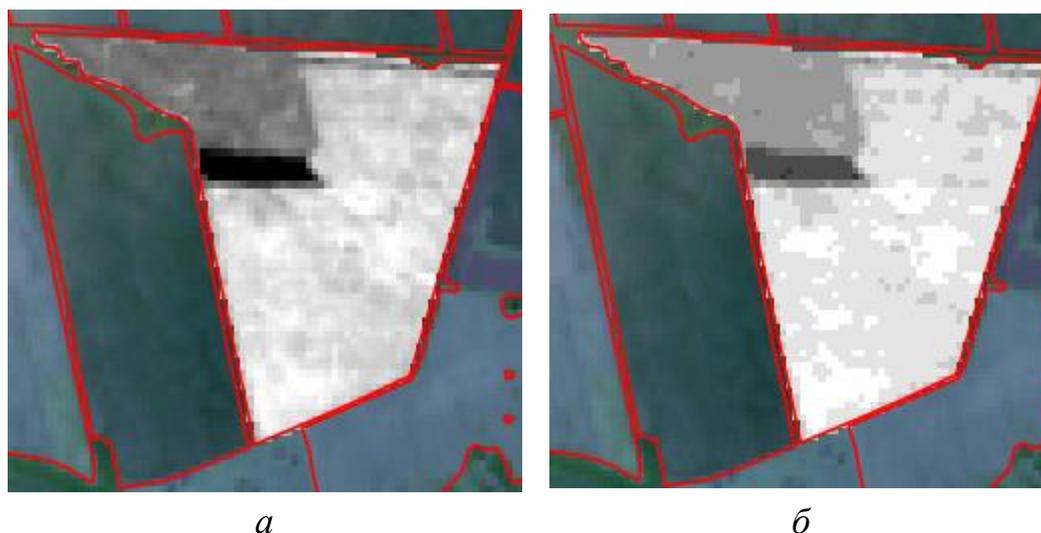


Рисунок 2.16 – а) фрагмент изображения $Band_{NDVI}$; б) фрагмент изображения после сегментации $Band_{Segment}$

2. Сегментированное изображение приводится к уровню объектно-реляционных структур (рисунок 2.17), где для каждой области w_i j -го объекта рассчитаны заданные признаки, позволяющие сопоставить физическое состояние f^i поля локализованной области w_i на изображении, что отражено в объектно-реляционной модели неоднородности объекта «ЗСХН»:

$$ЗСХН_j = \langle ID, \{P_{\Pi j}^i\}, NS_j^i, NP_j^i, T_j^i, \bar{N}_j^i, Tm, k_j^i, e_j^i, \varphi_j^i, f_{Aj}^i \rangle, \quad (2.12)$$

где ID – идентификатор j -го объекта; $P_{\Pi j}^i$ – множество пространственных координат i -й однородной области j -го объекта; NS_j^i – множество значений площади; NP_j^i – множество значений периметра; T_j^i – множество значений толщины; \bar{N}_j^i – множество средних значений NDVI; Tm – время, соответствующее текущему АТМ ($e_j^i \in E$) и текущей фенофазе ($\varphi_j^i \in \varphi$) фактической сельхозкультуры k_j^i , соответствующей наблюдаемому j -му объекту; f_{Aj}^i – актуальное состояние i -й однородной области j -го объекта.

Для выделения контуров сегментов и приведения их в векторный формат применяется сканирующий алгоритм, реализованный в методе GDALPolygonize() библиотеки OSGEO.

Суть алгоритма заключается в сканировании изображения окном размера 3×3 (принцип 8-соседства) и выделении контурных точек. Векторизация позволяет представить однородные области объекта в виде векторных полигонов n -угольной геометрической формы. Данный алгоритм наиболее применим к изображениям, содержащим целочисленные значения, определяющие связность точек.

Рассчитываемые признаки для каждого контура сегмента представлены в объектно-реляционной табличной форме, которая, помимо признаков, хранит и геометрический контур сегмента.



Рисунок 2.17 – Векторизованные однородные области объекта (выделены желтым)

3. Расчет спектральных и метрических признаков сегментов. К рассчитываемым параметрам относятся:

- площадь NS , рассчитываемая по формуле (1.4);
- периметр NP , рассчитываемый по формуле (1.5);
- толщина T , рассчитываемая по формуле (1.6);
- среднее значение $NDVI$:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NDVI(x_i, y_i) \quad , \quad (2.13)$$

где n – количество пикселей объекта.

4. Проверка заданных КП ограничений на минимальную площадь учитываемых сегментов. Результирующие сегменты подвергаются анализу на соответствие заданным ограничениям признака размера. Для сегментов w_i : $NS_{w_i} \leq NS_{w_i}^*$ выполняется объединение с соседними сегментами большей площади $w_{max} : w_i \cup w_{max}$, где $NS_{w_i}^*$ – минимальное значение площади, заданное КП, рисунок 2.18, б (красные контуры).

5. Оценка состояния F сегмента w_i , характеризующего неоднородность (описано в § 2.3.6).

6. Если при проверке ограничений на признак формы выполняется условие $NS_{w_i} > NS_{w_i}^*$ и $T_{w_i} \leq T_{w_i}^*$, где $T_{w_i}^*$ – заданное ограничение толщины соответственно, выполняется преобразование контура сегмента к выпуклой форме по алгоритму Джарвиса [96], рисунок 2.18, б (желтые контуры).

Суть алгоритма состоит в определении последовательности элементов множества точек контура сегмента, образующих выпуклую оболочку для этого множества. Алгоритмическая сложность $O(nh)$, где n – общее число точек на плоскости, h – число точек в выпуклой оболочке. Алгоритм для множества точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ работает следующим образом:

- Выбирается самая левая нижняя точка p_1 , координата x которой имеет наименьшее значение.
- Выбирается следующая точка p_2 , которая является соседней справа и имеет наименьший положительный полярный угол относительно точки p_1 .
- Для каждой точки p_i , где $2 < i \leq P$, против часовой стрелки берется такая точка p_{i+1} , для которой косинус угла между прямыми $p_{i-1}p_i$ и $p_i p_{i+1}$ является минимальным и определяется через скалярное произведение векторов:

$$\cos\varphi = \frac{(\bar{a}, \bar{b})}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|} = \frac{a_x b_x + a_y b_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \cdot \sqrt{b_x^2 + b_y^2}}. \quad (2.14)$$

Такая точка и будет следующей вершиной выпуклого многоугольника.

- Критерием завершения алгоритма является выражение $p_{i+1} = p_1$.

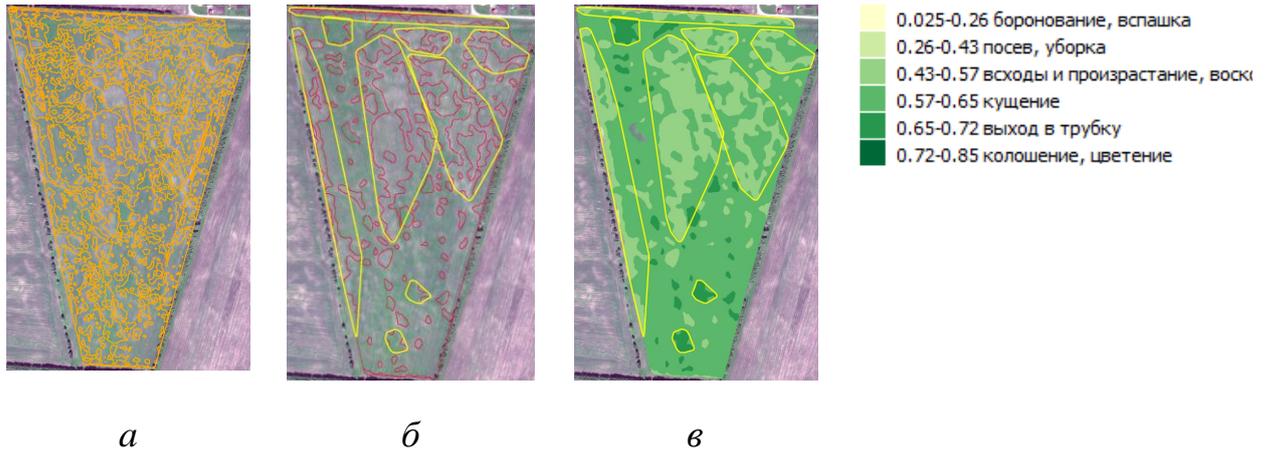


Рисунок 2.18 – Примеры карт неоднородности объекта «ЗСХН» при различных величинах порогов NS и T : а – без ограничений на NS и T ; б – $NS \leq 0,1$ га, $T \leq 0,2$; в – интерпретация состояний неоднородностей

7. В результате сегментации, учитывающей цели КП, создается ряд объектно-реляционных структур, которые можно представить в виде карт неоднородности объекта $ZSXN_j$, которые отличаются детализацией пространственной структуры объекта и предлагаются КП для оценки (рисунок 2.18).

Выходные данные

1. Изображение $Band_{NDVI}$, содержащее значения спектрального признака в формате GeoTIFF, на область, заданную векторной маской объекта для детальной визуализации и оценки хода вегетации или проводимых агротехнических мероприятий.
2. Сегментированное изображение $Band_{segment}$ в формате GeoTIFF.
3. Карта неоднородностей в формате SHP ESRI для заданной области.

Постусловия

Таким образом, полученные расчеты наравне с измерениями, проводимыми при полевых исследованиях, с помощью беспилотных средств, призваны оказать информационную поддержку КП в процессе контроля хода вегетации или агротехнических мероприятий и принятия управляющих решений. КП может влиять на модель объекта путем корректировки его свойств, оценивать прирост биомассы, оценивать процессы уборки культур, результаты боронования, вспашки полей, принимать решение о точечном использовании

специализированной сельскохозяйственной техники для дифференцированной обработки полей в соответствии с картами неоднородностей полей.

2.3.6 Определение состояний неоднородных областей объекта

Определение состояний неоднородных областей объекта «ЗСХН» по спутниковым изображениям зависит от рассчитываемых значений спектральных индексов, таких, как NDVI. Значения индексов изменяются с течением времени под влиянием погодных-климатических условий и свойств растительности. При их измерении высока роль случайных факторов. На отражательные характеристики растительности влияют изменчивость погодных условий, неравномерности химического состава и влажности почвы, технологической обработки и т.д. Так как на практике, как правило, отсутствует возможность проведения высокодетального обследования земельных участков, в настоящей работе характер проявления неравномерности рассматривается, как комбинация детерминированных и случайных факторов.

В таблице 2.6 приведены состояния объекта «ЗСХН», основанные на временной последовательности смены фенологических фаз зерновых культур. Для каждого состояния приведены обобщенные временные диапазоны и диапазоны значений NDVI в каждом из состояний, определенные на основе многолетних наблюдений 2012–2016 г.г.

Как видно из таблицы, при нормальном развитии растительности диапазоны значений индекса увеличиваются, что соответствует приросту биомассы. Уменьшение значений индекса в конце июля соответствует периоду созревания. При этом, если в диапазон времени от боронования до посева значения индекса лежат в пределах от 0,1 до 0,26, то это сигнализирует о процессе зарастания поля сорной растительностью f^{v0} . При низких показателях индекса, начиная с фазы f^{v1} , существует вероятность, что некоторая область находится в состоянии деградации f^{v8} . Деградация, как результат изменения химического состава почвы и эрозийных процессов, может проявиться в любые временные периоды. Она

характеризуется значениями индекса NDVI, близкими к значениям открытой почвы или разряженной растительности.

Таблица 2.6 – Пример последовательности смены фенологических фаз зерновых с/х культур

№	Состояние объекта (фаза)	Начало	Окончание	Длительность, дней	Диапазон значений NDVI
1	Боронование (f^{w1})	10.05	05.06	26	0,025–0,26
2	Посев (f^{w2})	24.05	05.06	11	0,26–0,43
3	Всходы и произрастание (f^{v1})	05.06	22.06	17	0,43–0,57
4	Кущение (f^{v2})	22.06	07.07	15	0,57–0,65
5	Выход в трубку (f^{v3})	07.07	15.07	8	0,65–0,72
6	Колошение (f^{v4})	15.07	25.07	10	0,72–0,85
7	Цветение (f^{v5})	25.07	11.08	17	
8	Восковая спелость (f^{v6})	11.08	21.08	10	0,43–0,57
9	Твердая спелость (f^{v7})	21.08	29.08	8	
10	Уборка (f^{w5})	31.08	02.09	3	0,26–0,43
11	Вспашка (f^{w6})	10.09	–	–	0,025–0,26

Определение состояния F неоднородной области w_i рассматривается как функция зависимости от времени Tt и значений вегетационного индекса \bar{N} : $F_{w_i}(Tt, \bar{N})$.

Немаловажную роль в оказании информационной поддержки принятия решений конечным пользователем относительно точечного обследования неоднородностей играет точность определения принадлежности неоднородной области тому или иному состоянию.

Для этого, во-первых, требуется оценить, насколько значения индекса неоднородной области w_i отклонены от заданной нормы. Для каждой неоднородности рассчитывается среднеквадратическое отклонение σ . Во-вторых, рассчитать вероятность корректного определения состояния. Данный расчет основывается на вероятности попадания среднего значения индекса \bar{N} области w_i в диапазон значений, соответствующих состояниям объекта (таблица 2.6).

Вероятность попадания \bar{N} в заданные диапазоны рассчитывается по формуле вероятности попадания в интервал дискретной случайной величины:

$$P(\alpha < \bar{N} \leq \beta) = \Phi_o\left(\frac{\beta - d}{\sigma}\right) - \Phi_o\left(\frac{\alpha - d}{\sigma}\right), \quad (2.15)$$

где α и β – заданные пороговые значения интервалов,

d – математическое ожидание,

Φ_o – функция Лапласа.

В случае, если значение σ для неоднородной области w_i является незначительным, вероятность попадания такой области в диапазон, соответствующий некоторому состоянию высока и близка к единице. Следовательно, корректность определения текущего состояния близка к 100 %. Затем текущее состояние области w_i можно сравнивать с эталонным состоянием. Если текущее состояние не совпадает с эталонным и при этом высока вероятность того, что состояние w_i определено корректно, то рекомендуется обследовать рассматриваемую область w_i .

В случае существенного отклонения значения σ для неоднородной области w_i , корректность определения состояния такой области значительно снижается, возрастает ошибка.

Вероятность попадания случайного среднего значения \bar{N} вегетационного индекса в диапазон значений, соответствующих некоторому состоянию рассчитывается для каждой неоднородной области w_i .

Рассмотрим пример определения состояния F_{w_i} и вероятности корректного определения состояния τ_F для некоторой неоднородной области w_i . К исходным данным относится среднеквадратическое отклонение значений вегетационного индекса в области w_i $\sigma = 0,14$, среднее значение вегетационного индекса $\bar{N} = 0,41$, дата проведения измерений 7 июня.

Учитывая, что функция F_{w_i} определения состояния зависит от времени и значения вегетационного индекса, дата 7 июня, в соответствии с таблицей 2.6, соответствует состоянию f^{v1} – всходам и произрастанию. Однако среднее значение индекса области w_i соответствует состоянию f^{w2} – посев.

Рассчитаем вероятность корректного определения состояния τ_F в соответствии с (2.15), таблица 2.7. Несмотря на то, что значение σ велико, алгоритм с достаточно высокой вероятностью (83 %), определил, что текущее состояние неоднородной области w_i – f^{w2} (посев). Высокая вероятность (63 %) того, что состояние w_i – f^{v1} , говорит о том, что неоднородность находится в пограничном состоянии между окончанием процесса посева и наступлением фазы всходов и произрастания.

Таблица 2.7 – Пример расчета вероятности корректного определения состояния при $\sigma = 0,14$ и $\bar{N} = 0,41$

Состояние	Корректность определения, %
Боронование (f^{w1})	2,7
Посев (f^{w2})	83
Всходы и произрастание (f^{v1})	63
Кущение (f^{v2})	16
Выход в трубку (f^{v3})	0,6
Колошение (f^{v4})	0,2
Цветение (f^{v5})	

Рассмотрим еще один пример, для которого значение σ низкое ($\sigma=0,026$), среднее значение вегетационного индекса $\bar{N} = 0,59$, дата проведения измерений 30 июня. Пользуясь теми же рассуждениями, что и в предыдущем примере, определяем, что состояние соответствует f^{v2} – фазе кущения. Расчет вероятности

корректного определения состояния приведен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Пример расчета вероятности корректного определения состояния при $\sigma = 0,026$ и $\bar{N} = 0,59$

Состояние	Корректность определения, %
Боронование (f^{w1})	0
Посев (f^{w2})	0
Всходы и произрастание (f^{v1})	45
Кущение (f^{v2})	98
Выход в трубку (f^{v3})	0,2
Колошение (f^{v4})	0
Цветение (f^{v5})	

Как видно из таблицы вероятность корректного определения актуального состояния – 98 %, что соответствует эталонному состоянию – f^{v2} . Вероятность определения (45 %) актуального состояния, как f^{v1} – всходы и произрастание, говорит о том, что неоднородность несколько дней назад была в фазе всходов и произрастания и момент проведения измерений растительность не до конца вошла в фазу кущения, что может быть связано с неравномерностью влажности почвы.

2.4 Выводы

1. Разработана модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ.

Новизна модели заключается в разработанной структуре диалога между конечным пользователем и системой агромониторинга, которая использует диалоговые средства, позволяющие пользователю взаимодействовать с системой для постановки задач мониторинга пространственных объектов на ограниченном подмножестве естественного языка в рамках терминологии, принятой в предметной области пользователя.

Разработаны структуры диалогов для задания начальных признаков модели пространственного объекта, задания параметров мониторинга и оценки результатов мониторинга.

2. Разработан алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта.

Задача локализации неоднородных участков объекта «ЗСХН» и определения их состояний по данным ДЗЗ рассматривается как сегментация выделенной области изображения пороговым методом по спектральным признакам с привлечением дополнительной информации. Методика задания порогов основана на проведении полевых измерений вегетационного индекса нормированной разницы на полях Сухобузимского района с зерновыми культурами. Исходными данными для обработки являются спутниковые изображения КА Landsat-8 и Sentinel-2A.

Новизна разработанного алгоритма состоит в возможности преобразования полученных сегментов, соответствующих неоднородностям, к заданным требованиям размера NS и формы T на геометрическом уровне. В преобразовании учитываются только те сегменты, состояние которых не соответствует текущей фенологической фазе. Это осуществляется за счет фильтрации локализованных сегментов с учетом определения вероятности их принадлежности τ_F к некоторому актуальному состоянию $f_A^i \in F$ и сравнения f_A^i с нормативным состоянием f_n^i , характерным текущему времени.

В результате задания различных диапазонов значений измеряемых признаков размера и формы, неоднородные области со значением площади менее заданной исключаются из обработки, а области вытянутой, неправильной формы приводятся к выпуклой форме, которая более приемлема с точки зрения применения специализированной с/х техники для дифференцированной обработки земельных участков в случае необходимости. Создаются различные альтернативные варианты решения поставленной задачи по локализации неоднородной динамически изменяющейся пространственной структуры объекта, которые представлены в виде карт неоднородностей.

Карта неоднородностей позволяет визуализировать заданный объект с учетом его изменяемой во времени пространственной структуры с набором атрибутов (2.12) для каждого i -го структурного элемента j -го объекта.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМА

3.1 Разработка программного обеспечения для решения поставленной задачи

В рамках решения поставленной задачи было разработано следующее программное обеспечение:

1. База данных пространственного объекта.
2. Web-интерфейс системы агромониторинга, предназначенный для постановки конечным пользователем задачи мониторинга объекта и оценки результатов мониторинга.
3. Программная реализация алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта «ЗСХН».

Перечисленные программные и информационные подсистемы спроектированы и реализованы в составе творческого коллектива в рамках проекта по созданию системы агромониторинга Красноярского края.

Развернутая логическая структура системы изображена на рисунке 3.1 в виде диаграммы пакетов UML. Подход к формированию структуры системы основан на общепринятых компонентах при разработке систем web-ГИС и ДЗЗ [38, 39, 44, 50, 54]. В целом структура включает следующие подсистемы:

- Подсистема получения данных ДЗЗ.
- Подсистема обработки геопространственных данных (ГПД).
- Подсистема хранения.
- Подсистема взаимодействия с внешними сервисами.
- Подсистема администрирования.
- Подсистема визуализации и навигации по ГПД.
- Подсистема удаленного доступа к данным.

