

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Сахарова Елена Юрьевна 

Совершенствование методик обработки космических снимков в системе
регионального мониторинга состояния сельскохозяйственных культур

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Кулик Екатерина Николаевна

Новосибирск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕН- НОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	11
1.1 Возможности и условия использования данных дистанционного зонди- рования Земли для мониторинга растительности	11
1.2 Применение вегетационных индексов для оценки посевов сельскохозяй- ственных культур.....	14
1.3 Космические аппараты для решения задач сельскохозяйственного назна- чения.....	17
1.4 Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для обеспечения потребностей сельскохозяйственного производства.....	32
1.5 Методики применения данных дистанционного зондирования для целей сельского хозяйства.....	36
1.5.1 Идентификация сельскохозяйственных культур по космическим снимкам.....	36
1.5.2 Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на осно- ве использования данных дистанционного зондирования Земли	40
1.5.3 Методики обработки материалов спектральной съемки для выявле- ния состояния вегетации.....	47
1.5.4 Использование радарных данных для решения задач сельскохозяйст- венного производства.....	50
1.6 Системы глобального космического мониторинга земель сельскохозяйст- венного назначения.....	51
1.6.1 Информационный потенциал данных дистанционного зондирования Зем- ли для реализации систем мониторинга сельскохозяйственных земель	51
1.6.2 Зарубежные системы глобального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения	51

1.6.3 Опыт ближнего зарубежья в космическом мониторинге земель сельскохозяйственного назначения	54
1.6.4 Российские разработки для решения задач сельскохозяйственной отрасли на основе использования спутниковых данных	57
1.7 Эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли при решении задач сельскохозяйственного производства	63
Выводы по первому разделу	65
2 РЕГИОНАЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	67
2.1 Система регионального космического мониторинга состояния сельскохозяйственных культур	67
2.2 Методика обработки космических снимков в системе регионального мониторинга состояния посевов зерновых культур	77
2.3 Методика обработки многоспектральных космических снимков для выявления пахотных земель.....	82
Выводы по второму разделу	85
3 РЕЗУЛЬТАТ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМЕ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	86
3.1 Физико-географические особенности района исследования.....	86
3.2 Результаты обработки космических снимков для определения состояния посевов зерновых культур юга Западной Сибири.....	88
3.3 Обработка спутниковых данных среднего пространственного разрешения для определения используемых пахотных земель	95
3.4 Оценка достоверности результатов обработки космических снимков	102
Выводы по третьему разделу	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ «ФОРМИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОСТОЯНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР».....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ «МАСКИ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ, СОЗДАНИЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Поскольку основой продовольственной безопасности страны служат валовые сборы зерна, важность развития сельского хозяйства невозможно недооценить. Актуальной задачей при прогнозировании урожайности зерновых культур является оценка их состояния в пределах крупных административных единиц, таких как область или край. Выполнение наземных маршрутных агрометеорологических обследований позволяет получать достоверные данные, однако, ввиду обширности исследуемой территории, такие наблюдения носят нерегулярный характер как по времени, так и по пространственному охвату. Поэтому наряду с натурными измерениями важно развивать дистанционные методы, которые являются важным элементом эффективного информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли.

Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур обеспечивает объективный и регулярный контроль развития посевов, оценки продуктивности культур и целевого использования земель сельскохозяйственного назначения. Методики обработки спутниковых данных с целью оценки состояния посевов ориентированы на глобальный анализ спектрально-динамических характеристик культур без учета региональных агрометеорологических особенностей и многолетних детальных статистических данных об урожайности зерновых культур.

В системе мониторинга состояния зерновых культур качество и оперативность оценки посевов зависят от результатов выявления пахотных земель. Существующие методики создания глобальных карт посевных площадей Российской Федерации базируются на основе обработки космических снимков низкого пространственного разрешения, однако для определения пахотных земель на региональном уровне требуется применение более детальной спутниковой информации. Следовательно, совершенствование методик обработки космических снимков для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления посевных территорий в системе регионального мониторинга является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы. Вопросами разработки методов и средств спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения занимается ряд отечественных научных организаций: Институт космических исследований РАН, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, компания «Совзонд», Институт биофизики СО РАН, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Значительный вклад в развитие методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и использования спутниковых данных для целей сельскохозяйственного производства внесли российские и зарубежные ученые: Журкин И. Г., Малинников В. А., Гук А. П., Лупян Е. А., Барталев С. А., Чибуничев А. Г., Пяткин В. П., Бучнев А. А., Цибульский Г. М., Егоров В. А., Уваров И. А., Савин И. Ю., Страшная А. И., Клещенко А. Д., Сидько А. Ф., Терехин Э. А., Genovese G., Royer A., Терехов А. Г., Султангазин У. М., Муратова Н. Р., Куссуль Н. Н., Скакун С. В., Шелестов А. Ю., Леонтьев А. А. и др.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключается в совершенствовании методик обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

– выполнить анализ существующих методик обработки спутниковых данных для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель;

– усовершенствовать методику обработки многозональных космических снимков для определения состояния посевов зерновых культур в системе регионального мониторинга;

– выполнить анализ сезонной изменчивости значений индекса вегетации пахотных земель по данным, полученным космическим аппаратом (КА) Terra с учетом региональных агрометеорологических особенностей;

– усовершенствовать методику обработки космических снимков среднего пространственного разрешения для выявления пахотных земель на региональном уровне;

– выполнить экспериментальные исследования предложенных методик обработки данных ДЗЗ с целью мониторинга состояния посевов зерновых культур на сельскохозяйственных угодьях юга Западной Сибири.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является региональный мониторинг состояния сельскохозяйственных культур.