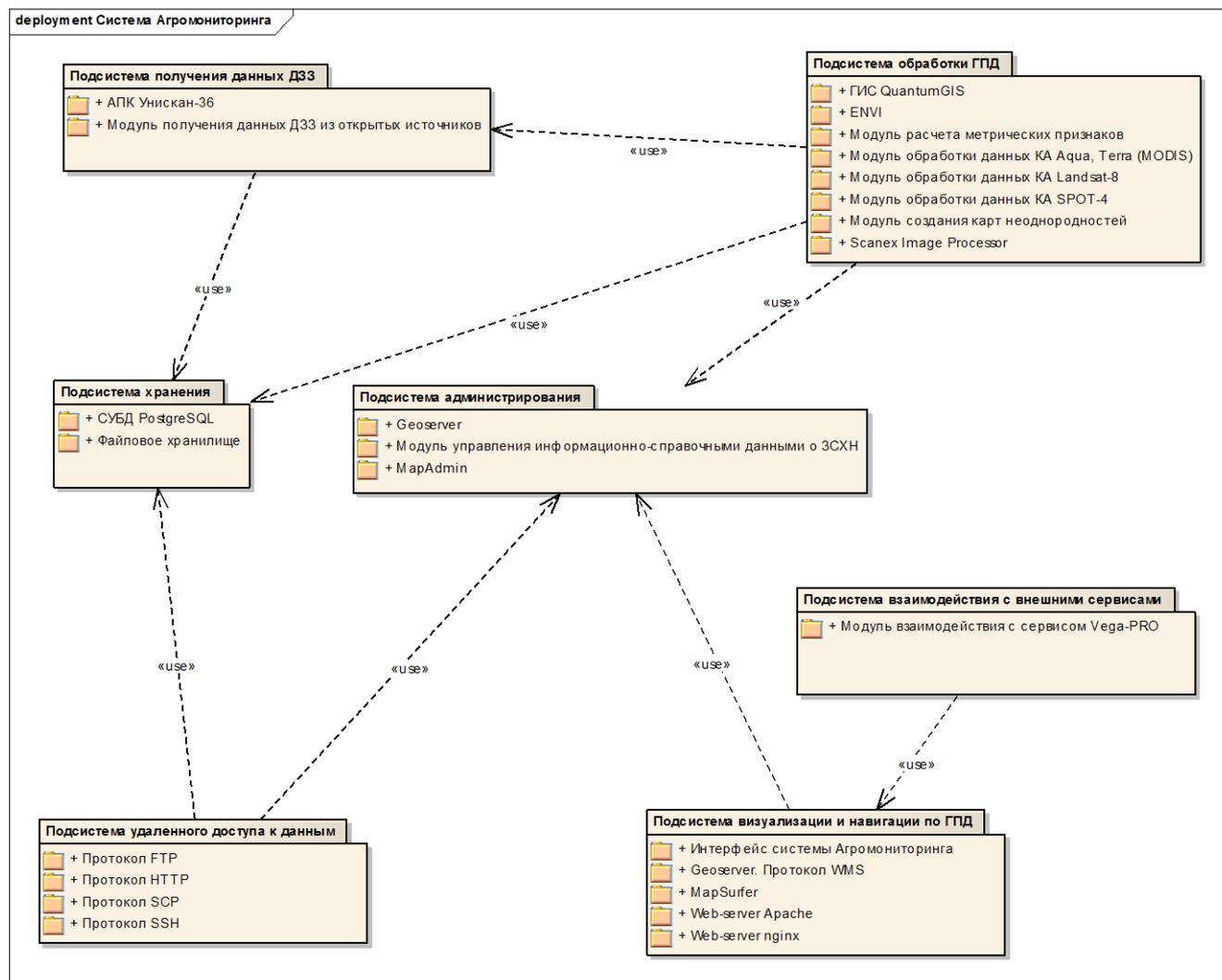


Рисунок 3.1 – Развернутая логическая структура системы

Техническое обеспечение системы основано на следующих аппаратных устройствах:

- Антенный приемный комплекс (АПК) «Унискан-36», осуществляющий круглогодичный прием данных ДЗЗ среднего и низкого пространственного разрешения. Включает сервер приема данных ДЗЗ под управлением ОС Windows XP и специализированное программное обеспечение (ScanReceiver) для формирования файла входного битового потока данных.
- Сервер обработки спутниковых данных – DEPO Storm 3350C3 под управлением ОС Windows Server 2003.
- Сервер хранения архивации спутниковых данных на аппаратной платформе VMWare ESXI50 на аппаратной базе IBM Blade Server E HS21XM под управлением ОС FreeBSD.

- Сервер визуализации данных на программной платформе VMWare VSphere 5.0 на аппаратной базе IBM BladeCenter E Blade Server HS21XM под управлением ОС Linux Debian 9.

- Оптоволоконная сеть с пропускной способностью 1 Гбит.

Физическое размещение элементов системы и логические связи между физическими блоками изображены на рисунке 3.2 в виде диаграммы компонентов и развертывания UML.

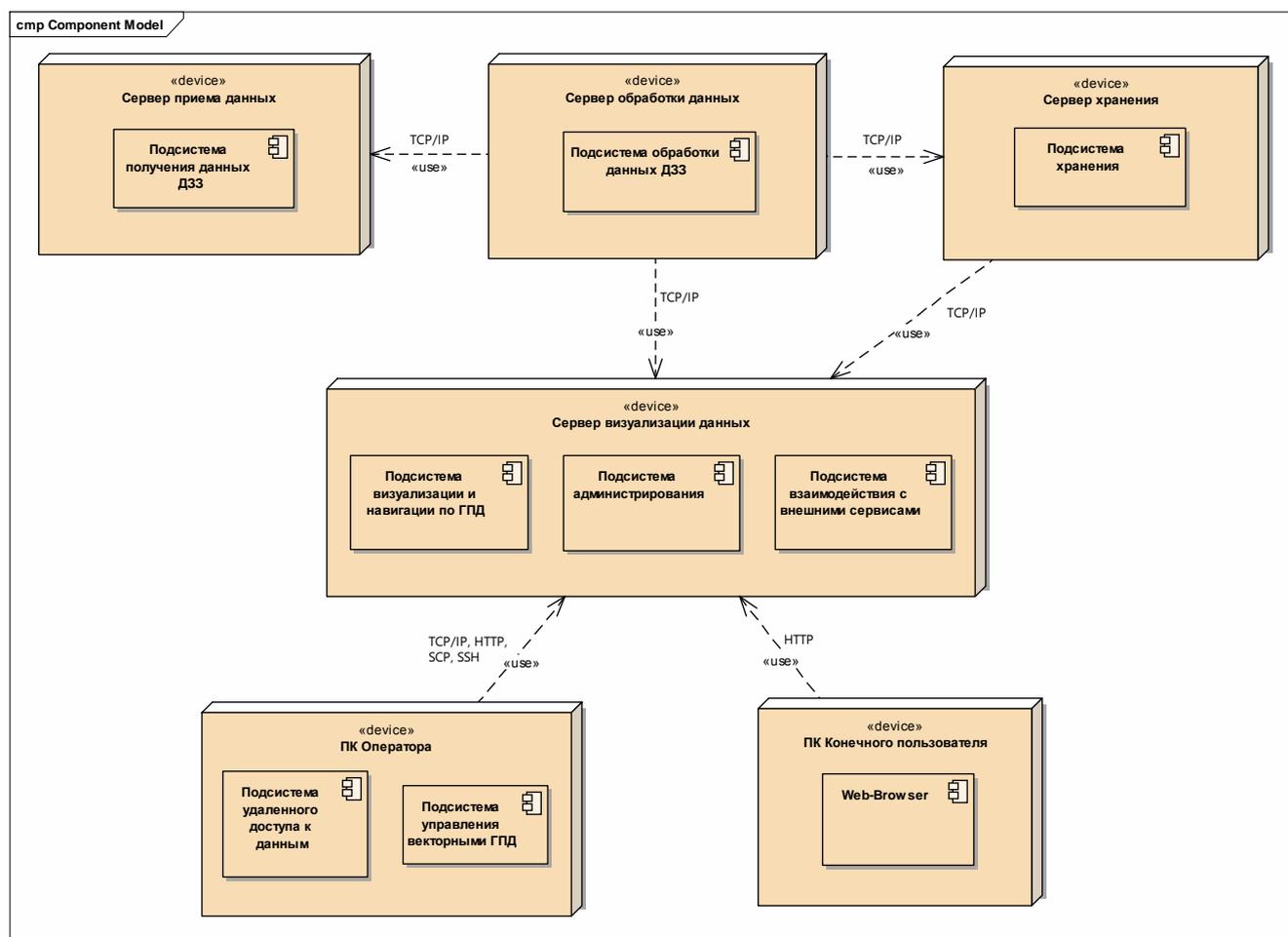


Рисунок 3.2 – Архитектура системы

Далее рассмотрим состав и назначение используемых структурных компонентов системы.

3.1.1 Разработка базы данных пространственного объекта

Для реализации модели объекта применяется объектно-реляционный подход, рассмотренный в § 1.6.3, позволяющий в единой среде организовать целостное

представление признаков объекта, описанных в (1.8), а также структурировать информацию об объекте на основе временных связей между событиями и связанными с ними состояниями с учетом структуры объекта, анализировать изменение объекта.

Сущности, которыми характеризуется модель (рисунок 3.3 – логическая модель, рисунок 3.4 – физическая модель), можно разделить на два типа. К первому типу относятся сущности, описывающие динамику изменения объекта во времени. Такими сущностями являются:

- «Объект». Основная сущность, которая объединяет априори заданные и измеряемые параметры объекта, описанные в модели (1.8).
- «План_Факт». Описывает историю план-фактного учета посадки культур.
- «Объект_мероприятие». Описывает множество запланированных во времени событий и связанных с ними состояний объекта.
- «Вегетационный индекс». Содержит дискретные измерения среднего значения индекса NDVI и ссылку на изображение.
- «Временная структура объекта». Содержит дискретные измерения неоднородностей объекта, характеризуемых средним значением NDVI, площадью и контекстным описанием.

Ко второму типу относятся сущности информационно-справочного характера. Такие сущности содержат строго структурированную информацию с определенным набором атрибутов, к ним относятся:

- «Химсостав». Классификатор химических элементов состава почвы и описание их диапазонов.
- «Культура». Классификатор сельскохозяйственных культур.
- «Сельхозпроизводитель». Классификатор сельхозпроизводителей.
- «Агротехнические мероприятия». Классификатор регламентированных агротехнических мероприятий.
- «Форма собственности». Классификатор форм собственности.
- «Муниципальный район». Справочник муниципальных районов субъекта федерации.
- «Субъект федерации». Справочник субъектов федерации.

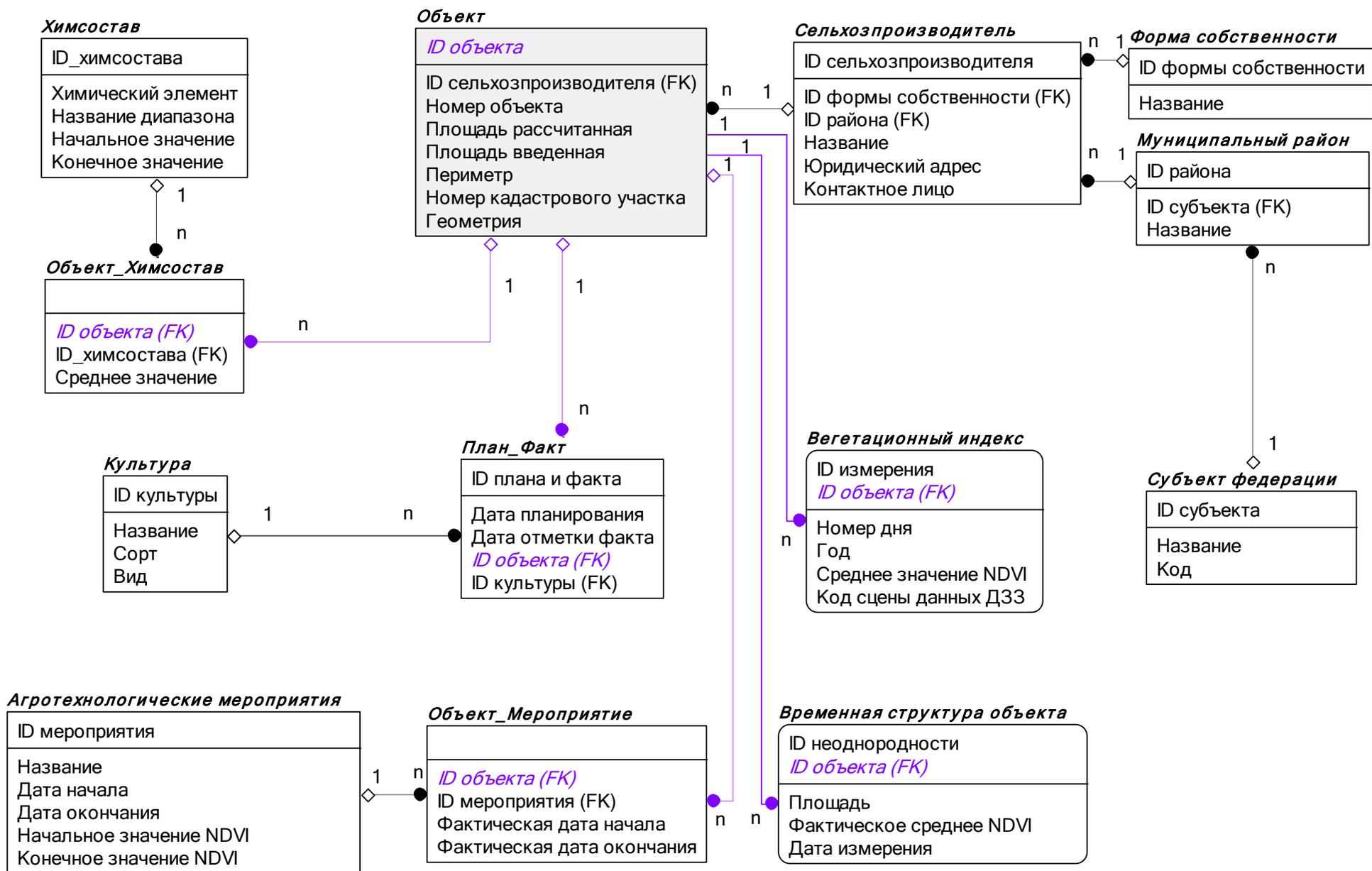


Рисунок 3.3 – Логическая ER-модель пространственного объекта

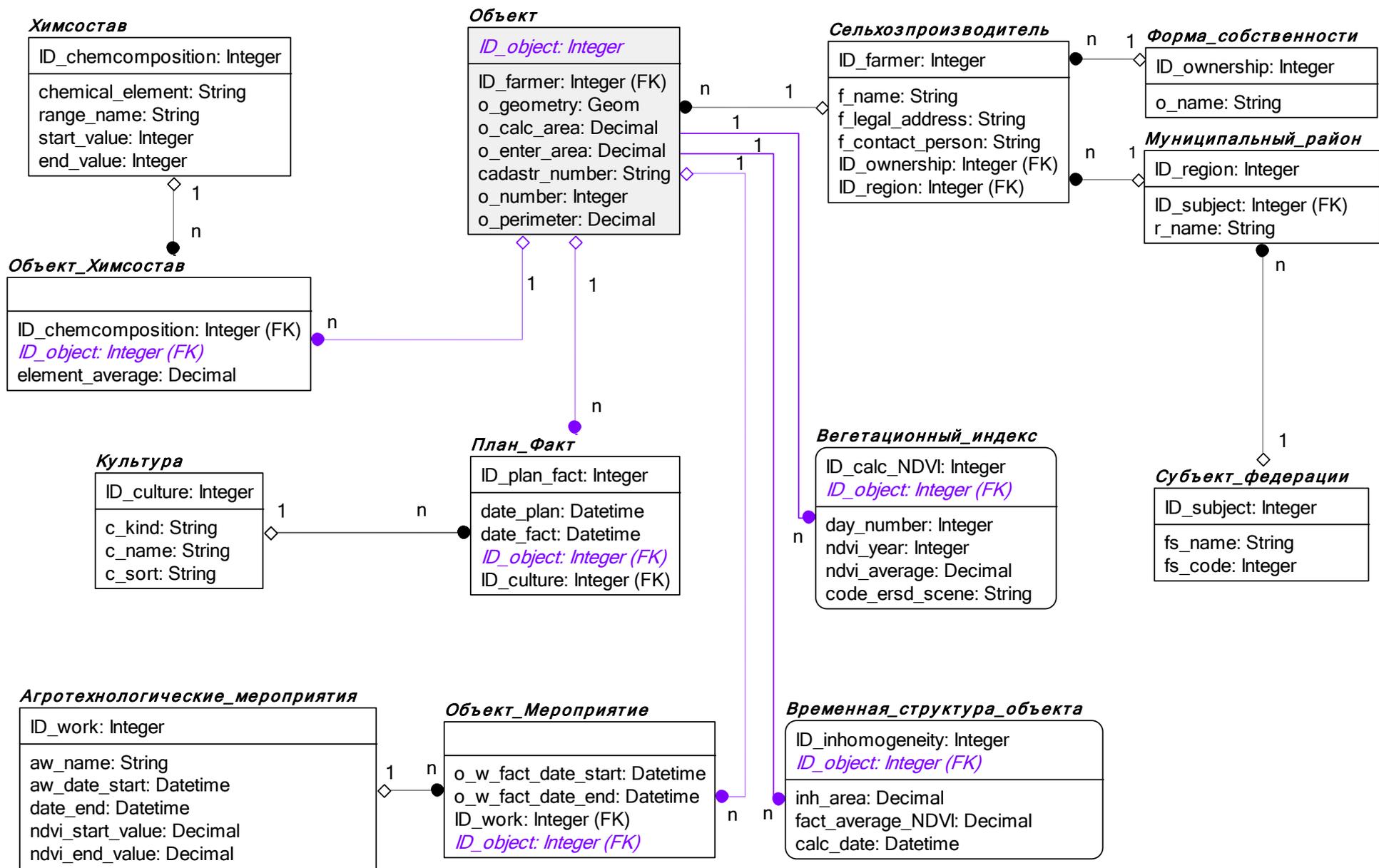


Рисунок 3.4 – Физическая ER-модель пространственного объекта

База данных создана на основе СУБД PostgreSQL 9, позволяющей хранить в реляционном представлении помимо атрибутов объекта и сами векторные объекты с использованием специального пространственного типа данных ST_Geometry. Тип данных ST_Geometry использует спецификацию пользовательских типов данных SQL 3 (UDT), что позволяет создавать столбцы, в которых могут храниться пространственные данные, в частности, двумерные многоугольники (полигоны). Он обеспечивает поддержку SQL-доступа к базам геоданных и базам данных в соответствии со стандартами International Organization for Standards (ISO) и Open Geospatial Consortium, Inc. (OGC). Данный вид хранения расширяет возможности базы данных, обеспечивая хранение для объектов (точек, линий и полигонов), которые представляют графические объекты. Следующая схема демонстрирует иерархию типа данных ST_Geometry и его подклассов (рисунок 3.5).

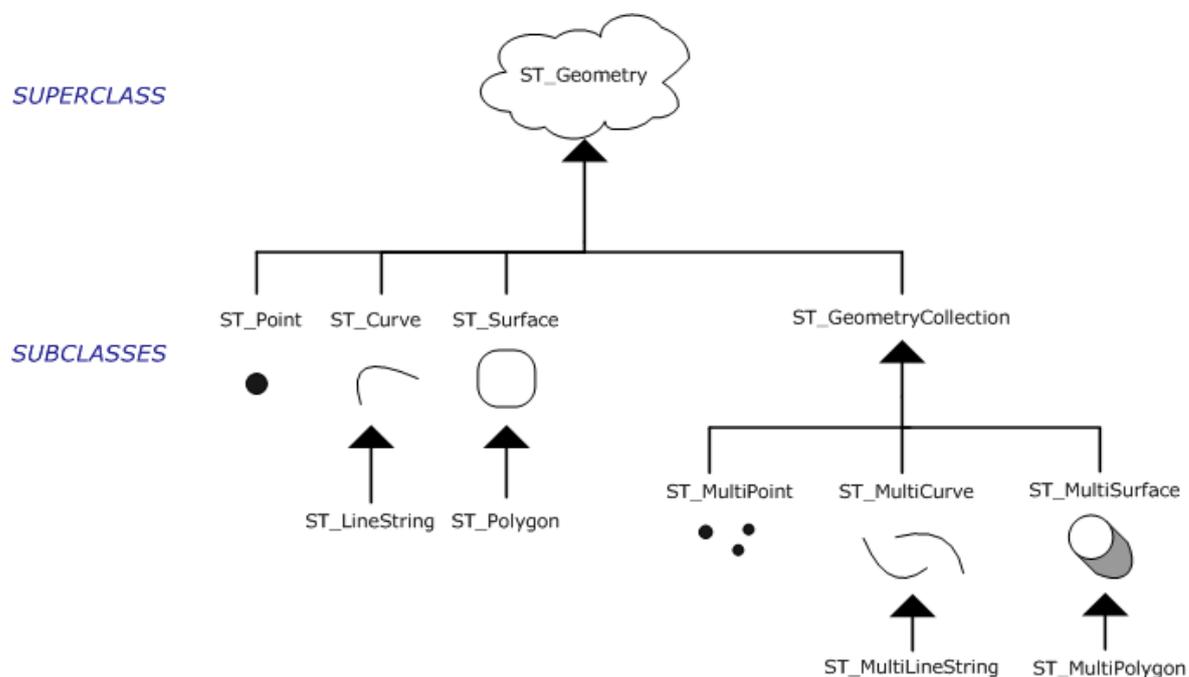


Рисунок 3.5 – Тип данных ST_Geometry и его подклассы

3.1.2 Подсистема получения данных

Подсистема получения данных ДЗЗ предназначена для приема спутниковых данных от различных космических аппаратов, а также поиска и загрузки

спутниковых данных из открытых источников. Включает АПК Унискан-36 и Модуль получения данных ДЗЗ из открытых источников (рисунок 3.6).

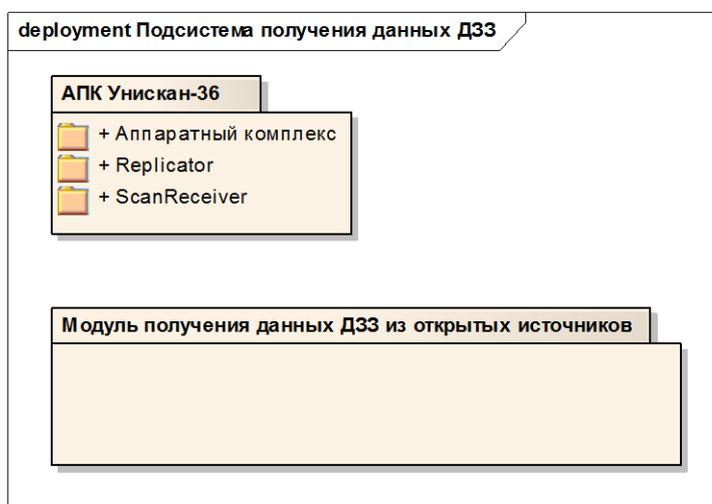


Рисунок 3.6 – Структура подсистемы получения данных ДЗЗ

Унискан-36 – приемная наземная станция X-диапазона (8 ГГц), предназначенная для приема и обработки данных с полярно-орбитальных спутников дистанционного зондирования Земли.