Предметом исследования являются методики обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга для оценки состояния посевов зерновых культур и выявления пахотных земель.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– усовершенствована методика обработки космических снимков для оценки состояния посевов на региональном уровне посредством использования рассчитанных пороговых диапазонов индекса вегетации на каждый день вегетационного периода, учета региональных агрометеорологических особенностей и многолетних детальных статистических данных об урожайности зерновых культур, что позволило повысить достоверность информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли;

– усовершенствована методика обработки космических снимков среднего пространственного разрешения для определения пахотных земель, обеспечивающая детальный учет используемых земель сельскохозяйственного назначения на региональном уровне, что позволяет повысить объективность оценки состояния посевов зерновых культур.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что усовершенствована методика обработки спутниковых данных для определения состояния посевов зерновых культур за счет использования пороговых диапазонов индекса вегетации, установленных на основе анализа многолетних эмпирических данных. Предложена методика выявления используемых пахотных земель по космическим снимкам среднего пространственного разрешения на основе проведенного анализа сезонной изменчивости индекса вегетации для определения временных периодов снижения вегетационной активности и соответствующих им диапазонов индексов вегетации. Использование усовершенствованных методик позволяет реализовать систему эффективного регионального мониторинга.

Практическая значимость работы состоит в том, что методики обработки спутниковых данных позволяют выполнять оперативный мониторинг состояния сельскохозяйственных культур на региональном уровне с представлением результатов в виде карт, отражающих площади пахотных земель с различным состоянием посевов. Разновременные карты состояния зерновых культур, полученные за один вегетационный период, позволяют оценить динамику развития посевов и являются показателем ожидаемой продуктивности возделываемых культур.

Методология и методы исследований. В качестве методологической основы использованы методы визуального дешифрирования, статистического анализа и обработки спутниковых изображений с применением современных геоинформационных систем. Эмпирической основой исследований служили снимки с КА Terra и Landsat, статистические значения урожайности зерновых культур на исследуемых территориях (за период с 1985 по 2017 г.), архивные и оперативные данные о расположении культур на полях сельскохозяйственных предприятий Новосибирской области, база данных вегетационных индексов на тестовых участках. Методика выявления пахотных земель по космическим снимкам среднего пространственного разрешения позволяет осуществлять детальный учет исполь-

зуемых сельскохозяйственных земель для объективной оценки состояния посевов зерновых культур на региональном уровне.

Положения, выносимые на защиту:

– методика обработки космических снимков в системе регионального мониторинга состояния посевов зерновых культур по трем градациям, принятым в агрометеорологии, на основе использования эмпирических пороговых диапазонов индекса вегетации;

– методика обработки многоспектральных космических снимков среднего пространственного разрешения для выявления пахотных земель.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует областям исследования: 4 – Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований; 5 – Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты выполненных исследований представлены:

– на X и XIII всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (12–16 ноября 2012 г., Москва и 16–20 ноября 2015 г., Москва);

– всероссийской конференции с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (17–19 сентября 2013 г., Архангельск);

– VII Зерновом круглом столе «Сценарии развития цен на зерно на внутреннем рынке в 2013/14 МГ» (21 ноября 2013 г., Новосибирск);

– объединенном научном семинаре СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» и ИВМиМГ СО РАН (8 апреля 2014 г., Новосибирск);

– международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015» (13–25 апреля 2015 г., Новосибирск) и «Интерэкспо ГЕО–Сибирь» (23–27 апреля 2018 г., Новосибирск);

– I, II и III международных научных конференциях «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (23–26 сентября 2014 г., Красноярск; 22–25 сентября 2015 г., Красноярск; 13–16 сентября 2016 г., Красноярск).

Усовершенствованные методики применяются в Сибирском центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета») и отделах агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ для оценки эффективности использования сельскохозяйственных земель южных территорий Западной Сибири.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в 14 научных работах, три из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Получено два свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований, содержит 25 таблиц, 29 рисунков и 2 приложения.

1 ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Возможности и условия использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга растительности

Данные дистанционного зондирования Земли, будь то материалы космической или аэрофотосъемки, активно используются в различных отраслях производства, позволяя решать разные задачи [5, 6, 15, 32, 64, 71, 88]. Геоинформационный анализ данных ДЗЗ открывает для специалистов отрасли сельскохозяйственного производства доступ к различным видам информационной продукции. С привлечением данных ДЗЗ производится подготовка карт внутрихозяйственного землеустройства, инвентаризация земель, оценка общего состояния посевов сельскохозяйственных культур, контроль выполнения посевных и уборочных работ, прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, подготовка рекомендаций по достаточной концентрации вносимых удобрений в соответствии с текущим состоянием посевов, подготовка карт высот местности и т. д. Мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур подразумевает проведение периодических наблюдений, оценку текущего состояния, а также прогнозирование дальнейшего развития посевов [44, 50, 53, 57, 28, 60, 72].

Данные ДЗЗ обладают рядом преимуществ, среди которых можно выделить:

- высокую достоверность и объективность получаемой информации;
- оперативность предоставления снимков;
- высокую периодичность получения информации на заданную территорию;
- большой территориальный охват в сравнении с наземными способами получения информации;
- архивные данные, позволяющие выполнять ретроспективный анализ;

- получение данных в единообразном стандартизированном виде, что позволяет автоматизировать обработку данных;
- накопление статистической информации и ее использование для прогнозирования развития культур и оценки происходящих изменений.

Широкий спектр разнообразных по своим характеристикам космических снимков обеспечивает возможность выбора информации, наиболее подходящей для решения поставленной задачи [34, 83]. Для осуществления глобального мониторинга сельскохозяйственных угодий на уровне страны или региона используются космические снимки низкого и среднего пространственного разрешения, которые обеспечивают широкий охват территории. Таким образом, для сбора «мелкомасштабной» статистической информации целесообразно использовать данные, полученные с космических аппаратов (КА) Terra, Aqua, Suomi NPP и т. д. Выполнение работ, требующих большей детальности, на территории одного или ряда фермерских хозяйств подразумевает использование космических снимков высокого или среднего разрешения, а также привлечение материалов аэрофотосъемки, выполненной с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Одними из наиболее распространенных космических снимков среднего разрешения являются материалы съемки с КА Landsat, SPOT, Sentinel, среди данных высокого разрешения стоит отметить GeoEye, QuickBird, Pleiades и т. д.

Помимо использования непосредственно данных ДЗЗ также привлекаются различные виды вспомогательной информации, которые в значительной степени повышают достоверность результатов обработки космических снимков. В качестве дополнительных видов данных выступают:

- почвенные карты;
- картографические материалы;
- цифровые модели рельефа (ЦМР);
- данные о севообороте;
- агрометеорологическая информация;
- материалы аэрофотосъемки;

- климатические характеристики;
- данные о выращиваемых сельскохозяйственных культурах;
- результаты полевых обследований;
- информация об агротехнических мероприятиях;
- многолетняя статистическая информация и пр.

Основные характеристики, на которые необходимо обратить внимание при выборе космических снимков, следующие: пространственное разрешение, спектральные характеристики, ширина полосы съемки и периодичность съемки. Выбор этих параметров зависит от области применения результатов обработки космических снимков.

От величины пространственного разрешения космического снимка зависит размер наименьшего объекта, который можно различить на снимке. Высокое пространственное разрешение обеспечивает наиболее точное определение геометрических характеристик объектов, поэтому космические снимки высокого пространственного разрешения целесообразно использовать для определения границ полей, расчета их площадей, выполнения детальной оценки каждого поля. Низкое пространственное разрешение снимка не может обеспечить высокую точность произведенных измерений в пределах отдельного хозяйства, так как на изображении будут присутствовать искажения спектрального отклика поля за счет влияния окружающих объектов местности, таких как лесополосы и полевые дороги. Однако при обеспечении задач мониторинга посевов на региональном и глобальном уровне космические снимки низкого пространственного разрешения являются актуальным источником информации.

Изучение характеристик сельскохозяйственных посевов по данным ДЗЗ основано на расчетах вегетационных индексов (ВИ), которые являются показателем общего состояния культур, позволяют изучить динамику роста и развития культур, последствия стихийных явлений, оценить ожидаемую урожайность и т. д. Наиболее полно особенности отражения и поглощения солнечного света расте-

ниями характеризуются значениями спектральной яркости в красном (от 0,6 до 0,7 мкм) и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра (от 0,7 до 1,0 мкм).

Ширина полосы съемки – параметр, влияющий на возможность получения одновременно информации на всю территорию исследования. Космические снимки с большей шириной полосы съемки характеризуются более низким пространственным разрешением снимка. Поэтому при выборе исходных данных необходимо найти компромисс между допустимым соотношением параметров пространственного разрешения и требуемой величиной территориального охвата.

Временное разрешение характеризует частоту выполнения повторной съемки одной и той же территории. Для обеспечения регулярного мониторинга посевов достаточной является периодичность съемки раз в два или три дня [35].

1.2 Применение вегетационных индексов для оценки посевов сельскохозяйственных культур

Анализ развития сельскохозяйственных культур по космическим снимкам осуществляется с использованием ВИ, которые являются комплексным показателем, отражающим биомассу, густоту проективного покрытия и состояние посевов. Расчет большинства ВИ основан на том, что в красном диапазоне спектра хлорофиллом растений максимально поглощается электромагнитное излучение, а в ИК-диапазоне спектра клеточные структуры листа максимально отражают падающее электромагнитное излучение. Более густая и здоровая растительность характеризуется большей величиной разности отражения света в красном и ИК-диапазоне спектра, следовательно, большим значением ВИ по сравнению со значением ВИ угнетенной растительности [2, 8, 24, 45, 63, 66, 68, 88].

Существует много разнообразных ВИ, которые учитывают особенности подстилающей поверхности, условия выполнения съемки, влияние атмосферы и т. д. Наиболее часто для анализа растительного покрова и, в частности, посевов применяются следующие: нормализованный разностный ВИ, индекс глобального мо-

ниторинга окружающей среды, усовершенствованный ВИ, почвенный ВИ и прочие [11, 51].

Нормализованный разностный ВИ (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) является наиболее распространенным из представленных ВИ. Расчет NDVI осуществляется в соответствии с формулой

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

где NIR – интенсивность отражения света в ближней ИК-области спектра;

RED – интенсивность отражения света в красной области спектра.

NDVI принимает значения от –1 до 1, при этом для растительного покрова характерны положительные значения ВИ от 0,2 до 0,8. Низкие значения NDVI свидетельствуют о стрессовом состоянии растений, что может быть вызвано заболеваниями растений, недостатком влаги или быть следствием стихийных явлений. Высокие значения NDVI являются показателем здорового развития и активного роста растений.