Основными компонентами станции являются антенная система, приемник, программное обеспечение.

Программное обеспечение станции ScanReceiver содержит все средства для ручного управления и настройки станции, составления расписания ее работы и автоматического исполнения расписания. Управление станцией осуществляется только через программное обеспечение.

Функционально станция состоит из:

- антенной системы;
- приемника;
- программного обеспечения.

Антенная система подразделяется на следующие узлы:

- антенна (рефлектор и облучатель);
- малошумящее устройство (МШУ) и 1-й преобразователь частоты;
- опорно-поворотное устройство (ОПУ);

– система управления.

Прием и передача входного потока данных ДЗЗ от станции приема осуществляется в автоматическом режиме.

Модуль получения данных ДЗЗ из открытых источников является программной реализацией фрагмента алгоритма, отвечающего за получение данных ДЗЗ из архива USGS, описанного в § 2.3.2. Модуль разработан на языке Python 2.7 с использованием API USGS, созданным в виде набора расширяющих библиотек (usgs-0.1.9) для Python [57], позволяющих получить доступ к данным архива.

Разработанный модуль позволяет выполнять автоматическую авторизацию, поиск данных Landsat-8, Sentinel-2A в соответствии с условиями временной и пространственной локализации объекта, интерпретацию полученного списка данных в формате XML и выполнять загрузку данных на сервер архивации с помощью интерфейса командной строки (CLI). Такой подход позволяет значительно сократить время поиска релевантных изображений среди больших массивов данных, а также полностью выполнять данный этап без участия КП.

API USGS позволяет выполнять в интерфейсе командной строки следующие основные команды:

Авторизация в сервисе USGS: `usgs login [USGS username] [USGS password]`.

Поиск данных: `usgs search [dataset] --start-date [start date] --end-date [end date] --longitude [lng] --latitude [lat] --node [node]`.

Просмотр метаданных найденных изображений: `usgs metadata [dataset] [entity/scene id 1] [entity/scene id 2] ... [entity/scene id n]`.

Загрузка изображений. Существует два способа загрузки. Первый использует настройки, идентифицирующие изображение в каталоге: `usgs download-options [dataset] [entity/scene id] --node [node]`.

Второй – использует прямую URL к изображению в каталоге: `usgs download-url [dataset] [entity/scene id] --node [node] --product [product]`.

Выход из авторизованного режима: `usgs logout [USGS username] [USGS password]`.

Результатом работы модуля является tar.gz архив, содержащий каналы изображения из архива USGS, загруженный на сервер подсистемы хранения данных.

3.1.3 Подсистема обработки ГПД

Подсистема обработки ГПД включает в себя средства автоматического и автоматизированного режима обработки растровых и векторных ГПД (рисунок 3.7).

К средствам автоматизированной обработки относятся пакеты работы с данными ДЗЗ: ENVI, Scanex Image Processor, QuantumGIS.

К средствам автоматической обработки относятся: модуль обработки данных КА Landsat-8, Aqua, Terra (MODIS), SPOT-4, модуль создания карт неоднородностей и модуль расчета метрических признаков.

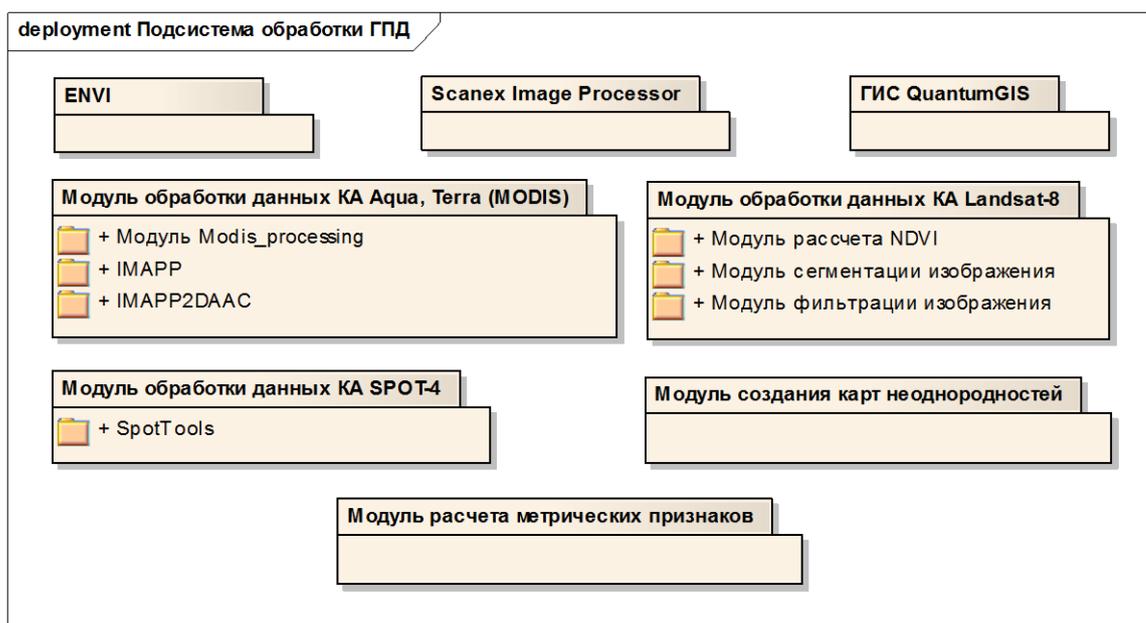


Рисунок 3.7 – Структура подсистемы обработки данных ДЗЗ

ENVI и *Scanex Image Processor* являются схожими программными продуктами и служат для первичной и тематической обработки данных ДЗЗ. Включают в себя набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и её интеграции с данными ГИС.

QuantumGIS используется для автоматизированной обработки и анализа векторных данных, создания и редактирования слоев, измерения зональной статистики.

Модуль обработки данных КА Landsat-8, Sentinel-2A является программной реализацией фрагмента алгоритма, отвечающего за предварительную обработку и подготовку данных, описанного в § 2.3.3. Модуль выполняет следующие шаги алгоритма:

Шаг 1. Распаковка tar.gz архива загруженных данных.

Шаг 2. Выполнение атмосферной коррекции каналов изображения.

Шаг 3. Удаление неинформативных пикселей (облачность) из каналов RED и NIR.

Шаг 4. Совмещение каналов RED и NIR в один файл изображения GeoTIFF.

Шаг 5. Обрезка изображения по векторной маске слоя. В слое может быть как один объект, так и несколько.

Шаг 6. Расчет NDVI по формуле (1.7) для полученного фрагмента изображения.

Шаг 7. Сегментирование изображения в соответствии с выражением (2.11).

Шаг 8. Приведение полученных сегментов к объектно-реляционной структуре. Включает удаление сегментов со значением площади менее заданной; преобразование сегментов с вытянутой неправильной формой геометрии к выпуклой форме.

Модуль разработан на языке Python 2.7 с использованием набора библиотек GDAL/OGR [40, 76]. Библиотека GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) предназначена для чтения, обработки и записи растровых и векторных геопространственных форматов данных. Предоставляет вызывающим приложениям единую абстрактную модель данных для всех поддерживаемых форматов. В работе были использованы функции открытия, чтения и записи изображения с сохранением координатной привязки. Также использовались операции:

Объединение каналов в один файл с использованием утилиты `gdal_merge.py`:

```
gdal_merge.py -separate -of GTiff -o [merged_bands.tif] [band1_path]
[band2_path] [band3_path].
```

Обрезка изображений по векторному контуру (маске) заданного объекта «ЗСХН» с использованием утилиты `gdalwarp.exe`:

```
gdalwarp.exe -dstnodata 0 -q -cutline [mask_path] -crop_to_cutline -
dstalpha -of GTiff [path_merged_bands.tif] [path_cropped_image.tif].
```

Модуль реализован в виде 5 файлов:

`start_process.py` – реализация логики модуля (последовательное выполнение шагов 1–9) и его запуск.

`archive_extract.py` – выполнение шага 1.

`atmospheric_corection.py` – выполнение шага 2

`removeCloudyPixels.py` – выполнение шага 3.

`GDALCalcNDVI.py` – выполнение шагов 4, 5, 6.

`segmentation.py` – выполнение шага 7.

`geom_convexhull.py` – выполнение шага 8.

Результатом работы модуля является сегментированное по спектральным признакам изображение объекта или группы объектов «ЗСХН» (рисунок 3.8).

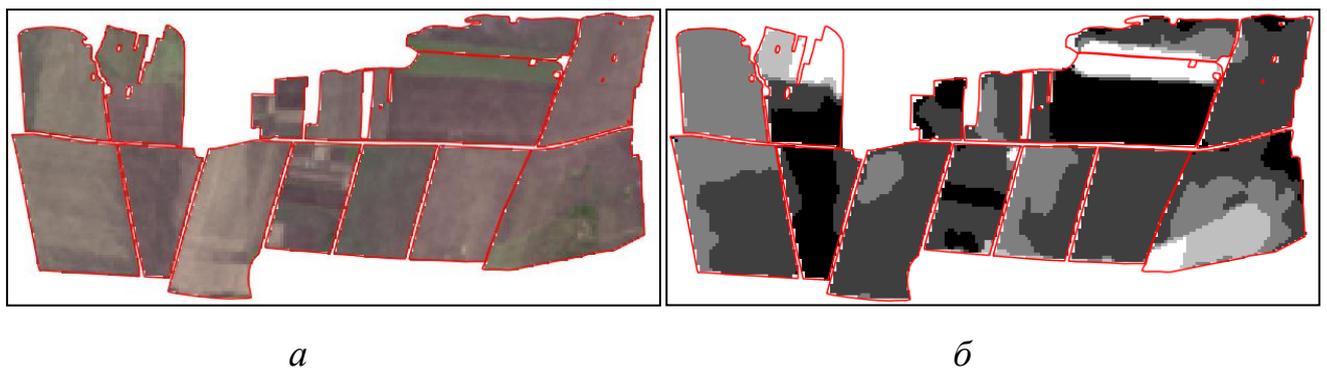


Рисунок 3.8 – Пример работы модуля обработки данных Landsat-8: *a* – исходное мультиспектральное изображение; *б* – сегментированное изображение

Модуль создания карт неоднородностей является программной реализацией шага 9 алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта, отвечающего за векторизацию сегментированного изображения. Модуль разработан на языке Python 2.7 с использованием

библиотеки GDAL/OGR.

Результатом работы модуля является векторизованное изображение, представляющее карту неоднородностей, опубликованное в виде векторного слоя в интерфейсе КП (рисунок 3.9).

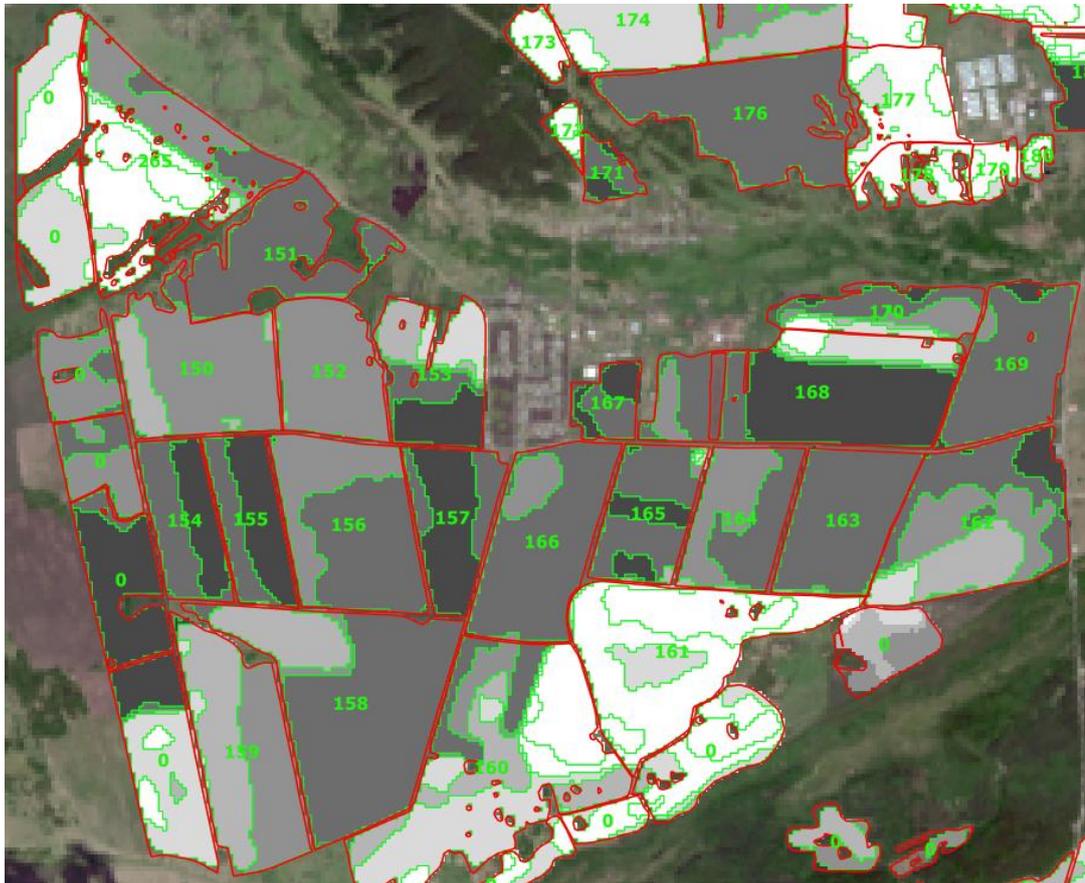


Рисунок 3.9 – Карта неоднородностей

Реализацией следующего шага алгоритма является *модуль расчета метрических признаков* для каждой неоднородности. Для неоднородностей рассчитывается площадь по формуле (1.4), периметр по формуле (1.5), толщина по формуле (1.6). Результаты расчетов заносятся в модель данных объекта «ЗСХН». Модуль также разработан на языке Python 2.7 с использованием библиотеки GDAL/OGR. Результатом работы модуля являются рассчитанные метрические признаки, опубликованные в виде атрибутов контура неоднородности в интерфейсе КП (рисунок 3.10).

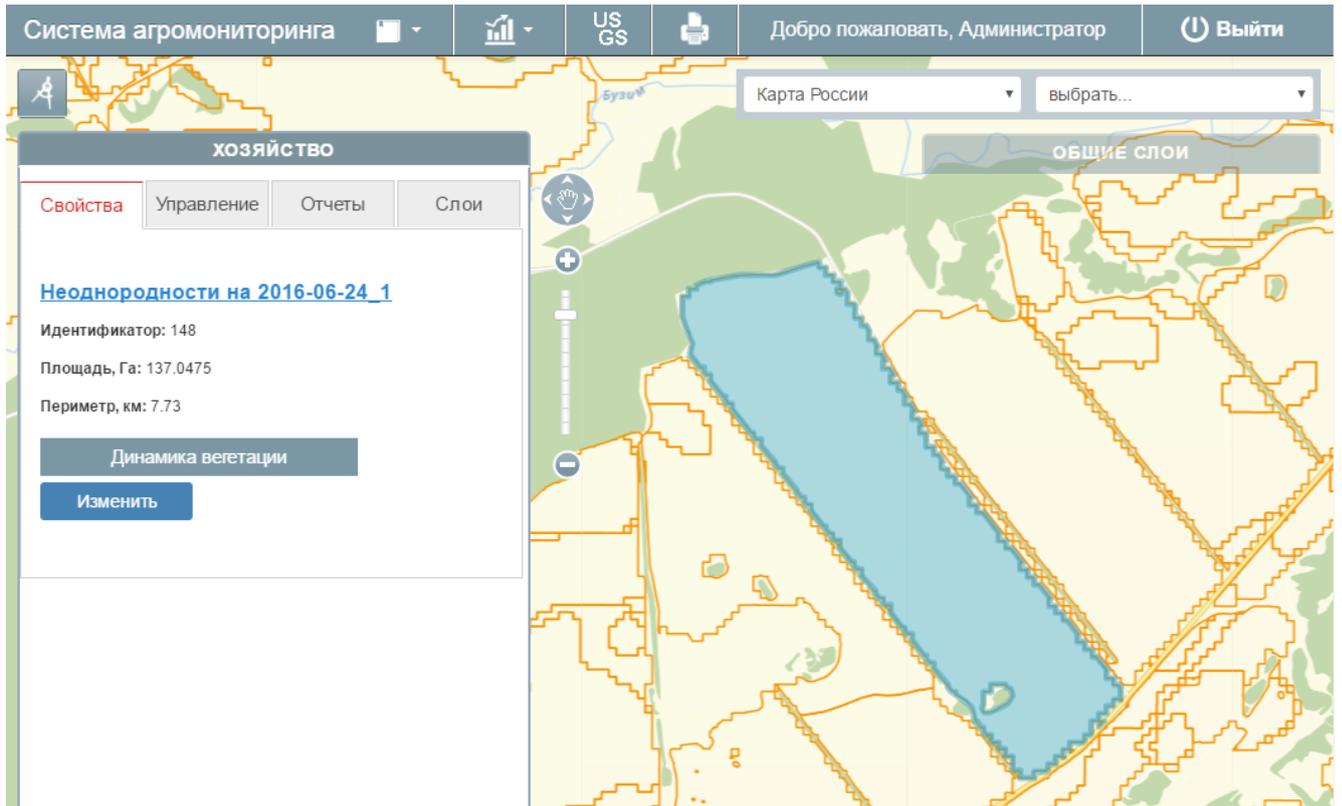


Рисунок 3.10 – Интерфейс отображения рассчитанных метрических признаков неоднородности

3.1.4 Разработка web-интерфейса системы

Web-интерфейс системы Агромониторинга включен в подсистему визуализации и навигации по ГПД и охватывает процессы, ориентированные на КП и администратора. Интерфейс является реализацией структуры диалога постановки задач дистанционного мониторинга пространственных объектов с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой в рамках модели информационного процесса постановки задач мониторинга, предназначенной для использования КП. С точки зрения КП интерфейс предназначен для следующих процессов:

- Авторизация.
- Диалог задания начальных признаков модели объекта включает:
 - Выбор и закрепление объекта за с/х предприятием путем выделения объекта на карте ЗСХН и выбора функции закрепления (рисунок 3.11). Результатом данного шага является задание идентификатора и координат

выбранного объекта в модели (1.8) и визуализация на карте закрепленных объектов (рисунок 3.12).