Индекс глобального мониторинга окружающей среды (Global Environmental Monitoring Index, GEMI) вычисляется следующим образом:

$$\text{GEMI} = E \cdot (1 - 0,25 \cdot E) - \left(\frac{\text{RED} - 0,125}{1 - \text{RED}} \right), \quad (2)$$

где E рассчитывается по формуле

$$E = \left(\frac{2(\text{NIR}^2 - \text{RED}^2) + 1,5 \cdot \text{NIR} + 0,5 \cdot \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + 0,5} \right). \quad (3)$$

Значения GEMI изменяются от 0 до 1. Относится к группе индексов, устойчивых к влиянию атмосферы.

Усовершенствованный ВИ (*Enhanced Vegetation Index, EVI*) вычисляется по формуле

$$EVI = 2 \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 6 \cdot RED - 7,5 \cdot BLUE + 1} \right), \quad (4)$$

где BLUE – интенсивность отражения света в синей области спектра.

Так же как и NDVI, индекс EVI принимает значения от –1 до 1, для растительного покрова характерны диапазоны значений от 0,2 до 0,8.

Почвенный ВИ (Soil Adjusted VI, SAVI) относится к группе индексов, наименее чувствительных к влиянию почвы, и рассчитывается по формуле

$$SAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \right) \cdot (1 + L), \quad (5)$$

где L – корректировочный коэффициент, который принимает значения от 0 до 1.

Величина коэффициента L зависит от густоты растительного покрова: при густой растительности коэффициент L принимает значение 0, для разреженного растительного покрова коэффициент L принимает значение 1, чаще всего на практике применяют значение, равное 0,5. Индекс SAVI принимает значение от –1 до 1. Данный индекс чаще всего используют для исследования поверхности с незначительным растительным покровом.

Также при обработке космических снимков используют *нормализованный дифференциальный индекс снега (Normalized Differencial Snow Index, NDSI)*, который позволяет исключить поверхности, занятые снегом [47]. Рассчитывается индекс NDSI в соответствии с формулой

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}, \quad (6)$$

где GREEN – интенсивность отражения света в зеленой области спектра;

SWIR – интенсивность отражения света в средней ИК-области спектра.

Значение NDSI больше чем 0,4 соответствует снежному покрову.

1.3 Космические аппараты для решения задач сельскохозяйственного назначения

В данном подразделе рассматриваются зарубежные и российские космические аппараты, используемые при мониторинге состояния посевов сельскохозяйственных культур, приведены их основные параметры: характеристики спектральных диапазонов, пространственное разрешение, ширина полосы обзора и период повторной съемки.

Terra и Aqua

Спутники Terra и Aqua входят в группировку спутников ДЗЗ программы Earth Observing System (EOS), курируемой Национальным управлением по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA, США) [92]. Спутниковый компонент данной программы начиная с 1997 г. обеспечивает мониторинг атмосферных процессов, морской поверхности и поверхности суши.

Спутники Terra и Aqua запущены на полярные солнечно-синхронные орбиты высотой 705 км, каждый аппарат обеспечивает повторную съемку одной и той же территории от одного до двух раз в сутки. КА Terra был запущен 18 декабря 1999 г., на борту аппарата установлено 5 сенсоров: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT). С помощью данных инструментов осуществляется изучение различных параметров атмосферы (аэрозоли, температура и влажность, характеристики облачности и т. д.), земной поверхности (характеристики почвенно-растительного покрова, температура, вулканическая активность, пожароопасная и паводковая обстановка и т. д.), поверхности океана (температура поверхности, изучение фитопланктона и прочее), а также проводится исследование ледово-

го и снежного покрова. Спутник Aqua был запущен 4 мая 2002 г., он оснащен шестью сенсорами: Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS), Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A), Humidity Sounder for Brazil (HSB), Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), MODIS и CERES. Информация с данного спутника помогает исследовать параметры атмосферы и улучшить точность прогнозов погоды, осуществлять наблюдения за снежным покровом и морской поверхностью, за изменчивостью состояния окружающей среды в глобальном масштабе и ее влиянием на климат [30, 40, 69, 89, 92].

Для реализации сельскохозяйственного мониторинга особый интерес представляет сенсор MODIS – ключевой инструмент, установленный на обоих аппаратах. Информация, ежедневно получаемая с помощью данного сенсора, применяется для полноценного мониторинга посевов зерновых культур. Ширина полосы захвата на местности составляет 2 300 км, а значение пространственного разрешения варьируется от 250 м до 1 км, спектральные характеристики съемочной аппаратуры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики спектральных каналов сенсора MODIS [91]

Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
1	0,620–0,670	250	19	0,915–0,965	1 000
2	0,841–0,876	250	20	3,660–3,840	1 000
3	0,459–0,479	500	21	3,929–3,989	1 000
4	0,545–0,565	500	22	3,929–3,989	1 000
5	1,230–1,250	500	23	4,020–4,080	1 000
6	1,628–1,652	500	24	4,443–4,498	1 000
7	2,105–2,155	500	25	4,482–4,549	1 000
8	0,405–0,420	1 000	26	1,360–1,390	1 000
9	0,438–0,448	1 000	27	6,535–6,895	1 000
10	0,483–0,493	1 000	28	7,175–7,475	1 000
11	0,526–0,536	1 000	29	8,400–8,700	1 000
12	0,546–0,556	1 000	30	9,580–9,880	1 000
13	0,662–0,672	1 000	31	10,780–11,280	1 000
14	0,673–0,683	1 000	32	11,770–12,270	1 000
15	0,743–0,753	1 000	33	13,185–13,485	1 000
16	0,862–0,877	1 000	34	13,485–13,785	1 000
17	0,890–0,920	1 000	35	13,785–14,085	1 000
18	0,931–0,941	1 000	36	14,085–14,385	1 000

Suomi NPP

Спутниковый мониторинг Земли на глобальном уровне длительный период осуществляется действующей группировкой спутников программы EOS, которые к настоящему времени уже практически отработали свой ресурс и нуждаются в замене. На смену устаревшей программе наблюдений за Землей NASA создает новую программу – Joint Polar Satellite System (JPSS), которая будет представлена группировкой полярно-орбитальных спутников. Ранее программа носила название National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS).