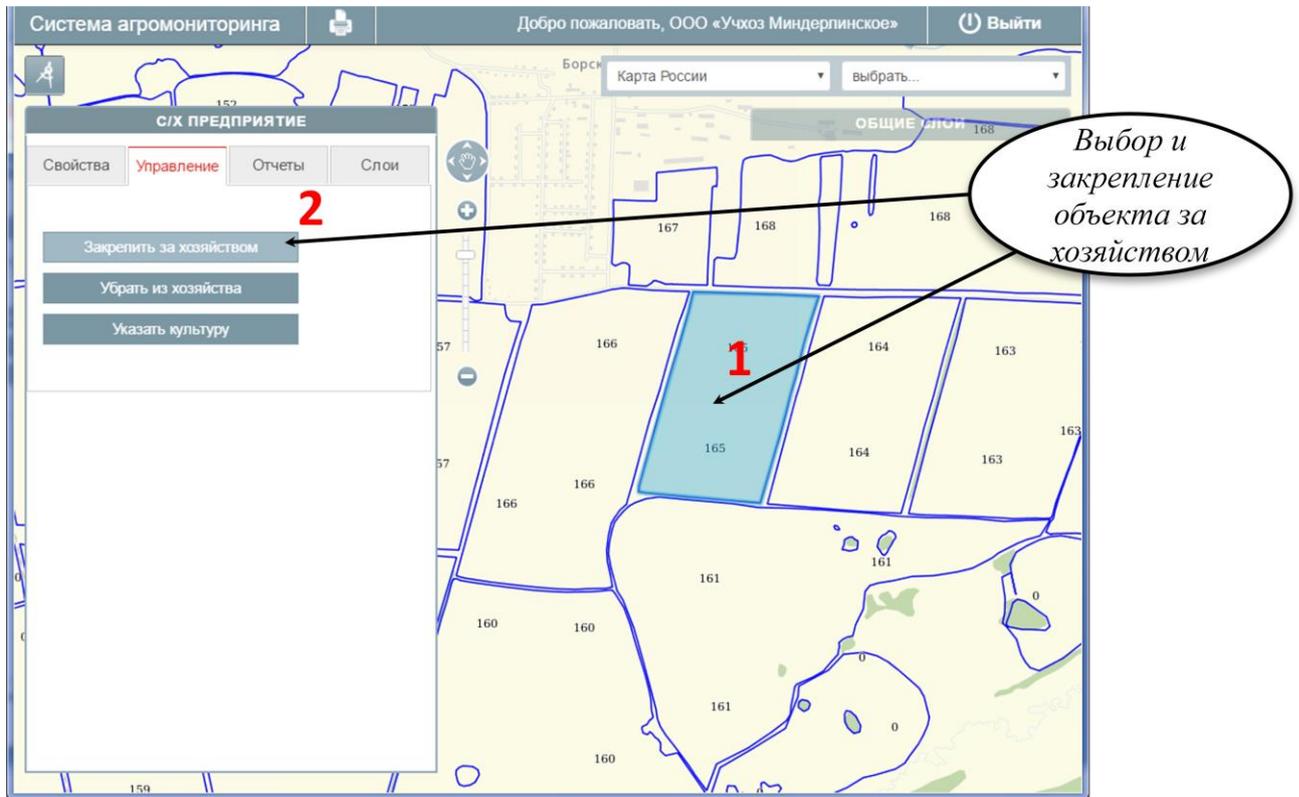


Рисунок 3.11 – Задание координат объекта

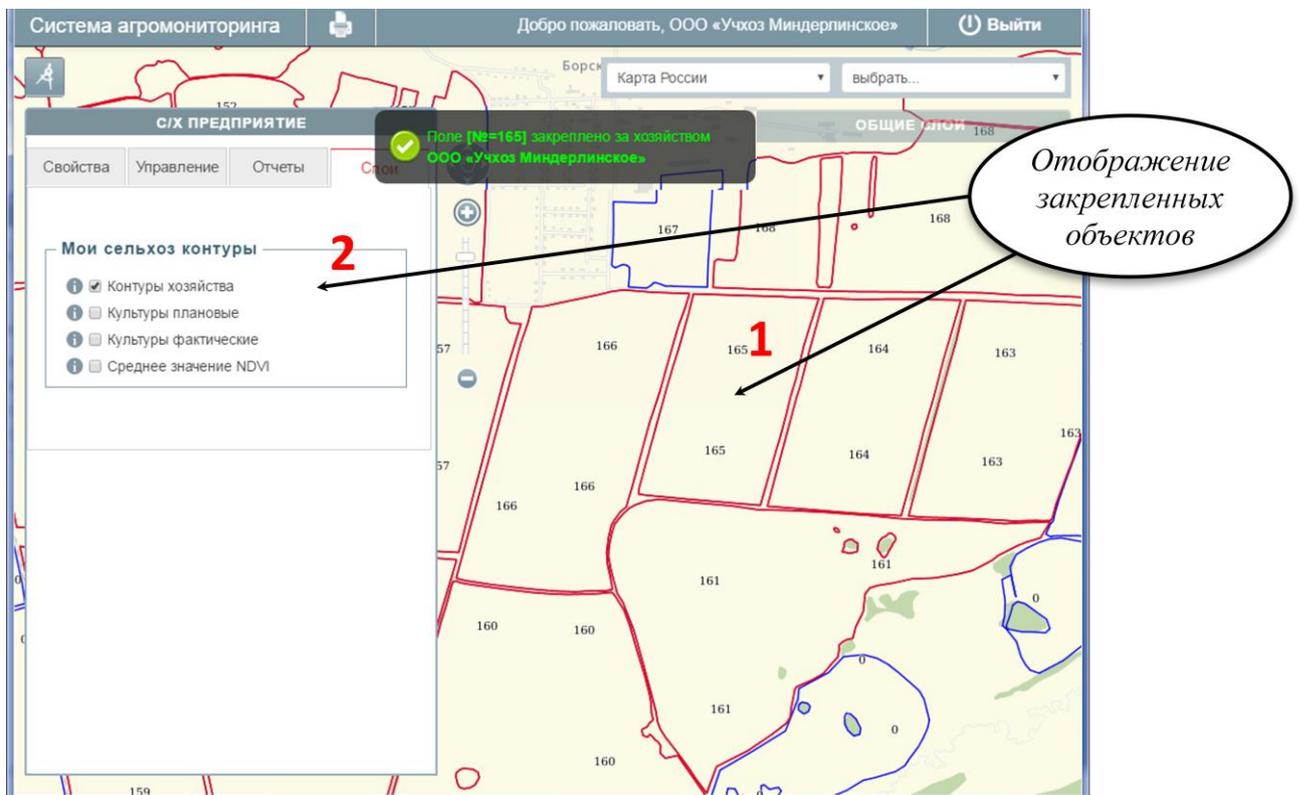


Рисунок 3.12 – Отображение закрепленных объектов

○ Задание закрепленному объекту сельскохозяйственной культуры (рисунок 3.13), в результате чего отображается карта объектов с заданными с/х культурами (рисунок 3.14), раскрашенными в цвета легенды.

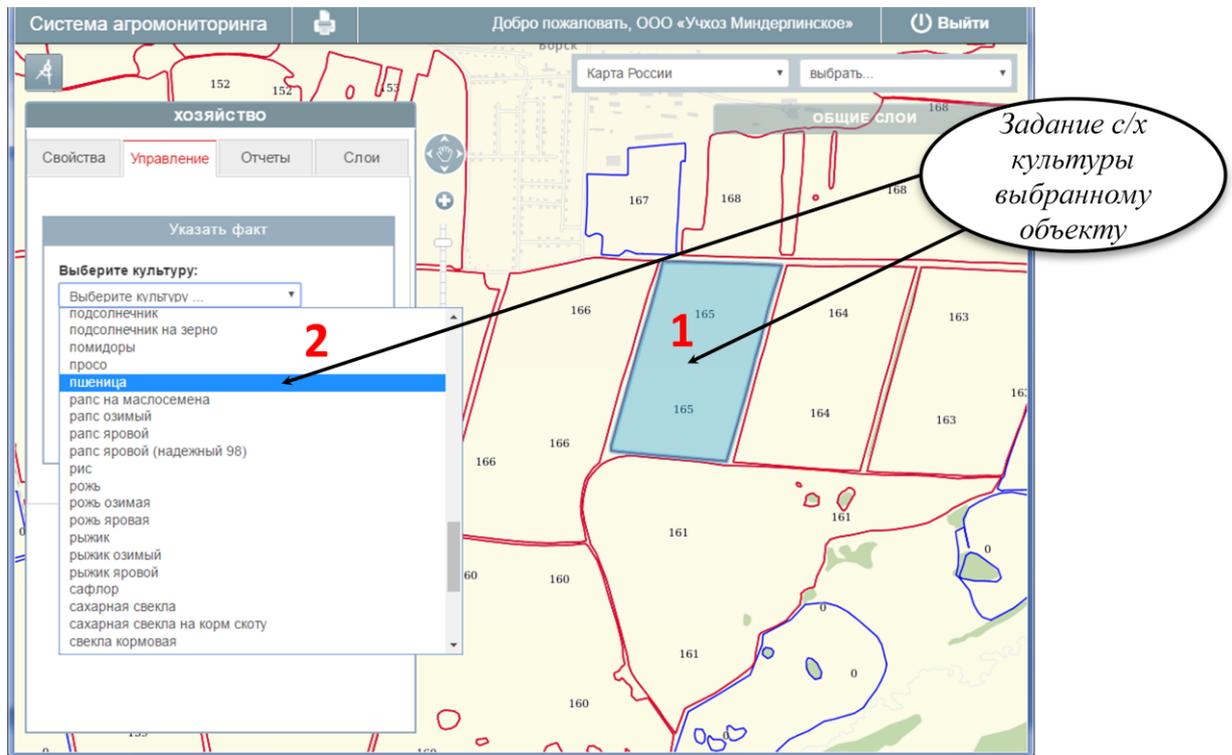


Рисунок 3.13 – Задание с/х культуры выбранному объекту

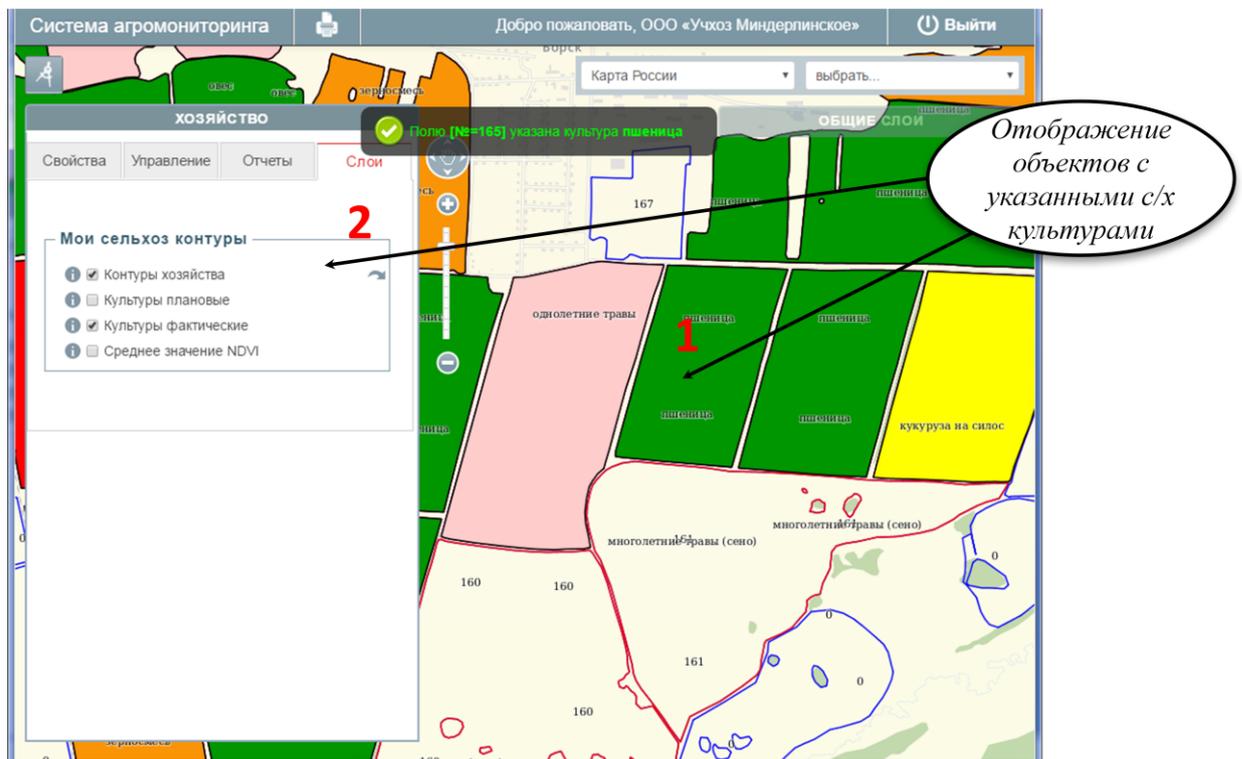


Рисунок 3.14 – Отображение объектов с указанными с/х культурами

- Диалог задания параметров мониторинга (рисунок 3.15) включает выбор объекта и задание ограничений измеряемых признаков размера и формы на соответствующих шкалах.

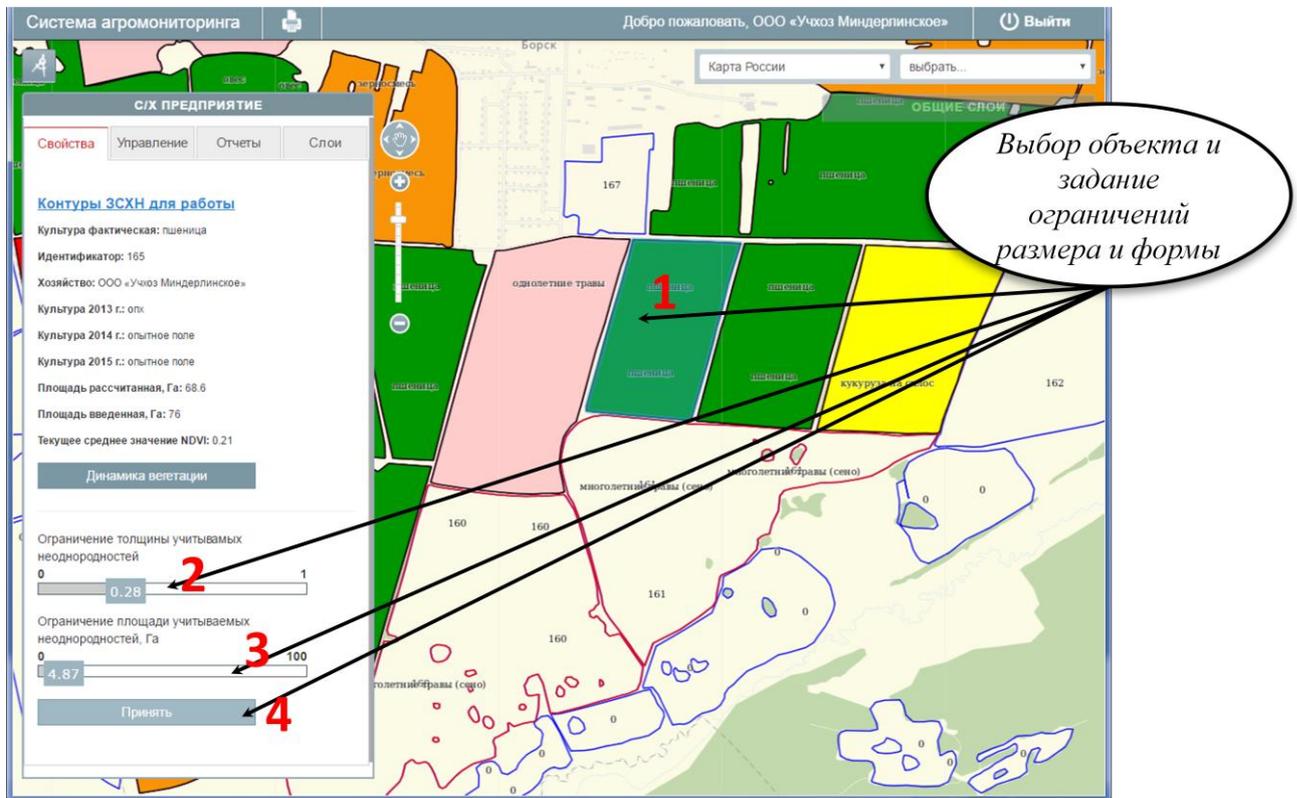


Рисунок 3.15 – Диалог задания параметров мониторинга

- Диалог оценки результатов постановки задачи мониторинга, который включает визуализацию растровых и векторных слоев.
- Формирование «карточки хозяйства», под которой понимается интерфейс управления площади границами хозяйства, составом полей, ведения план-фактного учета сельскохозяйственных культур, формирования отчетности.
- Формирование «карточки поля», под которой понимается интерфейс управления параметры модели объекта «ЗСХН» (1.8).
- Просмотр динамики вегетации в рамках контура объекта «ЗСХН».
- Печать отчетов и фрагментов карт.

В интерфейсе реализованы следующие административные функции (рисунок 3.16):

- Управление классификаторами сельхозпроизводителей, сельхозкультур, химсостава почв, форм собственности, агротехнических мероприятий, фенологических фаз, объектов «ЗСХН». Реализовано в модуле управления информационно-справочными данными о ЗСХН в составе подсистемы администрирования.
- Ведение статистики использования сервиса.
- Публикация растровых и векторных слоев.

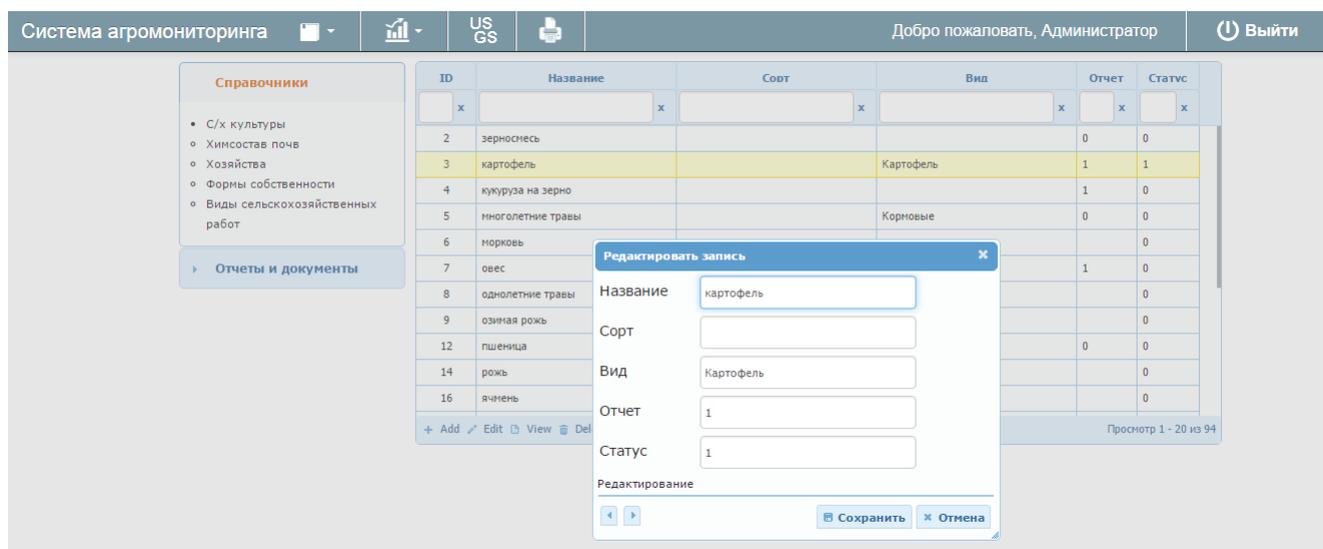


Рисунок 3.16 – Интерфейс администратора

Интерфейс включает серверную и клиентскую части. Разработка серверной части основана на применении web-сервера Apache 2.2 и nginx [75]. С одной стороны, одна из самых важных задач системы – это раздача статического контента вроде изображений большого размера или статических HTML-страниц, расположенных в разных директориях сервера. С другой – обеспечение хорошей производительности и более быстрой работы под высокими нагрузками, что очень актуально для web-ГИС, работающих с большими объемами информации и являющихся порталами с высокой посещаемостью. Задача скорости визуализации статического контента большого размера решается на базе HTTP-сервера engine x (nginx), а задача производительности и скорости работы в условиях больших нагрузок решается использованием Apache 2.2.

Использование Apache целесообразно для работы с динамическими данными. Apache позволяет подключать внешние модули для предоставления данных, использовать СУБД PostgreSQL.

Суть использования двух web-серверов для одной системы состоит в следующем. На переднем плане стоит nginx, который получает запросы клиентской части системы. Если возникает запрос на статическое содержимое, то nginx быстро возвращает эти данные. Если требуется обработать какой-либо PHP или AJAX запрос, то nginx отдает его на выполнение Apache. После обработки запроса сервером Apache результат возвращается на сервер nginx, который быстро отдает результат клиенту.

Серверная часть интерфейса реализована с применением языка PHP 5.3 в рамках парадигмы MVC (Model View Controller). Клиентская часть интерфейса реализована с применением языка гипертекстовой разметки HTML; для создания динамических элементов интерфейса, исполняемых на стороне клиента, использовался язык JavaScript и библиотека JQuery, для стилистического оформления графических элементов интерфейса использовался формальный язык описания внешнего вида документа CSS.

Методы выборки слоев и отображение атрибутивных данных об объектах, управления и навигация по различным слоям ГПД осуществляется за счет подключения API ГИС-платформы ActiveMap, приобретенной в рамках исполнения НИР по созданию «Региональной автоматизированной системы космического мониторинга муниципальных районов Красноярского края» в 2014 г.

Методы, реализованные через API, позволяют управлять возможностями картографического сервера Geoserver, который реализует протокол WMS (Web Map Service). Протокол WMS:

- определяет параметры запроса и предоставления картографической (пространственной) информации в среде Интернет в виде графического изображения или набора объектов;
- описывает условия получения и предоставления информации о содержимом карты (например, свойства объекта в определенном месте на карте);

- характеризует условия получения и предоставления информации о возможностях сервера по представлению различных типов картографической информации.

На основе WMS протокола в клиентской части реализовано подключение различных векторных и растровых картографических подложек, которые включают: Карту России, OpenStreetMaps, Яндекс карты, Google карты, Росреестр, Космоснимки Роскосмос, Космоснимки Сканэкс.

На основе Geoserver выполняется публикация растровых и векторных слоев, настройка стилей оформления векторных слоев и управление картографическими проекциями.

Разрешение информационных запросов КП связано с удаленным запуском отдельных модулей, описанных выше, в определенной логической последовательности. Удаленный запуск модулей осуществляется через обращение к серверу Apache и запуск функции exec с набором команд.

3.2 Результаты тестирования

3.2.1 Экспериментальные исследования алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта

Для проведения экспериментальных исследований алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта в летний период 2015 г. был выбран тестовый полигон в рамках учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское» на территории Сухобузимского района Красноярского края (рисунок 3.17).

Территория Сухобузимского района расположена в центральной части Красноярского края. Протяжённость 140 км с запада на восток и почти 100 км с севера на юг. Общая площадь территории 561 260 га (5 613 км²). Лесостепной ландшафт западной части переходит в таежный массив на правой стороне реки Енисей. Район съёмки, в котором лежат сельскохозяйственные поля: между 92.5° в.д. и 94.7° в.д. и между 56.2° с.ш. и 56.9° с.ш.

Картосхема расположения опытных полей представлена на рисунке 3.14. На этом полигоне было выбрано 4 опытных поля:

- 1) с посевами овса (176);
- 2) с посевами ячменя (155);
- 3) с посевами пшеницы без удобрений (157);
- 4) с посевами пшеницы с удобрениями (166).

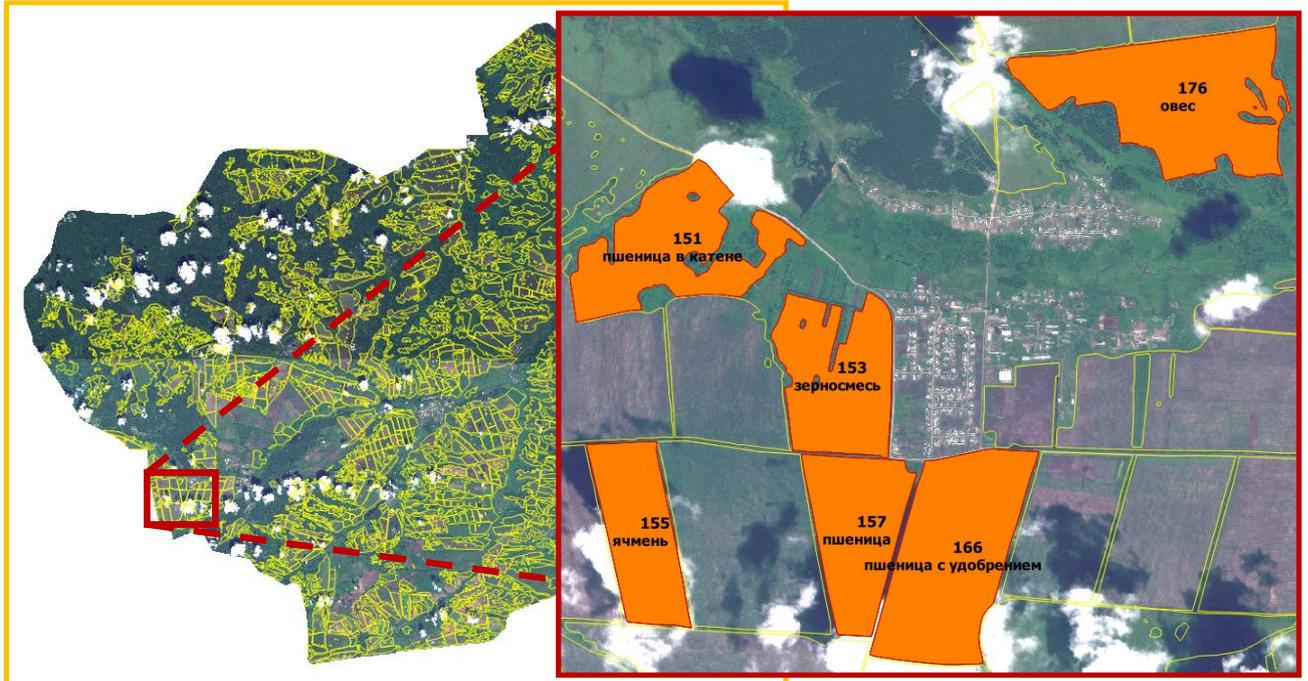


Рисунок 3.17 – Картосхема расположения опытных полей

Данные о культурах, площади полей и о дате сева представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные о выбранных опытных полях

№ поля	Культура	Площадь, га	Дата сева
155	Ячмень	61,9	26.05.15–27.05.15
157	Пшеница без удобрения	69,2	25.05.15–26.05.15
166	Пшеница с удобрением	116,8	23.05.15–24.05.15
176	Овес	129,6	18.05.15–19.05.15

Также в данный вегетационный период проводились выездные полевые исследования на опытные поля. Работы включали:

- Учет биомассы культур проводили методом укосов. Размер рамки 0,25 м², повторность 5-кратная, учетная площадь 1 га, находилась в центре каждого поля.
- Измерение веса сырой биомассы культур на весах с погрешностью 0,01 г.
- Измерение влажности почвы термовесовым методом с погрешностью 0,01 г.
- Измерение вегетационного индекса NDVI спектрометром.

Для исключения влияния атмосферных явлений (например, облачности, дымки) при измерении NDVI полей был использован спектрометр модели ФИ-20. Для расчета среднего значения NDVI на каждом поле было проведено от 20 до 30 измерений, которые фиксировались GPS-приемником (рисунок 3.18).

Для измерения координат точек съемки NDVI был использован GPS-приемник фирмы Trimble модели GeoExplorer® 2005 series, обеспечивающий точность геопозиционирования до 1 м.



Рисунок 3.18 – Координаты измерения NDVI в процессе полевых исследований

В таблице 3.2 приведены даты проведения спектросъемки.

Таблица 3.2 – Данные о датах проведения спектросъемки

	155	157	166	176
22.06.15	✓	✓	✓	✓
15.07.15	✓	✓	✓	✓
29.07.15	✓	✓	✓	✓
11.08.15		✓	✓	✓
21.08.15	✓	✓	✓	✓

Фазы роста и развития зерновых хлебов (пшеница, ячмень, овес) во время проведения спектросъемки и отбора почвенных и растительных проб основаны на [56]:

05.06.15 – всходы;

22.06.15 – кущение;

07.07.15 – выход в трубку - начало колошения (или выметывания у овса);

15.07.15 – колошение (или выметывание у овса) – начало цветения;

25.07.15 – цветение – молочная спелость;

11.08.15 – восковая спелость;

21.08.15 – твердая спелость (начало уборочной).

3.2.2 Корреляционный анализ значений NDVI, полученных со спектрометра и в результате обработки спутниковых изображений

Для сравнительного анализа использовались средние значения NDVI, рассчитанные в разрезе тестовых полей из следующих источников:

1. По данным со спектрометра (от 29.07.2015).
2. По данным интернет-ресурса vega (за 30 и 31 неделю).
3. По данным снимка Landsat-8 (от 26.07.2015).
4. По данным снимка Terra (MODIS) (mod09gq от 26.07.2015).

Данные со спектрометра (от 29.07.2015)

Для определения среднего значения NDVI в разрезе поля по данным со спектрометра была взята сумма всех зафиксированных значений NDVI по данному полю, делённая на их количество (формула нахождения среднего арифметического значения). Результат представлен в таблице 3.3. Датам в таблице соответствуют порядковые номера недель в году (для соответствия интернет-ресурсу Vega-PRO, где результаты расчета NDVI представлены не на определенную дату, а на определенную неделю в году).

Таблица 3.3 – Данные о датах проведения спектросъемки и средние значения NDVI по полям в эти дни

№ поля	Источник NDVI	22.06.2015 (26 нед.)	15.07.2015 (29 нед.)	29.07.2015 (31 нед.)	11.08.2015 (33 нед.)	21.08.2015 (34 нед.)
155	Спектрометр	0,63	0,63	0,53	–	0,35
157	Спектрометр	0,65	0,75	0,67	0,40	0,31
166	Спектрометр	0,67	0,75	0,67	0,40	0,33
176	Спектрометр	0,65	0,75	0,69	0,49	0,45

Данные интернет-ресурса Vega (за 30 и 31 неделю)

На рисунках 3.19–3.22 представлены графики значений NDVI с интернет-ресурса Vega-PRO. Информационной основой интернет-ресурса Vega-PRO в настоящее время являются общедоступные данные спутниковых систем дистанционного зондирования Terra/Aqua (MODIS) и Landsat (TM/ETM+/OLI). Были использованы данные Terra (MODIS). Эти спутниковые данные прошли глубокую предварительную обработку (привязка, атмосферная коррекция, фильтрация облачности, формирование композитных изображений и пр.). Значения NDVI рассчитаны в разрезе контуров полей № 155 (ячмень), № 157 (пшеница без удобрений), № 166 (пшеница с удобрениями), № 176 (овес). Помимо выбранных полей были взяты 2 дополнительных поля, неоднородных по составу (на них произрастает несколько видов культур). Датам полевых работ соответствуют определенные недели в году, что видно из графиков.

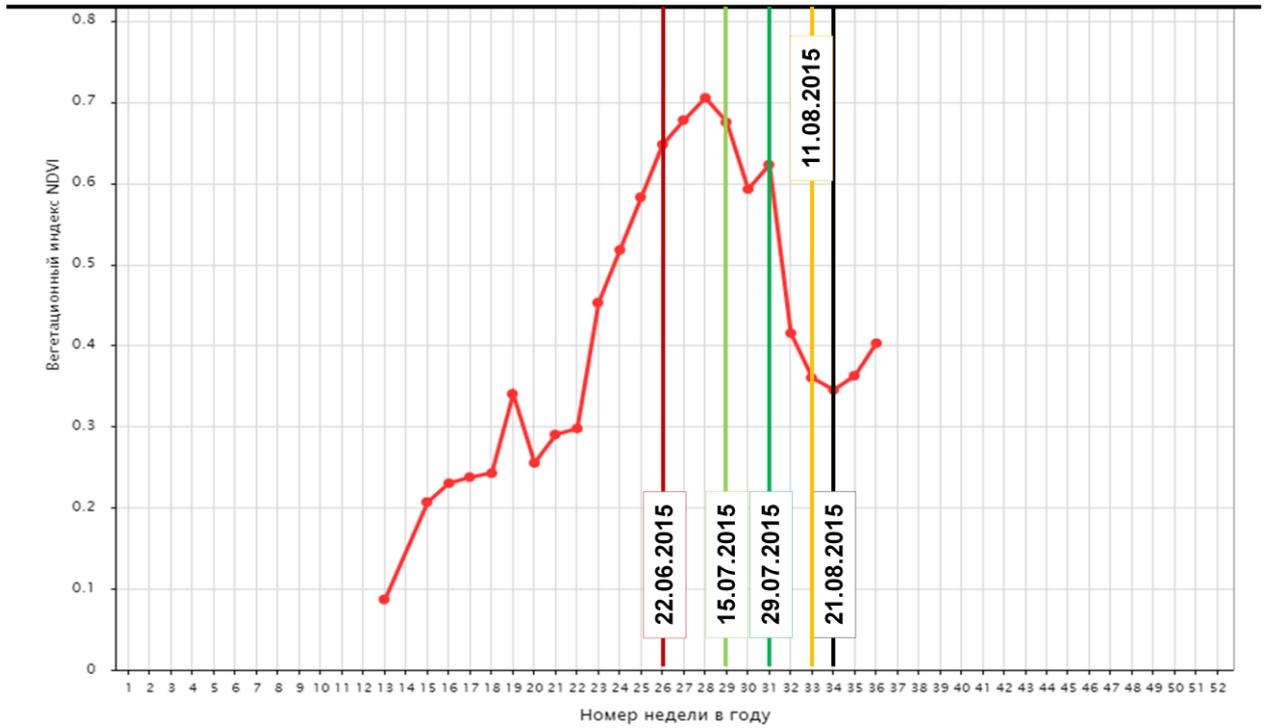


Рисунок 3.19 – Значения NDVI с ресурса Vega, рассчитанные по снимку Modis, для поля № 155 (ячмень)

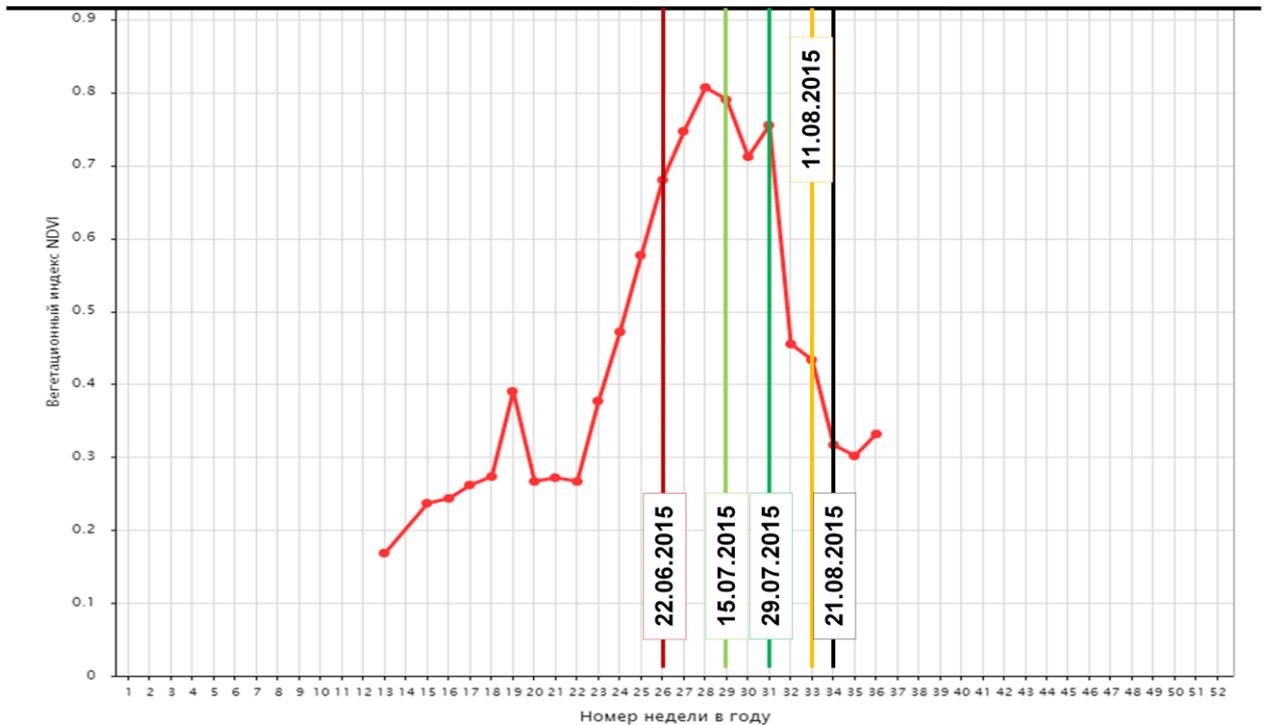


Рисунок 3.20 – Значения NDVI с ресурса Vega, рассчитанные по снимку Modis, для поля № 157 (пшеница без удобрений)

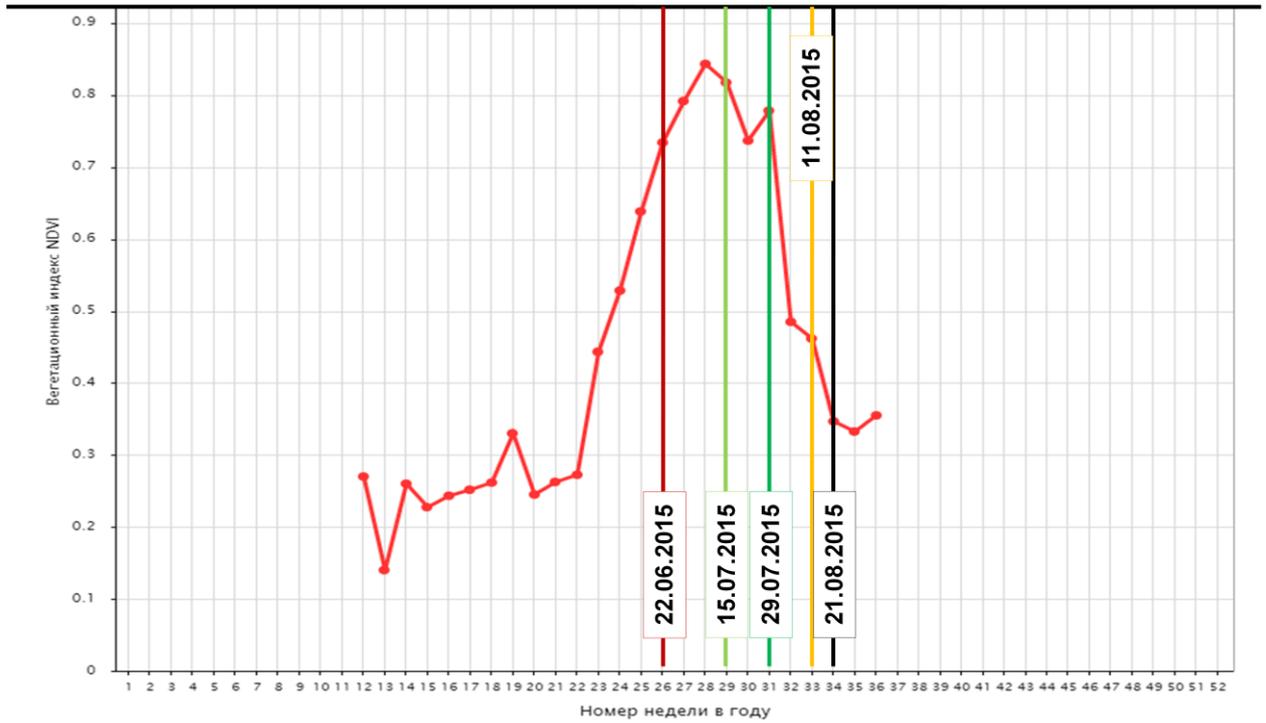


Рисунок 3.21 – Значения NDVI с ресурса Vega, рассчитанные по снимку Modis, для поля № 166 (пшеница с удобрениями)

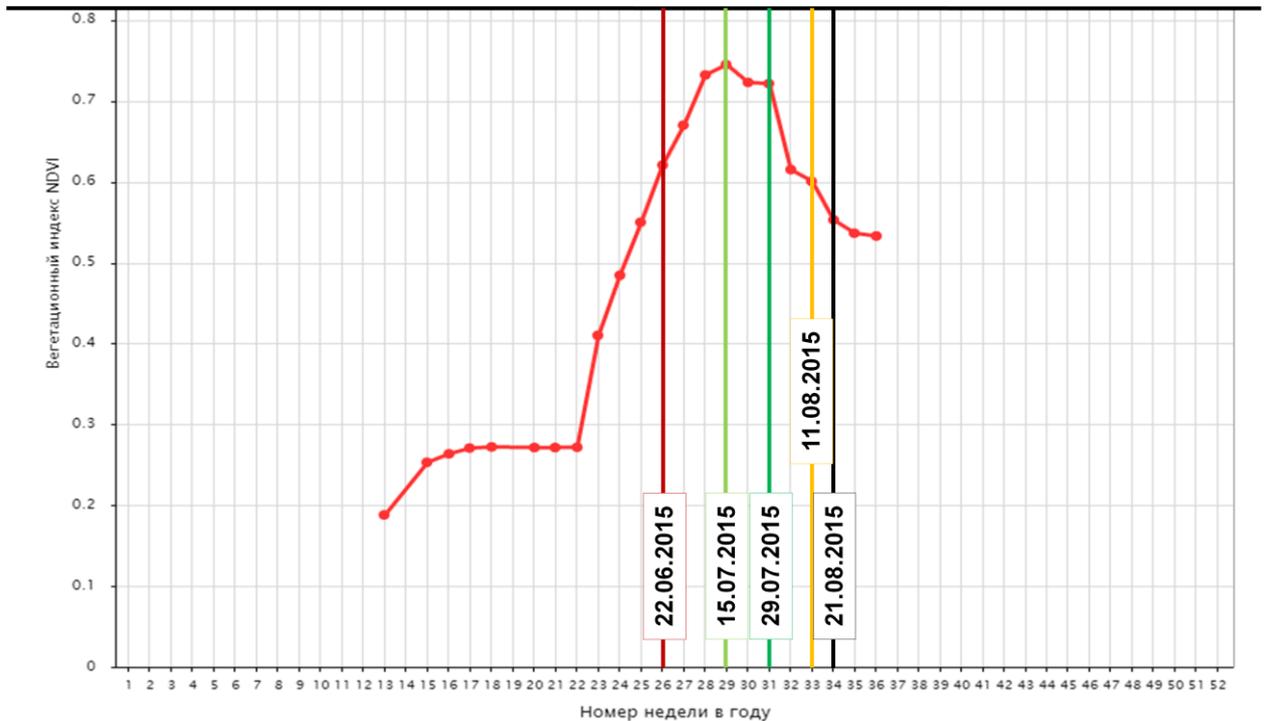


Рисунок 3.22 – Значения NDVI с ресурса Vega, рассчитанные по снимку Terra (MODIS) для поля № 176 (овес)

В таблице 3.4 представлены средние значения NDVI в разрезе полей с интернет-ресурса Vega.

Таблица 3.4 – Данные с интернет-ресурса Vega. Значения NDVI в разрезе полей

№ поля	Источник NDVI	05.06.2015 (23 нед.)	22.06.2015 (26 нед.)	07.07.2015 (28 нед.)	15.07.2015 (29 нед.)	25.07.2015 (31 нед.)	11.08.2015 (33 нед.)	21.08.2015 (34 нед.)
155	Vega	0,45	0,65	0,71	0,68	0,62	0,36	0,38
157	Vega	0,38	0,68	0,81	0,79	0,76	0,43	0,35
166	Vega	0,44	0,73	0,84	0,82	0,78	0,46	0,38
176	Vega	0,41	0,62	0,73	0,75	0,72	0,60	0,57

Данные снимка Landsat-8 (от 26.07.2015)

На выбранные тестовые поля были подобраны спутниковые изображения среднего разрешения Landsat-8 (30 м). Периодичность получения данных Landsat-8 на данную территорию составляет 16 дней. Всего со спутника за лето 2015 г. было принято 6 снимков. Ввиду того, что съемка проводится при любых погодных условиях, сцен с облачностью до 10 % за период с 01.06.2015 по 31.08.2015 получено только 2 – это снимки от 08.06.2015 и 26.07.2015. Для данных расчетов NDVI со снимка от 08.06.2015 отсутствует объект сравнения, так как дата первых проведенных полевых работ – 23.06.2015. Дата съемки второго снимка (26.07.2015) расходится с датой следующей итерации полевых исследований (29.07.2015) лишь на 3 дня. Погодные условия в период с 26.07.15 по 29.07.15 оценивались как стабильно нормальные: дневная температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли колебалась от 23,9 °С до 28,9 °С, минимальная ночная температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли колебалась от 11,9 °С до 17,5 °С, облачность преимущественно 70–80 %, скорость ветра на высоте 10–12 м над земной поверхностью не превышала 4 м/с, атмосферное давление на уровне станции колебалось в пределах от 734,2 до 753,8 мм рт. ст., 26.07.15 и 28.07.15 без осадков, 27.07.15 осадков выпало 2 мм, 29.07.15 осадков выпало 17 мм.

Расчет попиксельного и среднего значений NDVI в разрезе опытных полей по снимку Landsat-8 от 26.07.2015 производился с помощью модуля обработки данных КА Landsat-8 и раскрашен в псевдоцвета в программе QGIS. Иллюстрация расчетов представлена на рисунках 3.23, 3.24.