Спутник Suomi NPP, который до января 2012 г. назывался NPOESS Preparatory Project (NPP), был запущен 28 октября 2011 г. американским космическим агентством NASA. Представляет собой спутник метеорологического назначения, выведенный на солнечно-синхронную орбиту высотой 824 км, за сутки совершает 14 оборотов вокруг Земли. Полезная нагрузка состоит из пяти инструментов (рисунк 1): Cross-track Infrared Sounder (CrIS), Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS), Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS), CERES, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). В области применения данных, полученных с КА Suomi NPP, входят краткосрочное прогнозирование погоды, исследование климатических процессов и облачности, сбор данных о состоянии озонового слоя и загрязнении воздуха, наблюдение за поверхностью вод Мирового океана, ледовым и почвенно-растительным покровом, а также мониторинг чрезвычайных ситуаций, природных и техногенных катастроф [94]. Для целей сельскохозяйственного мониторинга наибольший интерес представляют данные, полученные с помощью радиометра VIIRS.

Данные пассивного микроволнового радиометра ATMS применяются при прогнозировании погоды, позволяя создавать глобальные модели температуры и профили влажности (выполняет съемку в 22 спектральных диапазонах).

При краткосрочном и долгосрочном прогнозировании погоды также используются данные интерферометра CrIS. Сбор данных производится в 1 305 спектральных диапазонах, на основании интерпретации которых можно получить информацию о влажности и атмосферном давлении.

Сенсор OMPS предназначен для измерения количества озона в атмосфере и изучения его горизонтального и вертикального распространения.

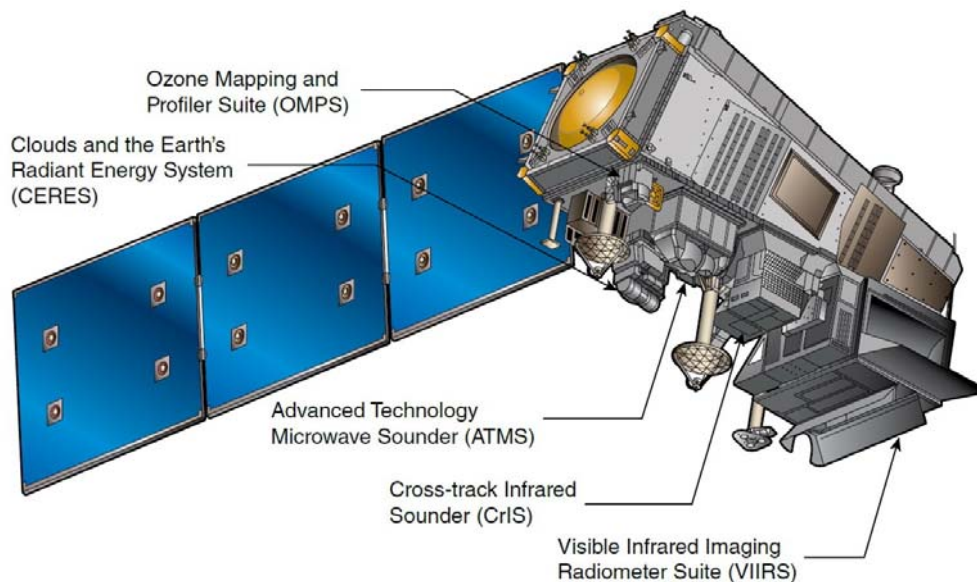


Рисунок 1 – Аппаратура на борту спутника Suomi NPP [94]

Для изучения общего теплового излучения Земли и влияния на него внешних факторов на борту КА Suomi NPP установлен радиометр CERES, выполняющий съемку в трех диапазонах спектра [74].

Радиометр VIIRS является усовершенствованной версией спектрального радиометра MODIS, обеспечивающей преемственность спутниковых данных, а также существенно дополняющей данные прибора Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) и данные спутников метеорологического назначения Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), полученные с помощью радиометра Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Съемка земной поверхности выполняется в 22 спектральных каналах, в диапазоне спектра от 0,45 мкм до 12 мкм, пространственное разрешение составляет 375 м и 750 м при ширине полосы обзора порядка 3 000 км. В таблице 2 [106] представлены спектральные каналы, в которых работает радиометр VIIRS, наибольший интерес для решения вопросов сельскохозяйственной отрасли представляют каналы I1, I2.

Таблица 2 – Спектральные каналы сканирующего радиометра VIIRS [106]

Название канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Название канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
M1	0,402–0,422	750	I3	1,580–1,640	375
M2	0,436–0,454	750	M10	1,580–1,640	750
M3	0,478–0,498	750	M11	2,225–2,275	750
M4	0,545–0,565	750	I4	3,550–3,930	375
I1	0,600–0,680	375	M12	3,660–3,840	750
M5	0,662–0,682	750	M13	3,973–4,128	750
M6	0,739–0,754	750	M14	8,400–8,700	750
I2	0,846–0,885	375	M15	10,263–11,263	750
M7	0,846–0,885	750	I5	10,500–12,400	375
M8	1,230–1,250	750	M16	11,538–12,488	750
M9	1,371–1,386	750	DNB	0,500–0,900	750

В область применения данных VIIRS входит изучение энергетического и водного баланса, исследование почвенно-растительного покрова и криосферы. Полученные данные также можно использовать для изучения параметров льдов, аэрозолей в атмосфере и облачного покрова, измерения температуры поверхности океана и суши, наблюдения за стихийными бедствиями и исследования климатических процессов. Данные сенсора VIIRS также используются при построении глобальных моделей, описывающих океанические процессы и течения, климатические процессы, динамику растительного покрова [20, 94, 106].