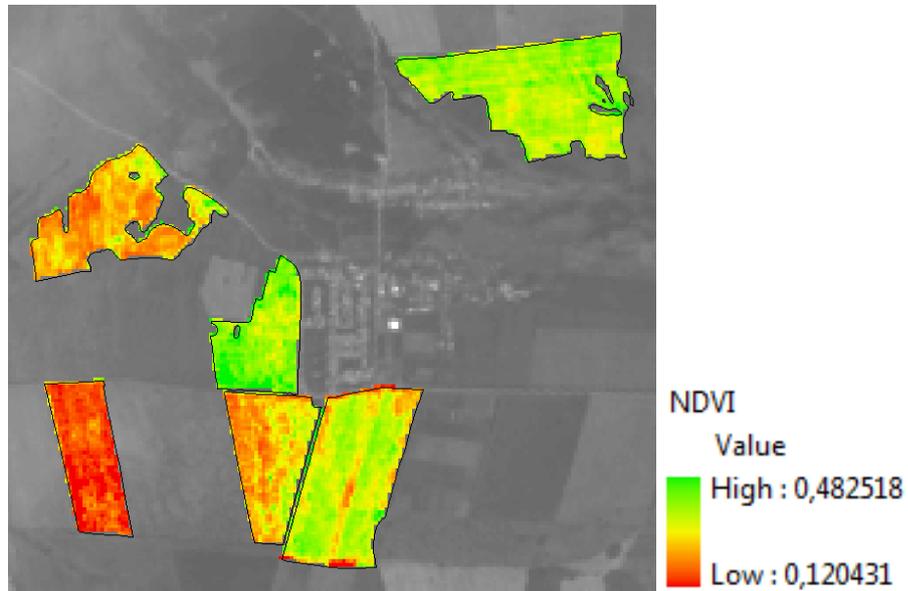


Рисунок 3.23 – Расчет попиксельных значений NDVI, рассчитанных в разрезе опытных полей, по данным снимка Landsat-8 от 26.07.2015

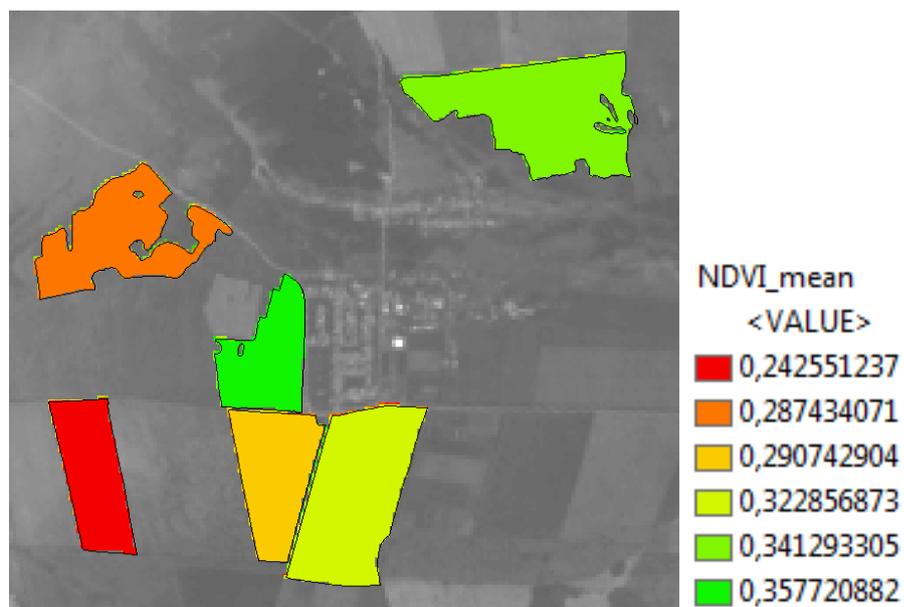


Рисунок 3.24 – Расчет средних значений NDVI, рассчитанных в разрезе опытных полей, по данным снимка Landsat-8 от 26.07.2015

Расчет попиксельного и среднего значений NDVI в разрезе опытных полей по снимку Terra (MODIS) от 26.07.2015 производился в программе ArcMap 9.3. Иллюстрация расчетов представлена на рисунках 3.25, 3.26.

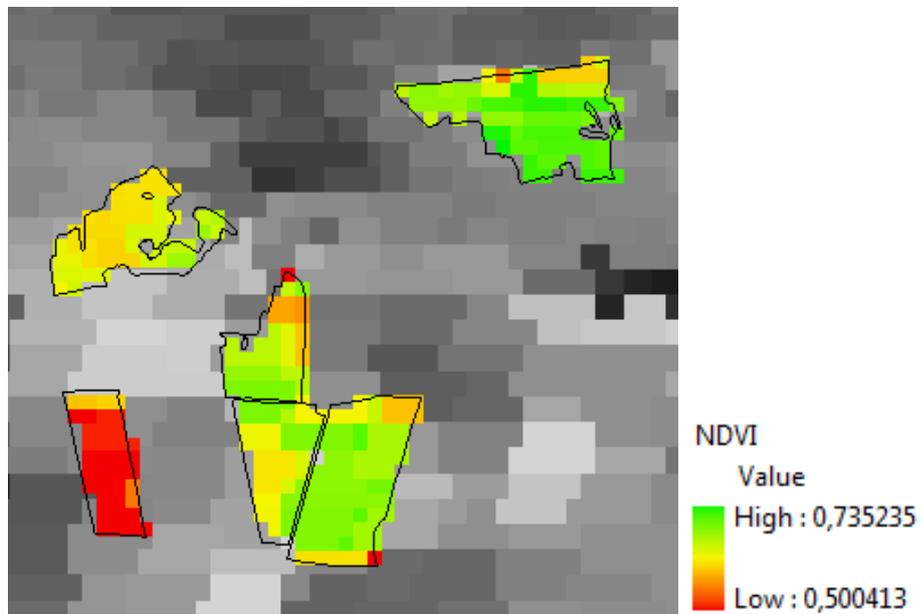


Рисунок 3.25 – Расчет попиксельных значений NDVI, рассчитанных в разрезе опытных полей, по данным снимка Terra (MODIS) от 26.07.2015

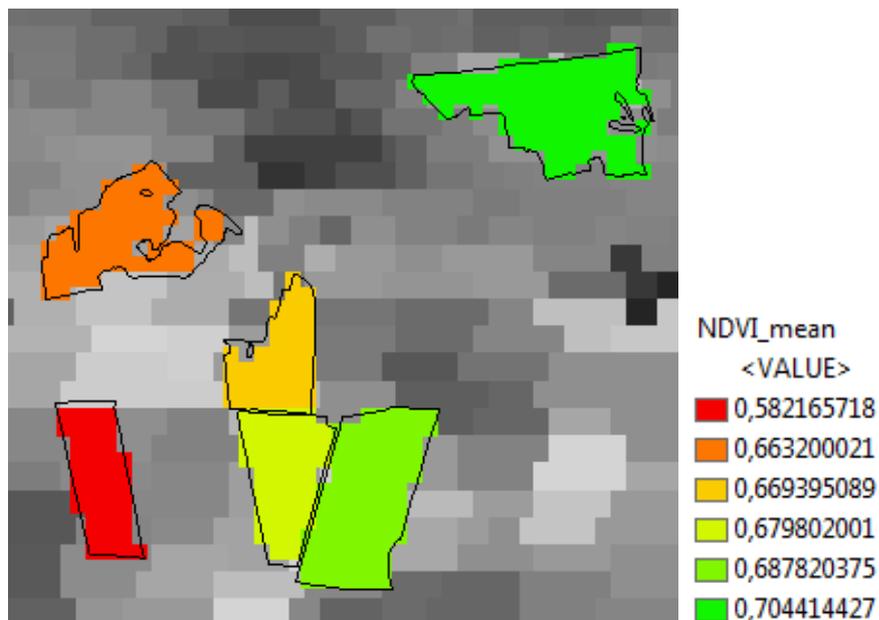


Рисунок 3.26 – Расчет средних значений NDVI, рассчитанных в разрезе опытных полей, по данным снимка Terra (MODIS) от 26.07.2015

Далее в таблице 3.5 приведено сравнение средних значений NDVI, рассчитанных в разрезе тестовых полей, по данным со спектрометра от 29.07.15, по данным интернет-ресурса Vega (за 30 и 31 неделю от начала года), по данным снимка Landsat-8 от 26.07.2015, по данным снимка Terra (MODIS) от 26.07.2015 (продукт MOD09GQ поставляется с предварительно выполненной атмосферной коррекцией).

Таблица 3.5 – Сравнение средних значений NDVI

№ поля	Культура	Средн. NDVI спектрометр 29.07.15	Средн. NDVI Landsat 26.07.15	Средн. NDVI Modis 26.07.15	Средн. NDVI Vega Modis (30 неделя)	Средн. NDVI Vega Modis (31 неделя)
155	Ячмень	0,527	0,243	0,580	0,590	0,620
157	Пшеница без удобрения	0,666	0,291	0,675	0,710	0,755
166	Пшеница с удобрением	0,641	0,323	0,691	0,740	0,780
176	Овес	0,692	0,341	0,708	0,720	0,720

На рисунке 3.27 приведен график средних значений NDVI на основе результатов расчетов из таблицы 3.5.

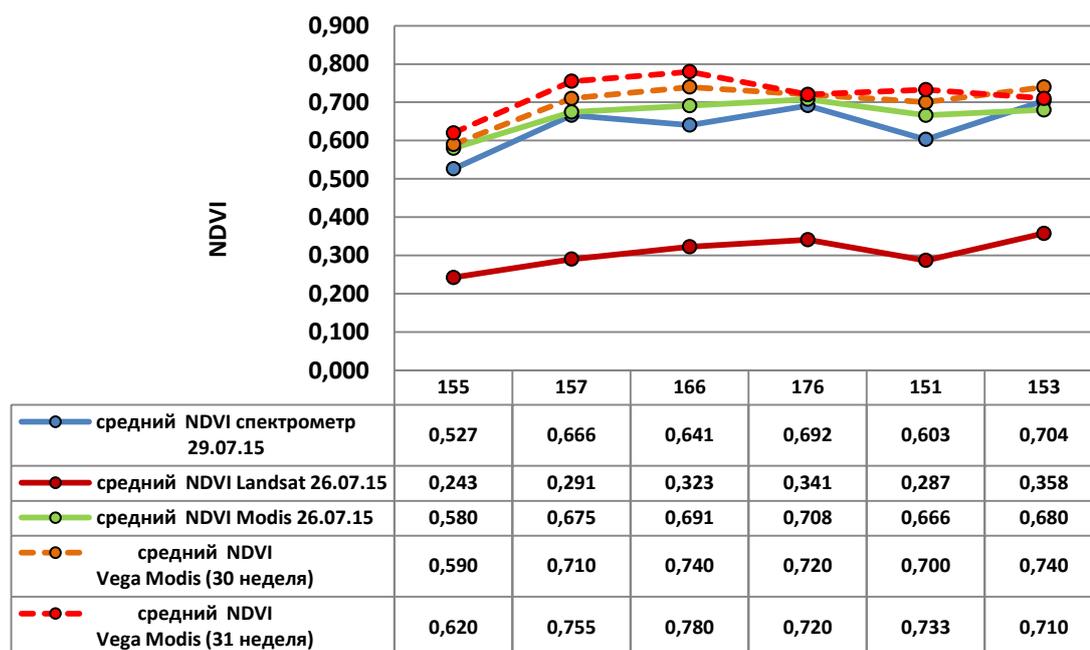


Рисунок 3.27 – График, построенный на основе данных таблицы 3.5

При сравнении значений NDVI со спектрометра и вычисленного по снимку Landsat-8 видна закономерность: значения NDVI по данным спектрометра в среднем в 2 раза выше, чем значения NDVI по снимку Landsat-8. Это можно объяснить тем, что снимок Landsat-8 не был подвергнут атмосферной коррекции, и в силу влияния атмосферы значения NDVI оказались пропорционально меньшими, чем на спектрометре.

Данные, представленные интернет-ресурсом Vega, подвергаются глубокой предварительной обработке (привязка, атмосферная коррекция, фильтрация облачности, формирование композитных изображений и пр.). NDVI рассчитывается по композитным снимкам за 8 дней. Так как индекс NDVI достаточно сильно изменчив, наблюдается некоторый разброс в данных с интернет-ресурса Vega и со спектрометра.

Данные, полученные со спектрометра и со снимка Terra (MODIS), показывают хорошую сходимость. Продукт Terra (MODIS) MOD09GQ, снимок которого использовался для вычисления NDVI, идет с предварительно выполненной атмосферной коррекцией.

Рассчитаем корреляционную зависимость между данными со спектрометра и спутниковыми изображениями для 4 тестовых полей по формуле 3.1. Данные расчетов приведены в таблице 3.6.

Корреляционная зависимость рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} * \bar{y}}{\sigma(x) * \sigma(y)}, \quad (3.1)$$

где $\sigma(x)$ и $\sigma(y)$ – среднеквадратическое отклонение, рассчитывается по формуле:

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}; \quad (3.2)$$

$D(x)$ – дисперсия, рассчитывается по формуле:

$$D(x) = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2, \quad (3.3)$$

где n – число измерений.

Таблица 3.6 – Расчет коэффициентов корреляции

	NDVI Landsat-8 (26.07.15)	NDVI Modis (26.07.15)	NDVI Vega Modis (30 неделя)	NDVI Vega Modis (31 неделя)
NDVI Спектрометр (4 поля)	0,89	0,97	0,91	0,80

Для интерпретации величин коэффициента корреляции применяется шкала Чеддока (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Интерпретация рассчитанного коэффициента корреляции

Значение коэффициента корреляции, r	Интерпретация
$0 < r \leq 0,2$	Очень слабая корреляция
$0,2 < r \leq 0,5$	Слабая корреляция
$0,5 < r \leq 0,7$	Средняя корреляция
$0,7 < r \leq 0,9$	Сильная корреляция
$0,9 < r \leq 1$	Очень сильная корреляция

Исходя из данных, представленных в таблице, можно сделать следующие заключения: наименьшие значения коэффициента корреляции наблюдаются у данных со спектрометра с данными интернет-ресурса Vega за 31 неделю, наибольшие – у данных со спектрометра и снимка Terra (MODIS) MOD09GQ и у данных со спектрометра и снимка Landsat-8.

В рамках выбранных тестовых полей в соответствии с основными этапами алгоритма, описанного в § 2.3, была произведена обработка изображения Landsat-8 от 26.07.2015 г. На рисунке 3.28 представлены результаты автоматического расчета индекса NDVI по заданным контурам объектов. Средние значения индекса для тестовых полей (155, 157, 166, 176) приведены в таблице 3.5. Помимо тестовых полей для эксперимента выделения неоднородностей были выбраны поля 158, 168. Следующим шагом обработки данных является сегментация на основе

разметки точек области пороговым методом для каждого контура (рисунок 3.29). Результат удаления сегментов со значением площади менее заданного приведен на рисунке 3.30. Каждый сегмент в рамках контура объекта должен быть интерпретирован в соответствии с условиями (2.6). На рисунке 3.31 приведены примеры интерпретации сегментов, которые для наглядности раскрашены в псевдоцвета. Как видно на рисунке 3.31, поля 158, 168 неоднородны, поскольку были высажены различные культуры и оказывались различные воздействия. Для таких полей создается карта неоднородностей (рисунок 3.32). Для каждого контура неоднородности рассчитываются метрические признаки: площадь, периметр и толщина; спектральные признаки: среднее значение NDVI, а также среднеквадратическое отклонение.

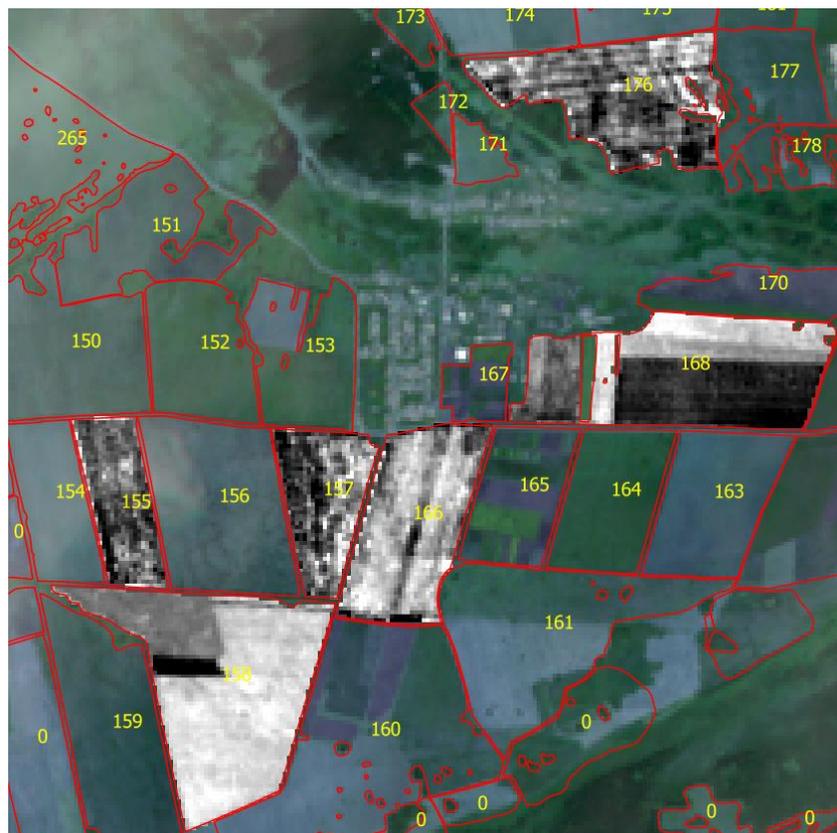


Рисунок 3.28 – Результаты автоматического расчета индекса NDVI

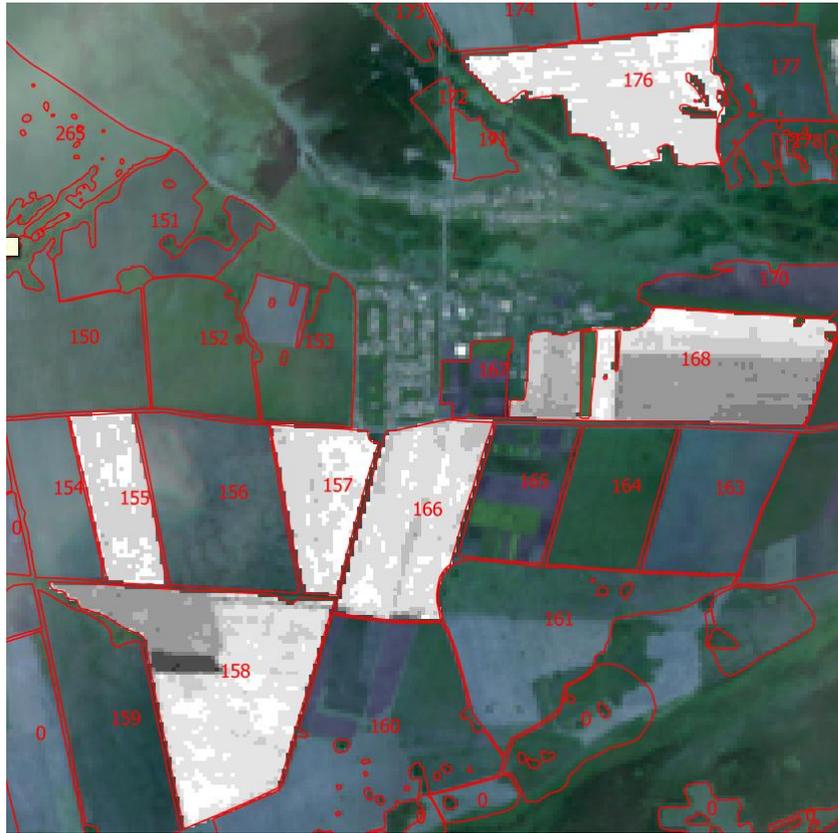


Рисунок 3.29 – Результаты сегментации



Рисунок 3.30 – Результаты постсегментации



Рисунок 3.31 – Интерпретация пространственных неоднородностей



Рисунок 3.32 – Результаты векторизации (пространственной локализации) полученных сегментов. Карта неоднородностей для каждого контура объекта

После обработки более 100 объектов на территории Сухобузимского района с применением описанного алгоритма были получены следующие результаты сегментации:

1. По данным Landsat-8 от 10.06.2016 г. среднего пространственного разрешения 30 м:

- общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 8 \%$;
- ошибка пропусков $\varepsilon_j = 7 \%$;
- ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 5 \%$.

2. По данным Sentinel-2A от 05.06.2016 г. среднего пространственного разрешения 10 м:

- общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 6 \%$;
- ошибка пропусков $\varepsilon_j = 4 \%$;
- ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 4 \%$.

3. По данным Spot-6 от 04.07.2013 г. высокого пространственного разрешения 6 м:

- общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 6 \%$;
- ошибка пропусков $\varepsilon_j = 4 \%$;
- ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 3 \%$.

4. По данным WorldView-2 от 25.06.2014 г. сверхвысокого пространственного разрешения 0,5 м:

- общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 5 \%$;
- ошибка пропусков $\varepsilon_j = 4 \%$;
- ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 3 \%$.

После проведения ряда экспериментальных исследований с применением снимков различного разрешения стоит отметить, что структура объектов в среднем детектируется с точностью до 92 %.