Landsat

Спутники серии Landsat, обеспечивающие продолжительные наблюдения за поверхностью Земли, начали свою историю с запуска первого спутника в 1972 г. [90, 104]. Запуск спутников традиционно осуществляется с авиабазы Ванденберг (США). Спутниковая информация, полученная с данных аппаратов, нашла широкое применение в различных областях жизнедеятельности человека: сельское и лесное хозяйство, геология и картография, контроль над чрезвычайными ситуациями и природными бедствиями, оценка состояния окружающей среды, а также решение широкого спектра научно-исследовательских задач. В настоящее время функционирует два КА данной миссии: Landsat-7 и Landsat-8. Аппарат Landsat-5 (запуск состоялся в марте 1984 г.) был выведен из эксплуатации в начале 2013 г.

Спутникам данной серии, начиная с Landsat-4, присущи идентичные характеристики солнечно-синхронной околополярной орбиты с высотой 705 км. Период повторной съемки при ширине полосы обзора 185 км составляет 16 суток. Архивные и оперативные данные, полученные как с КА Landsat, так и с других зарубежных спутников, находятся в свободном доступе на сайте Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS) EarthExplorer [103].

Landsat-7. Запуск спутника Landsat-7 состоялся 15 апреля 1999 г. (расчетный срок работы аппарата составлял 5 лет). Разработка данного аппарата была инициирована такими организациями, как NASA, NOAA и USGS. Съемка осуществлялась с помощью сенсора Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) в восьми спектральных каналах с пространственным разрешением 15, 30 и 60 м (таблица 3). Информация с данного КА поступает и сейчас, однако в мае 2003 г. возникли проблемы с получением полного объема информации. неполадки были вызваны потерей работоспособности прибора Scan Line Corrector (SLC), являющегося составной частью сенсора ETM+, который обеспечивал компенсацию продольного движения спутника [77, 86].

Таблица 3 – Сравнение спектральных характеристик съемочной аппаратуры спутников Landsat-7 и Landsat-8 [85]

Landsat-7 (ETM+)			Landsat-8 (OLI, TIRS)		
номер канала	спектральный диапазон, мкм	пространственное разрешение, м	номер канала	спектральный диапазон, мкм	пространственное разрешение, м
–	–	–	Band 1	0,435–0,451	30
Band 1	0,441–0,514	30	Band 2	0,452–0,512	30
Band 2	0,519–0,601	30	Band 3	0,533–0,590	30
Band 3	0,631–0,692	30	Band 4	0,636–0,673	30
Band 4	0,772–0,898	30	Band 5	0,851–0,879	30
Band 5	1,547–1,749	30	Band 6	1,566–1,651	30
Band 6	10,31–12,36	60	Band 10	10,60–11,19	100
			Band 11	11,50–12,51	100
Band 7	2,064–2,345	30	Band 7	2,107–2,294	30
Band 8	0,515–0,896	15	Band 8	0,503–0,676	15
–	–	–	Band 9	1,363–1,384	30

Landsat-8. В разработке КА Landsat-8 по заказу NASA и USGS принимали участие такие компании, как Orbital Sciences Corporation (OSC) и Ball Aerospace. Спутник был запущен 11 февраля 2013 г., расчетный срок активного функционирования, как и у предыдущего КА данной серии, составляет 5 лет, однако по техническим характеристикам он может проработать порядка 10 лет. На спутнике установлено два типа сенсоров: оптико-электронный Operational Land Imager (OLI) и тепловой Thermal Infrared Sensor (TIRS). Съемка осуществляется в 11 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 15, 30 и 100 м. Спутник Landsat-8 продолжает наблюдения за земной поверхностью с характеристиками, близкими к параметрам предыдущих аппаратов данной миссии (спектральные диапазоны, пространственное разрешение, период повторной съемки и захват на местности, доступность данных и т. д.). В таблице 3 для сравнения представлены характеристики спектральных каналов аппаратов Landsat-7 и Landsat-8 [19, 84, 85, 87].

Sentinel

Обеспечение спутниковыми данными программы глобального мониторинга окружающей среды Copernicus возложено на спутники, участвующие в миссии содействия программы, а также группировку спутников Sentinel, которые изначально создаются для нужд данной программы. Программа Copernicus была создана в 1998 г. под руководством Еврокомиссии в содружестве с Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) и Европейским агентством по окружающей среде (European Environment Agency, EEA). До декабря 2012 г. носила название Global Monitoring for Environment and Security (GMES). Данная программа решает широкий круг задач, которые направлены на обеспечение безопасности и устранение последствий чрезвычайных ситуаций, мониторинг изменения климата и атмосферы, океанов и суши. Программа опирается на использование спутниковых данных, а также информации, полученной с наземных измерительных станций, атмосферных зондов и т. д. [18, 19].