Работа алгоритма апробирована на данных, включающих более 100 полей на территории Сухобузимского района по данным среднего разрешения Landsat-8 от 24.06.2016 г. и Sentinel-2A от 05.06.2016 г. Также алгоритм апробирован на

данных высокого и сверхвысокого разрешения: Spot-6 от 04.07.2013 г. – обработано 100 объектов; WorldView-2 от 25.06.2014 г. – обработано 70 объектов. Результаты работы алгоритма представлены в виде карт неоднородностей в рамках контуров заданных объектов «ЗСХН».

На рисунке 3.33 показаны результаты сегментации по данным среднего разрешения (30 м) Landsat-8. На рисунке 3.33, *а* приведены результаты без пользовательских ограничений размера и формы, на рисунке 3.33, *б* заданы ограничения на размер, при которых области менее заданного уровня объединяются с соседними областями большей площади.

При заданной толщине выбираются те области, которые являются наиболее вытянутыми и неправильной формы. Такие области приводятся к выпуклой форме (это желтые контуры). Такие преобразования на практике способствуют оптимизации траектории движения с/х техники с оборудованием для точечной обработки посева.



Рисунок 3.33 – Результаты сегментации по данным Landsat-8 от 15.06.2016 г.:

а - без ограничений на NS и T ; *б* - $NS \leq 0.1\text{Га}$, $T \leq 0.2$

На рисунке 3.34 показаны результаты сегментации по данным уже более высокого разрешения (10 м) Sentinel-2A.

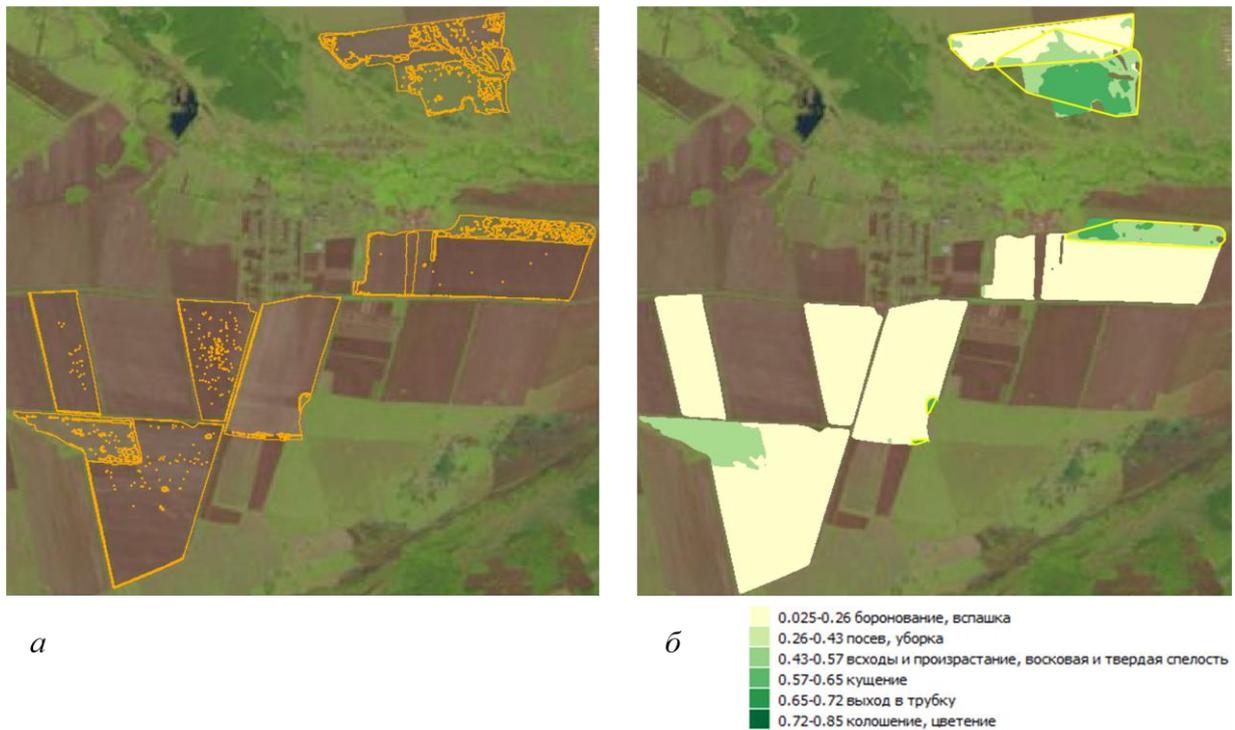


Рисунок 3.34 – Результаты сегментации по данным Sentinel-2A от 05.06.2016 г. :

a - без ограничений на NS и T ; *б* - $NS \leq 0.1$ Га, $T \leq 0.2$

На рисунке 3.35 представлены результаты сегментации по сверхвысокому разрешению (0,5 м) WorldView-2.

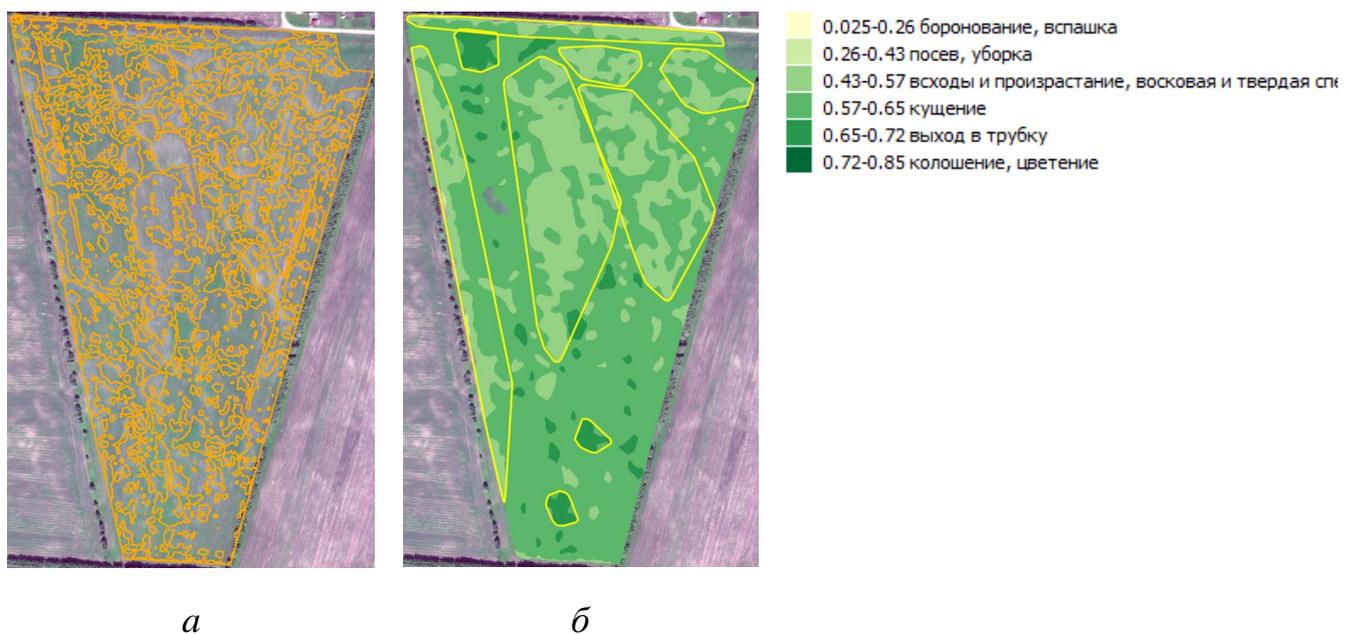


Рисунок 3.35 – Результаты сегментации по данным WorldView-2 от 25.06.2014 г.:

a – без ограничений на NS и T ; *б* – $NS \leq 0.1$ га $T \leq 0,2$

Результаты доступны в среде Internet по адресу <http://activemap.iikit.sfu-kras.ru/>.

3.2.3 Корреляционный анализ значений NDVI и ряда вегетационных индексов

Корреляционный анализ проводился по данным Landsat-8 от 15.06.2016 г. на территории тестовых полей № 155, 157, 166, 176. Значения NDVI, рассчитанные за данный вегетационный период, соответствуют началу фазы кущения. Результаты сравнивались со следующими вегетационными индексами (ВИ):

- Инфракрасный ВИ:

$$IPVI = \frac{NIR}{NIR + RED}. \quad (3.4)$$

Значения индекса от 0 до 1.

- Разностный ВИ:

$$DVI = NIR - RED. \quad (3.5)$$

Индекс принимает любые значения, например, для каналов Landsat-8 с глубиной цвета 2^{16} значения могут варьироваться от 0 до 65536.

- Относительный ВИ:

$$RVI = NIR/RED. \quad (3.6)$$

Индекс принимает значения от 0 до бесконечности.

- Почвенный ВИ:

$$SAVI = (1 + L) \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}, \quad (3.7)$$

где $L = [0; 1]$. При интенсивной растительности $L = 0$, при разреженной растительности $L = 1$.

Принимает значения от -1 до 1 .

- ВИ устойчивый к влиянию атмосферы:

$$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}, \quad (3.8)$$

где $Rb = RED - a * (RED - BLUE)$. В большинстве случаев $a = 1$, но при разреженной растительности и неопределенных параметрах атмосферы $a = 0,5$.

Принимает значения от -1 до 1 .

Поскольку перечисленные вегетационные индексы имеют различные диапазоны значений, то все полученные значения были приведены к относительным единицам и измеряются в диапазоне от -1 до 1 . В таблице 3.8 представлены результаты расчетов средних значений ВИ для заданных полей.

Таблица 3.8 – Сравнение средних значений ВИ

№ поля	NDVI	IPVI	DVI	RVI	SAVI	ARVI
155	0,242	0,621	0,086	0,164	0,363	0,187
157	0,291	0,645	0,098	0,182	0,436	0,214
166	0,322	0,661	0,111	0,196	0,483	0,244
176	0,341	0,671	0,124	0,204	0,512	0,265

Результаты сравнения средних значений NDVI с другими ВИ показывают хорошую сходимость, о чем свидетельствуют расчеты корреляционной зависимости (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Расчет коэффициентов корреляции

	IPVI	DVI	RVI	SAVI	ARVI
NDVI	0,999	0,975	0,998	0,999	0,986

Исходя из приведенных расчетов, можно сделать вывод о том, что для детектирования неоднородной динамически изменяющейся структуры объекта «ЗСХН» могут быть применимы спектральные признаки, рассчитанные на основе приведенных ВИ, при условии дополнительных полевых измерений, позволяющих верифицировать полученные значения спектральных признаков.

3.3 Выводы

Для реализации модели информационного процесса постановки конечным пользователем задачи мониторинга пространственного объекта с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой по данным ДЗЗ

разработано следующее программное обеспечение: база данных пространственного объекта, web-интерфейс постановки задачи дистанционного мониторинга и оценки результатов мониторинга на базе системы агромониторинга, алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта.

Проведенные экспериментальные исследования показали высокую корреляцию (в среднем 0,90) между измерениями NDVI по данным Landsat-8, Sentinel-2A, MODIS и результатами полевых исследований с применением спектрометра, что позволяет равнозначно использовать перечисленные данные для непрерывного спутникового мониторинга объектов «ЗСХН» с неоднородной динамически изменяющейся структурой и интерпретировать состояния неоднородных областей объекта для оценки развития с/х культуры (фенологических фаз) или хода агротехнических мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ моделей представления пространственных объектов для дистанционного мониторинга. На примере пространственного объекта «ЗСХН» с неоднородной динамически изменяющейся пространственной структурой показана необходимость разработки новых моделей объектов данного класса, учитывающих изменяемую во времени пространственную структуру.

2. Разработана динамическая модель пространственного объекта «земля сельскохозяйственного назначения», отличающаяся учетом его неоднородной пространственной структуры, позволяющая отслеживать изменение состояния объекта во времени в автономном режиме на основе анализа признаков неоднородных областей объекта.

3. Разработана модель информационного процесса постановки задачи мониторинга пространственного объекта по данным ДЗЗ, отличающаяся применением диалоговых средств, предназначенных для использования конечным пользователем, позволяющая сформулировать задачу мониторинга пространственного объекта.

4. Разработан алгоритм локализации неоднородной структуры пространственного объекта, отличающийся учетом ограничений значений признаков размера и формы неоднородностей, позволяющий сформировать альтернативные объектно-реляционные структуры пространственного объекта.

5. Разработано программное обеспечение для решения поставленной задачи, включающее базу данных пространственного объекта; систему агромониторинга, включая web-интерфейс, предназначенный для постановки задачи дистанционного мониторинга и оценки результатов мониторинга, ориентированный на КП; программную реализацию алгоритма локализации неоднородной структуры пространственного объекта по данным ДЗЗ.

6. Выполнены экспериментальные работы по разработанным моделям и алгоритму на тестовом полигоне в рамках учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское» на территории Сухобузимского района Красноярского края в

летний период 2015 г., включающие полевые исследования и дистанционные исследования по спутниковым изображениям КА Landsat-8, Terra (MODIS), которые подтвердили высокую корреляцию и эффективность предложенного подхода.

7. Основная часть результатов работы была получена при выполнении следующих государственных контрактов: грант ККФН в 2011 г. «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель на примере Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот»; грант РФФИ в 2014 г. «Интеллектуальная технология активного экологического мониторинга освоения природных ресурсов по данным дистанционных и наземных исследований»; грант ККФН в 2014 г. «Региональная автоматизированная система космического мониторинга муниципальных районов Красноярского края»; грант ККФН в 2015 г. «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края»; грант ККФН в 2015 г. «Создание системы мониторинга динамики структуры естественных и антропогенных объектов с высокой степенью изменчивости на основе использования открытых спутниковых данных».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АПК – антенный приемный комплекс

АТМ – агротехнические мероприятия

БД – база данных

ВИ – вегетационный индекс

ГИС – геоинформационная система

ГПД – геопространственные данные

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ЗСХН – земли сельскохозяйственного назначения

ИК – инфракрасный

ИС – информационная система

КА – космический аппарат

КП – конечный пользователь

СУБД – система управления базами данных

СХП – сельскохозяйственное предприятие

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритмы анализа данных спутниковых наблюдений TERRA-MODIS для мониторинга сельскохозяйственных земель / И. А. Нейштадт, С. А. Барталев, Д. М. Ершов, Е. А. Лупян, И. Ю. Савин // Геоинформатика. Междунар. науч.-техн. конф., посвященная 225-летию МИИГАиК. – 2004, Москва. – С. 205–209.
2. Алып, В. В. Перспективные информационные технологии интенсификации сельского хозяйства / В. В. Алып, В. К. Каличкин // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – № 5. – С. 34–37.
3. Бакут, П. А. Сегментация изображений: методы пороговой обработки / П. А. Бакут, Г. С. Колмогоров, И. Э. Ворновиций // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 10. – С. 6–24.
4. Барталев, С. А. Метод выявления используемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования со спутников / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Вып. 3, Т. 2. – С. 271–280.
5. Беленков, А. И. Точное (координатное) земледелие в РГАУ МСХА имени К. А. Тимирязева: реальность и перспективы / А. И. Беленков, А. Ю. Тюмаков, У. М. Сабо // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (126). – С. 5–10.
6. Берлянт, А. М. К концепции развития ГИС в России / А. М. Берлянт, Е. А. Жалковский // Картографирование телекоммуникационных сетей России // ГИС-обозрение. – 2005. – С. 7–11.
7. Борисенко, В. И. Сегментация изображений (состояние проблемы) / В. И. Борисенко, А. А. Златопольский, И. Б. Мучник // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 7. – С. 3–56.
8. Варшанина, Т. П. Объектно-ориентированная географическая цифровая модель для геосистемного анализа / Т. П. Варшанина // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. – 2008. – № 4. – Майкоп: Изд-во Адыгейского гос. ун-та, 2008. – С. 81–83.

9. Варшанина, Т. П. Проблемы технологии автоматизированной географической диагностики территории / Т. П. Варшанина, О. А. Плисенко // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. – 2007. – Вып. № 4.

10. Гейдман, Б. П. Площади многоугольников / Б. П. Гейдман // Сер.: Библиотека «Математическое просвещение». Вып. 9. – М.: МЦНМО, 2001. – 24 с.: ил.

11. Геоинформатика: Учеб. для студ. вузов / Е.Г.Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и др.; Под ред. В. С.Тикунова. — М : Издательский центр «Академия», 2005. — 480 с.

12. ГИС лаборатория. NDVI – Теория и практика [Электронный ресурс]. Дата создания 27.12.2002. Дата обновления 11.05.2016. – URL: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.htm> (дата обращения: 03.03.2017).

13. Горно-геологическая отрасль – Геоинформационные системы в геологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://scibook.net/sistemyi-geologii-geoinformatsionnyie/modeli-prostranstvennyih-dannyih-48117.html> (дата обращения: 09.03.2017).

14. ГОСТ Р 52438–2005. Географические информационные системы. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 71 с.

15. Гук, А. П. Комплексный анализ космических снимков для выявления изменений при мониторинге территорий / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, А. С. Алферова // ГЕО-СИБИРЬ-2009: сб. материалов V Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 20–24 апр. 2009 г. – Новосибирск: СГГА, 2009. – Т. 4, ч. 2. – С. 181–185.

16. Демиденко, А. Г. Модель пространственных данных для решения задач регионального управления / А. Г. Демиденко // Геоматика. – 2010. – № 1.

17. Денисов, Д. А. Компьютерные методы анализа видеоинформации: монография / Д. А. Денисов. – Краснояр. гос. техн. ун-т; Красноярск, 1993. – 192 с.

18. Денисов, Д. А. Сегментация изображений на ЭВМ / Д. А. Денисов,

В. А. Низовкин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 10. – С. 5–30.

19. Дибихин, К. Ю. Распознавание элементов подстилающей поверхности сельскохозяйственного полигона / К. Ю. Дибихин, М. А. Коротков // Многопрофильный университет как региональный центр образования и науки. – Оренбург, Оренбургский гос. ун-т. – 2009. – С. 587–591.

20. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт, И. Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Вып. 2., Т. 2. – С. 228–236.

21. Дракин, В. И. Общение конечных пользователей с системами обработки данных / В. И. Дракин, Э. В. Попов, А. Б. Преображенский. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с., ил.

22. Евтюшкин, А. В. Мониторинг развития зерновых культур по данным полевых и космических наблюдений / А. В. Евтюшкин, Н. В. Рычкова // Материалы девятой региональной конференции по математике «МАК-2006». – Барнаул, 2006. – С. 56–58.

23. Жукова, Е. Ю. Изучение динамики агроценозов Минусинской котловины комплексными спутниковыми и наземными методами : дис. канд. биол. наук / Е. Ю. Жукова. – Ин-т Биофизики СО РАН, Красноярск, 2008.

24. Ильючик, М. А. Использование материалов ДЗЗ в лесоустройстве / М. А. Ильючик // Геоматика. – 2013. – № 4. – С. 59–64.

25. Использование спектральных характеристик для распознавания изображений, полученных при дистанционном зондировании / Л. А. Осипов, М. Б. Сергеев, Н. В. Соловьев, А. П. Шепета // Журн. Фундаментальные исследования. – 2004. – № 6. – С. 83–85.

26. Каличкин, В. К. Система поддержки принятия решений по рациональному использованию земельных ресурсов хозяйства на основе ГИС / В. К. Каличкин, А. И. Павлова // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 6. – С. 13–15.

27. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.: ил.

28. Кирьянова, Е. Ю. Линия почв как индикатор неоднородностей почвенного покрова / Е. Ю. Кирьянова, И. Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 310–318.

29. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт, И. Ю. Савин // Исследование Земли из Космоса. – 2006, Москва. – № 3. – С. 68–75.

30. Комосов, Ю. А. Необходимость, сущность и пути реализации новой модели представления пространственных данных / Ю. А. Комосов // Геодезия и картография. – 2009. – № 11.

31. Корец, М. А. Использование объектно-ориентированного подхода для автоматизированного дешифрирования лесотаксационных выделов по материалам космической съемки и цифровой модели рельефа местности / М. А. Корец // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2014. – С. 294–298.

32. Королев, Ю. К. Общая геоинформатика. Ч. 1: Теоретическая геоинформатика / Ю. К. Королев. – М.: Дата+, 1998. 118 с.

33. Личман, Г. И. Космический мониторинг в системе точного земледелия / Г. И. Личман, Н. М. Марченко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 1. – С. 27–31.

34. Маглинец, Ю. А. Развитие средств автоматизации приема и обработки спутниковой информации региональной системы ДЗЗ СФУ / Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 3. – С. 120–128.

35. Мартыненко, А. И. Методика обновления системы электронных

автодорожных карт на основе многоуровневой модели базы пространственных данных / А. И. Мартыненко, И. П. Карачевцева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та геодезии и картографии. – 2006. – № 1. – С. 161–165.

36. Минитаева, А. М. Модели человеко-машинного анализа и полагания целей в организационных системах / А. М. Минитаева, О. С. Межаков // Ученые записки. – 2013. – № 1. – С. 113–116.

37. Мониторинг сельскохозяйственных земель на базе разномасштабных спутниковых данных / Н. М. Вандышева, Г. И. Василенко, А. Ф. Гуров и др. // Исследование Земли из Космоса. – 2003. – № 3. – С. 72–84.

38. Мышляков, С. Г. Системы космического мониторинга сельскохозяйственных земель Европейского союза, США, Китая / С. Г. Мышляков // Геоматика. – 2012. – № 2. – С. 87–90.

39. Организация контроля над функционированием распределенной системы ИСДМ Рослесхоз / А. А. Матвеев, А. С. Мамаев, А. А. Прошин, Е. В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6, № 2. – С. 535–541.

40. Официальный сайт GDAL/OGR OSGeo Project. [Электронный ресурс]. – URL: <http://gdal.org/> (дата обращения 25.02.2017).