Группировка спутников Sentinel будет предоставлять как оптико-электронные, так и радарные данные. При этом каждая отдельная миссия направ-

лена на решение определенной задачи и состоит из двух аппаратов, что обеспечивает лучшую периодичность и большее покрытие территории спутниковыми данными [78, 79, 82]. Группировка радарных спутников Sentinel-1 отличается всепогодностью получения снимков и имеет широкий спектр применения (мониторинг льдов, нефтяных разливов, картографирование лесов и т. д.). Оптико-электронные спутники серии Sentinel-2 направлены на мониторинг растительности, поверхности суши и моря. Спутники Sentinel-3 предназначены для мониторинга морей и океанов и наблюдений за изменением климата. Планируется, что группировки спутников Sentinel-4 и Sentinel-5 будут решать вопросы мониторинга атмосферы. Спутники серии Sentinel-6 позволят выполнять картографирование рельефа поверхности мирового океана, производить наблюдение за океаническими течениями и аккумулярованием океаном тепла, что дает возможность прогнозировать повышение уровня моря. Для решения задач сельскохозяйственного производства наибольший интерес представляют спутники серии Sentinel-1 и Sentinel-2. Доступ к космическим снимкам серии Sentinel осуществляется посредством сайтов Sentinels Scientific Data Hub и USGS EarthExplorer, платформа приложений Sentinel Application Platform (SNAP) для обработки снимков также находится в свободном доступе [98, 100, 103].

Sentinel-1. Группировка Sentinel-1 состоит из двух радарных спутников с полярными солнечно-синхронными орбитами высотой 693 км и запланированным сроком эксплуатации 7 лет. Разработкой спутников серии Sentinel-1 занимались компании Thales Alenia Space Italy, Astrium Germany и Astrium UK. Первый спутник Sentinel-1A вывели на орбиту 3 апреля 2014 г., второй спутник Sentinel-1B был запущен 25 апреля 2016 г. Периодичность повторной съемки составляет от одного до трех дней. Съемка производится в C-диапазоне с помощью радара с синтезированной апертурой Synthetic Aperture Radar (SAR) и не зависит от времени суток и облачности. Съёмочная аппаратура поддерживает четыре режима работы: два основных – Interferometric Wide Swath (IW) и Wave (WV), два дополнительных – Stripmap (SM) и Extra Wide Swath (EW) (таблица 4). В область приме-

нения радарных данных входит мониторинг арктических морей и разливов нефти, картографирование льдов, внутренних водных объектов и лесов, изучение подвижек земной поверхности, обеспечение безопасности и т. д.

Таблица 4 – Технические характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-1

Режим работы	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км	Направление поляризации
Wave (WV)	5 × 5	20 × 20	VV, HH
Interferometric Wide Swath (IW)	5 × 20	250	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Extra Wide Swath (EW)	20 × 40	400	
Stripmap (SM)	5 × 5	80	

Sentinel-2. Группировка из двух оптических спутников Sentinel-2 должна обеспечивать мониторинг земной поверхности с характеристиками, близкими к параметрам КА SPOT и Landsat с заложенным сроком функционирования 7 лет. Разработчиком данных спутников является компания EADS Astrium Satellites. Первый спутник этой серии Sentinel-2A был выведен на орбиту 23 июня 2015 г. При высоте орбиты порядка 786 км охват на местности составляет 290 км, а при запуске обоих спутников период повторной съемки в зависимости от широты будет варьироваться от пяти до двух-трех дней. Солнечно-синхронная орбита спутника обеспечивает равномерное освещение поверхности по всей трассе съемки. На спутнике установлен оптико-электронный мультиспектральный сенсор Multi Spectral Instrument (MSI), спектральные характеристики которого представлены в таблице 5. Съемка выполняется с пространственным разрешением 10, 20 и 60 м, в 13 спектральных каналах, в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (VNIR), а также в коротковолновой инфракрасной области (SWIR). Получаемая с данного спутника информация может использоваться при мониторинге растительности и водных объектов, стихийных бедствий и наводнений, изучении активности вулканов.

Таблица 5 – Спектральные каналы съемочной аппаратуры Sentinel-2

Спектральный канал	Спектральный диапазон длин волн, мкм	Пространственное разрешение, м
B1	0,433–0,453	60
B2	0,458–0,522	10
B3	0,543–0,577	10
B4	0,650–0,680	10
B5	0,698–0,712	20
B6	0,733–0,747	20
B7	0,773–0,793	20
B8	0,784–0,899	10
B8a	0,855–0,875	20
B9	0,935–0,955	60
B10	1,360–1,390	60
B11	1,565–1,655	20
B12	2,100–2,280	20

На рисунке 2 для сравнения представлены спектральные диапазоны длин волн съемочной аппаратуры спутников Sentinel-2, Landsat-7 и Landsat-8.