41. Пашута, А. О. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения как метод государственного управления земельными ресурсами / А. О. Пашута, М. П. Солодовникова // Вестник Воронеж. гос. аграрного ун-та. – 2015. – № 3 (46). – С. 245–252.

42. Погорелов, А. В. Опыт космического мониторинга свалок на территории Краснодарского края / А. В. Погорелов, С. В. Дулепа, Д. А. Липилин // Геоматика. – 2013. – № 4. – С. 64–71.

43. Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности / М. А. Бурцев, А. А. Мазуров, И. А. Нейштадт, А. А. Прошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Вып. 3, Т. 1. – С. 170–174.

44. Построение интерфейсов для организации работы с архивами спутниковых данных удаленных пользователей / М. В. Андреев, В. Ю. Ефремов, Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, Ю. Ф. Наглин, А. А. Прошин, Е. В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Вып. 1, Т. 1. – С. 514–520.

45. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления / Р. В. Брежнев, Ю. А. Маглинец, Е. А. Мальцев, С. Е. Перфильев, А. Ю. Сидоров, Г. М. Цибульский, А. С. Шokol // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – Красноярск, 2012. – Т. 5, № 3. – С. 340-352.

46. Программно-технологическая инфраструктура представления и обработки геопространственной информации муниципального района / Ю. А. Маглинец, Е. А. Мальцев, Р. В. Брежнев, А. С. Соснин, Г. М. Цибульский, К. В. Шатрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2012. – Т.9, №3. – С. 316-324.

47. Прощаев, С. Н. Использование объектно-реляционных СУБД в ГИС / С. Н. Прощаев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка М.: Изд-во Моск. гос. ун-та геодезии и картографии, 2002. – № 4. – С. 154–161.

48. Разработка методов мониторинга пахотных земель России по данным спутниковых наблюдений радиометром MODIS / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт, Е. В. Щербенко. – М.: ИКИ РАН, 2007. – 222 с.

49. Распоряжение Правительства РФ от 30 июля 2010 г. № 1292-р «О Концепции развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 года».

50. Саворский, В. П. Автоматизированная система управления данными, максимизирующая скорость доступа к архиву ДЗЗ / В. П. Саворский //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 2. – С. 568–570.

51. Самардак, А. С. Геоинформационные системы: учеб. пособие / А. С. Самардак. – Владивосток: ТИДОТ ДВГУ, 2005. – 123 с.

52. Сапрыкин, Е. И. Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли / Е. И. Сапрыкин, Л.А. Сладких, Е.Н. Кулик // Интерэкспо Гео-Сибирь. – № 1, Т. 4. – 2015. – С. 40–46.

53. Сахарова, Е. Ю. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, М. Г. Захватов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – № 1, Т. 4. – 2014.

54. Система автоматизированного сбора, обработки и распространения спутниковых данных для мониторинга сельскохозяйственных земель / С. А. Барталев, М. А. Бурцев, Д. В. Ершов, В. Ю. Ефремов, Н. И. Ильин, Е. А. Лупян и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Вып. 2, Т. 1. – С. 140–148.

55. Сладких, Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / Л. А. Сладких, В. Н. Антонов // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 50–53.

56. Смирнов, А. И. Растениеводство [Текст] : [для агр. техникумов] / А. И. Смирнов. – М.: Сельхозгиз, 1958. – 503 с.

57. Сообщества Python разработчиков [Электронный ресурс]. – 2001. – URL: <https://pypi.python.org/pypi/usgs> (дата обращения: 25.02.2017).

58. Султангазин, У. М. Использование космического мониторинга в планировании и прогнозировании параметров зернового производства / У. М. Султангазин, Н. Р. Муратова, А. Г. Терехов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Москва, Полиграф сервис. – Вып. 1, Т. 1. – С. 291–297.

59. Темников, В. Н. Система дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения / В. Н. Темников, А. В. Столпаков, Д. И.

Рухович // Геоинформационные системы для бизнеса и общества. – 2007. – 1 (40).

60. Терехин, Э. А. Анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и отражательных свойств посевов кукурузы на территории Белгородской области / Э. А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 4. – С. 244–253.

61. Терехов, А. Г. Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана / А. Г. Терехов, А. М. Кауазов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 327–332.

62. Управление землепользованием с применением многокритериальной системы поддержки принятия решений DECERNS / Б. И. Яцало, В. И. Диденко, С. В. Грицюк, А. М. Бабуцкий, И. А. Пичугина, О. А. Мирзеабасов, О. Ю. Гобузова // Вестник РАЕН. – 2013. – № 2. – С. 66–74.

63. Усов, А. Б. Система поддержки принятия решений по упрощению рациональным использованием земельных ресурсов / А. Б. Усов // Информационные технологии. – 2007. – № 8. – С. 67–71.

64. Фаулер, М. UML / М. Фаулер // Основы. 3-е изд. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2004. – 192 с., ил.

65. Хайбрахманов, Т. Геоинформационные сервисы космического мониторинга сельскохозяйственных земель / Т. Хайбрахманов // МСХЖ. – 2016. – № 4. – С. 9–12.

66. Хортонен, А. А. Географические информационные системы как класс систем поддержки принятия решений при управлении пространственной информацией (на примере банковской сферы) / А. А. Хортонен // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 1. – С. 195–199.

67. Хортонен, А. А. Мониторинг банковской деятельности на базе ГИС-технологий / А. А. Хортонен, И. Ю. Квятковская // Материалы 8-й Всерос. науч.-практ. конф. «Теоретические и прикладные вопросы современных

информационных технологий». – Улан-Удэ: Вост.-Сибир. гос. технол. ун-т, 2007. – С. 141–144.

68. Хунагов, Р. Д. Модель и структура данных структурной приближенно подобной модели геопространства / Р. Д. Хунагов, Т. П. Варшанина // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. – Майкоп: Изд-во Адыгейского гос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 98–115.

69. Цибульский, Г. М. Символические системы и поиск в задачах анализа и интерпретации изображений / Г. М. Цибульский // Материалы четвертой Всерос. конф. «Проблемы информатизации региона». – Красноярск, 1998.

70. Шакирова, А. Р. Геоинформационные технологии: основные понятия, функции и типы применения / А. Р. Шакирова // Открытое и дистанционное образование. – Томск, 2005. – № 1 (17). – С. 33–36.

71. Шаяхметов, М. Р. Точное земледелие (Precision Agriculture) – путь к ресурсосбережению / М. Р. Шаяхметов, И. А. Дубровин // Омский научный вестник. – № 1 (118). – 2013. – С. 197–200.

72. Шендера, К. К. Разработка приложений, использующих объектно-ориентированные базы геологических данных, с помощью платформы Entity Framework / К. К. Шендера // Разведка и охрана недр. – М.: Изд-во Всерос. науч.-исслед. ин-та минерального сырья им. Н. М. Федоровского. – 2012. – № 2. – С. 74–79.

73. Шукилович, А. Ю. Применение сенсора modis для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения / А. Ю. Шукилович, Е. В. Федотова, Ю. А. Маглинец // Журнал Сиб. федер. ун-та. Сер. Техника и технологии. – 2016. – 9(7). – С. 1035–1044.

74. Шуркина, А. И. Изучение растительности степного пояса Хакасии комплексными спутниковыми и наземными методами: дис. канд. биол. наук / А. И. Шуркина. – Ин-т Биофизики СО РАН, Красноярск, 2008.

75. Электронный ресурс разработчика HTTP-сервера NGINX. [Электронный ресурс]. – URL: <https://nginx.org/ru/> (дата обращения: 25.02.2017).

76. Электронный ресурс разработчиков библиотеки GDAL. GDAL/OGR 2.1.0

Release Notes. [Электронный ресурс]. Дата обновления 27.01.2017. – URL: <https://trac.osgeo.org/gdal/wiki/Release/2.1.0-News> (дата обращения: 25.02.2017).

77. Якушев, В. П. Информационное обеспечение точного земледелия [Текст] / В. П. Якушев, В. В. Якушев. – СПб.: ПИЯФ РАН, 2007. – 384 с.

78. Якушев, В. П. На пути к точному земледелию [Текст] / В. П. Якушев. – СПб.: ПИЯФ РАН, 2002. – 458 с.

79. Armstrong, M. P. Requirements for the development of GIS-based group decision support systems / M. P. Armstrong // *Journal of the American Society for Information Science*. – 1994. – 45(9). – P. 669–677.

80. Bartelme, N. Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen / N. Bartelme // Springer, Berlin. – 1995.

81. Becker-Reshef, I. Monitoring Global Croplands with Coarse Resolution Earth Observations: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) Project / Inbal Becker-Reshef, Chris Justice, Mark Sullivan // *Remote Sensing*. – 2010. – № 2. – P. 1589–1609.

82. Brezhnev, R.V. An Ontological Spatial Monitoring System for Agricultural Land Monitoring / R.V. Brezhnev, E.A. Maltsev // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2015. – Vol. 25, No. 2. – P. 201–208.

83. Carver, S. J. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems / S. J. Carver // *International Journal of Geographical Information Systems*. – 1991. – 5(3). – P. 321–339.

84. Chakhar, S. Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions / S. Chakhar, J.-M. Martel // *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. – 2003. – 7(2). – P. 47–71.

85. Claramunt, B. Managing Time in GIS: An Event Oriented Approach / B. Claramunt, M. Theriault // *Recent Advances on Temporal Databases*; J. Clifford and A. Atuzhilin eds. – Springer-Verlag, Zurich. – 1995. – P. 23–42.

86. Classification and Segmentation of Satellite Orthoimagery Using Convolutional Neural Networks / M. Längkvist, A. Kiselev, M. Alirezaie, A. Loutfi // *Remote Sens*. – 2016. – 8(4). – P. 329.

87. Database Modeling for environmental and Land Use Changes / C. Claramunt, C. Parent, S. Spaccapietra, M. Theriault // Geographical Information and Planning, Chapter 20, Springer-Verlag. – 1998.

88. Devadasa, R. Support vector machine classification of object-based data for crop mapping, using multi-temporal Landsat imagery / R. Devadasa, R. J. Denhama and M. Pringlea // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXII ISPRS Congress. – 2012. – 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. – Vol. XXXIX-B7. – P. 185–190.

89. Dos Santos, J. Evaluating the potential of texture and color descriptors for remote sensing image retrieval and classification / J. Dos Santos, O. Penatti, R. Da Torres // In Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Angers, France. – 2010, 17–21 May. – P. 203–208.

90. e-Spatial Technology for Spatial Analysis and Decision Making in Web-based Land Information Management Systems / M. Bertolotto, J.D. Carswell, L. McGeown, J. McMahon // Journal of Geographic Information and Decision Analysis. – 2001. – 5(2). – P. 95-114.

91. Greene, R. Addressing Accessibility Challenges of GIS-based Multiple-Criteria Decision Analysis for Integrated Land Management: Case study in the Humber region of Newfoundland and Labrador, Canada, Department of Geography Memorial University of Newfoundland. – 2010. – 154 p.

92. Greene, R. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis / R. Greene, R. Devillers, Joan E. Luther, Brian G. Eddy // Geography Compass. – 2011. – Vol. 5/6. – P. 412–432.

93. Grosz, B. J. The Representation and use of Focus in a System Understanding Dialog / B. J. Grosz // Proc. 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence. – Cambridge, Boston: MIT Press, 1977. – P. 67–76.

94. Hunter, Gary J. The Development of a Historical Digital Cadastral Database / Gary J. Hunter, Ian P. Williamson // Int. Journal of Geographic Information Systems. – 1990. – 4(2).

95. Jankowski, P. Integrating geographical information systems and multiple

criteria decision making methods / P. Jankowski // International Journal of Geographical Information Systems. – 1995. – 9. – P. 251–273.

96. Jarvis, R. A. On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane / R. A. Jarvis // Information Processing Letters, 1973. 2: 18–21. doi:10.1016/0020-0190(73)90020-3.

97. Landsat Missions. Landsat 8 Pre-Collection Quality Assessment Band [Электронный ресурс]. Дата обновления 29.11.2016. – URL: <http://landsat.usgs.gov/qualityband.php> (дата обращения: 03.03.2017).

98. Langran, G. A. Framework for Temporal Geographic Information Systems / G. A. Langran // Cartographica. – 1988. – 25 (3).

99. Langran, G. Time in Geographical Information Systems, ed. Taylor & Francis, London. – 1992.

100. Levin, J. A. Dialog-games: Meta-communication Structures for Natural Language Interaction / J. A. Levin, J. A. Moore // Cognitive Science. – 1977. – Vol. 1, № 4. – P. 87–124.

101. Literature Review of Spatio-Temporal Database Models / N. Pelekis, B. Theodoulidis, I. Kopanakis [et al.] // The Knowledge Engineering Review. – 2004. – Vol. 19, Is. 3. – P. 235–274.

102. Ma, X. Optimized Sample Selection in SVM Classification by Combining with DMSP-OLS, Landsat NDVI and GlobeLand30 Products for Extracting Urban Built-Up Areas / X. Ma, X. Tong, S. Liu [et al.] // Remote Sens. – 2017. – 9. – P. 1–16.

103. Malczewski, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview / J. Malczewski // Progress in Planning. – 2004. – 62. – P. 3–65.

104. Merrick Lex Berman +gis +time +web [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fas.harvard.edu/%7Echgis/work/docs/papers/HVD_GOV1003_20130304.pdf.

105. Merrick Lex Berman CHGIS Version 2.0 – Time Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fas.harvard.edu/%7Echgis/work/docs/papers/lex_abcd_03.zip.

106. Modeling Semantical, Temporal, and Spatial Information in Geographic

information Systems / M. Yuan, M. Craglia, H. Couclelis eds // *Geographic Information Research: Bridging the Atlantic*, Taylor & Francis. – 1996. – P. 334–347.

107. Molenaar, M. Single valued vector maps – a concept in GIS / M. Molenaar // *Geo-Information systeme*. – 1989. – 2(1). – P. 18–26.

108. Montgomery, L. D. Temporal Geographic Information Systems Technology and Requirements: Where We are Today / L. D. Montgomery // Thesis, Department of Geography, Ohio State University, USA. – 1995.

109. Moran, M.S. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management / M.S. Moran, Y. Inoue and E.M. Barnes // *Remote sensing of environment*. – 1997. – 61.

110. Nandal, R. Spatio-Temporal Database and Its Models: A Review / R. Nandal // *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*. – 2013. – Vol. 11, Is. 2. – P. 91–100.

111. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology / J.M. Peña-Barragán, M.K. Ngugi, R.E. Plant, J. Six // *Remote Sens. Environ.* – 2011, 115. – P. 1301–1316.

112. Ott, T. Time-Integrative Geographic Information Systems: Management and Analysis of Spatio-Temporal Data / Thomas Ott, Frank Swiaczny // Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer. – 2001.

113. Parent, C.S. Spatio-Temporal Conceptual Models: Data Structures + Space + Time / C.S. Parent, S. Spaccapietra, E. Zimanyi // *Proceedings of the 7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, Kansas City, MO. – 1999.

114. Peuquet, D. An approach for Time-Based Spatial Analysis of Spatio-Temporal Data / D. Peuquet, E. Wentz // *Advances in GIS Research, Proceedings 1*. – 1994. – P. 489–504.

115. Ramachandran, A. Modeling Temporal Changes in a GIS using an Object Oriented Approach / A. Ramachandran, F. MacLoad, S. Dowers // *Advances in GIS Research, Sixth International Symposium on Spatial Data Handling*. – 1994.

116. Remote Sensing for Crop Management / Paul J. Pinter, Jr., Jerry L. Hatfield, James S. Schepers, Edward M. Barnes, M. Susan Moran, Craig S.T. Daughtry, and Dan R. Upchurch // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – Vol. 69, No. 6. – June 2003. – P. 647–664.

117. Renolen, A. History Graphs: Conceptual Modeling of Spatio-temporal Data / A. Renolen // *GIS Frontiers in Business and Science*, International Cartographic Association, Brno, Czech Republic. – 1996. – Vol. 2.

118. Rinner, C. Web-based Spatial Decision Support: Status and Research Directions / C. Rinner // *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. – 2003. – 7(1). – P. 14–31.

119. Singha, M. An Object-Based Paddy Rice Classification Using Multi-Spectral Data and Crop Phenology in Assam, Northeast India / M. Singha, B. Wu, M. Zhang // *Remote Sens.* – 2016. – 8, 479. doi:10.3390/rs8060479.

120. Spatio-Temporal Databases [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-users.cs.umn.edu/~lmani/spatial/HW5-B4.pdf#page=4&zoom=auto,-100,695>.

121. The Technology of Dynamic Extension of Attribute Set for the Search of Satellite Images in a Database / Е. А. Мальцев, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, А. С. Соснин, В. Ю. Курносков // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2011. – Vol. 21, No. 1. – P. 35-40.

122. Tryfona, N. Conceptual Data Modeling for Spatiotemporal Applications / N. Tryfona, C. S. Jensen // *GeoInformatica*. – 1999. – Vol. 3. – P. 245–268.

123. Tryfona, N. Using Abstractions for Spatio-Temporal Conceptual Modeling / N. Tryfona, C. S. Jensen // *Proceedings of the 2000 ACM Symposium on Applied Computing*, Como, Italy. – 2000.

124. Vegetation Indices in Crop Assessments / C. L. Wiegand, A. J. Richardson, D. E. Escobar, A. H. Gerbermann // *Remote Sensing of Environment*. – 1991. – № 35. – P. 105–119.

125. Yuan, M. Wildfire Conceptual Modeling for Building GIS Space-Time models / M. Yuan // *Proceedings of the GIS/LIS'94*. – 1994. – P. 860–869.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации
программ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010610216

Подсистема обработки метаинформации системы
обработки и хранения данных дистанционного
зондирования Земли из космоса.

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

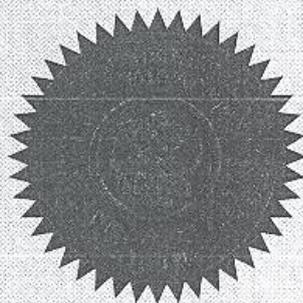
Автор(ы): *Брежнев Руслан Владимирович (RU)*

Заявка № 2009615929

Дата поступления 26 октября 2009 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
11 января 2010 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011619135

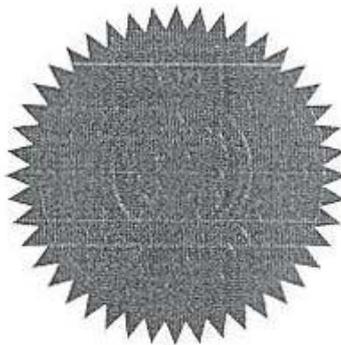
Система управления базой данных космоснимков

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *Мальцев Евгений Алексеевич,
Соснин Алексей Сергеевич, Курносов Виктор Юрьевич,
Маглинец Юрий Анатольевич, Брежнев Руслан Владимирович,
Цибульский Геннадий Михайлович (RU)*

Заявка № 2011617200

Дата поступления 27 сентября 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
24 ноября 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011619136

Геоинформационная система залежных земель
Манского района Красноярского края

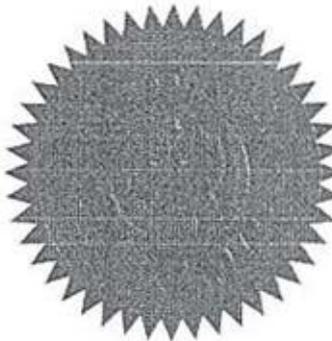
Правообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *Мальцев Евгений Алексеевич,
Соснин Алексей Сергеевич, Курносов Виктор Юрьевич,
Маглинец Юрий Анатольевич, Брежнев Руслан Владимирович,
Цибульский Геннадий Михайлович (RU)*

Заявка № 2011617201

Дата поступления 27 сентября 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
24 ноября 2011 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015610275

Система мониторинга земель сельскохозяйственного назначения по данным дистанционного зондирования Земли

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Автор: *Брежнев Руслан Владимирович (RU)*

Заявка № 2014661339

Дата поступления 07 ноября 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 января 2015 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Курий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016611699**Программный модуль управления справочниками
геопространственных объектов системы мониторинга
динамики структуры естественных и антропогенных
объектов**

Правообладатели: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU), Краевое государственное автономное учреждение «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» (Краевой фонд науки) (RU)*

Авторы: *Брежнев Руслан Владимирович (RU),
Маглинец Юрий Анатольевич (RU)*

Заявка № 2015662761

Дата поступления 24 декабря 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 февраля 2016 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Справки о внедрении

Для представления в диссертационный совет Д 212.099.22
660041, г. Красноярск, Свободный проспект, 79

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Брежнева Р.В. на тему: «Модели и алгоритмы информационной поддержки решения задач мониторинга объектов неоднородной пространственной структуры по данным дистанционного зондирования Земли» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были внедрены в учебный процесс при подготовке магистрантов по направлению: 09.04.01 Информатика и вычислительная техника, по программам 09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге природных и антропогенных экосистем и 09.04.01.10 Интеллектуальные информационные системы.

Директор института космических
и информационных технологий СФУ



Дибульский Г.М.

Для представления в диссертационный совет Д 212.099.22

660041, г. Красноярск, Свободный проспект, 79

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Брежнева Р.В. на тему: «Модели и алгоритмы информационной поддержки решения задач мониторинга объектов неоднородной пространственной структуры по данным дистанционного зондирования Земли» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при дистанционном мониторинге неоднородностей на землях сельскохозяйственного назначения с зерновыми культурами на территории Сухобузимского района Красноярского края.

Результаты мониторинга представлены в виде периодически обновляемых карт доступных в web-интерфейсе системы агромониторинга и используются для оказания информационной поддержки дистанционного агромониторинга в рамках процессов точного земледелия.

Заместитель главы
Сухобузимского района
по сельскому хозяйству



Ю.Д. Шпирук