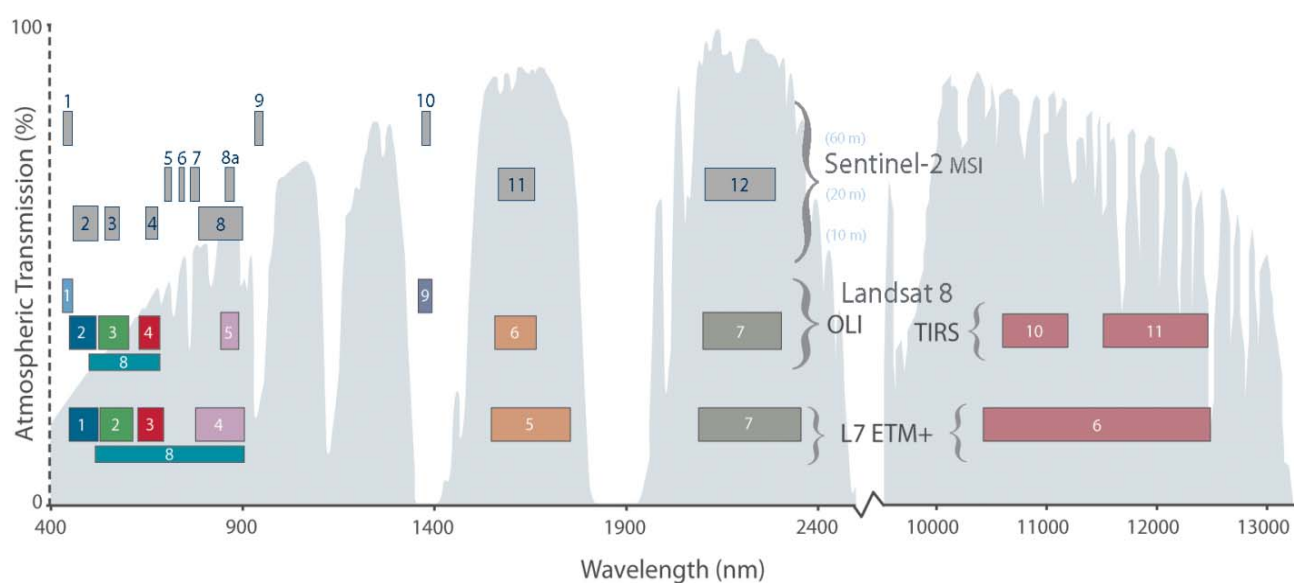


Рисунок 2 – Сравнение спектральных характеристик КА Landsat-7 и Landsat-8 с КА Sentinel-2 [97]

SPOT

Оптические спутники высокого разрешения серии SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre) являются результатом работы Национального центра космических исследований Франции (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES), созданы при поддержке Бельгии (Belgian scientific, technical and cultural services, SSTC) и Швеции (Swedish National Space Board, SNSB). С момента запуска первого спутника этой серии в 1986 г. проект обеспечивает продолжительные наблюдения за поверхностью Земли. Космические снимки находят применение при решении картографических задач, создании и обновлении ЦМР, обеспечении экологического мониторинга территории, а также мониторинга растительного покрова и окружающей среды, проведении инвентаризации лесных массивов и т. д. С первого КА SPOT 1 и до аппарата SPOT 5 спутники имели подобные характеристики орбиты (высота солнечно-синхронной орбиты 832 км) и схожие характеристики спектральных диапазонов длин волн. Аппарат SPOT 5 был запущен на орбиту 3 мая 2002 г. и завершил свое функционирование 31 марта 2015 г., проработав 13 лет. На борту аппарата были установлены две камеры высокого разрешения High Resolution Geometric (HRG), высокоточный стереоскопический детектор High Resolution Stereoscopic (HRS), с помощью которого можно было получать стереоизображение с одного витка (размер сцены составлял 600×120 км²). Помимо этого на борту аппарата был установлен сенсор VEGETATION 2, выполнявший съемку в четырех спектральных диапазонах длин волн с пространственным разрешением, равным 1 км, и шириной полосы обзора 2 250 км. Характеристики съемочной аппаратуры спутника SPOT 5 приведены в таблице 6 [75, 99].

В настоящее время действующими аппаратами данной миссии являются SPOT 6 (запуск состоялся 9 сентября 2012 г.) и SPOT 7 (выведен на орбиту 30 июня 2014 г.). Космическим оператором спутников на данный момент является подразделение Airbus Defence and Space крупной европейской компании Airbus Group. Спутники обладают идентичными между собой характеристиками съемочной аппаратуры и орбит (высота солнечно-синхронных орбит составляет 655 км).

Неизменным для всех КА этой миссии является размер сцены, который составляет 60×60 км². Аппарат оснащен двумя сенсорами высокого разрешения New AstroSat Optical Modular Instrument (NAOMI). Характеристики съемочной аппаратуры SPOT 6 и SPOT 7 приведены в таблице 7 [19, 40, 75, 99].

Таблица 6 – Спектральные диапазоны длин волн сенсоров КА SPOT 5

Спектральный канал	Спектральный диапазон длин волн, мкм	Пространственное разрешение, м
High Resolution Stereoscopic		
Panchromatic	0,48–0,71	5 (2,5)
B1	0,50–0,59	10
B 2	0,61–0,68	10
B 3	0,78–0,89	10
B 4	1,58–1,75	20
High Resolution Stereoscopic		
P	0,49–0,69	10 (5)
VEGETATION 2		
B 0	0,45–0,52	1 000
B 2	0,61–0,68	1 000
B 3	0,78–0,89	1 000
B 4	1,58–1,75	1 000

Таблица 7 – Спектральные диапазоны длин волн КА SPOT 6 и SPOT 7

Спектральный канал	Спектральный диапазон длин волн, мкм	Пространственное разрешение, м
Panchromatic	0,45–0,745	1,5
B1	0,45–0,525	6
B 2	0,53–0,59	6
B 3	0,625–0,695	6
B 4	0,76–0,89	6

«Канопус-В»

На сегодняшний день в состав современной российской группировки спутников дистанционного зондирования входят КА природно-ресурсного и гидрометеорологического назначения: «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М» и «Электро-Л» [17, 52]. Материалы спутниковой съемки находят применение в различных областях: картография и строительство, геология и гидрология, мониторинг опас-

ных природных и техногенных явлений, лесное и сельское хозяйство, охрана окружающей среды и экологический мониторинг, метеорология и т. д.

Серия спутников «Канопус-В», разработанная АО «Корпорация «ВНИИЭМ», в настоящий момент представлена четырьмя аппаратами: «Канопус-В» № 1, № 3, № 4 и «Канопус-В-ИК». КА «Канопус-В» № 1 был выведен на орбиту 22 июля 2012 г., запуск аппаратов «Канопус-В» № 3 и № 4 был осуществлен 1 февраля 2018 г. Данная серия спутников выполняет съемку поверхности Земли в панхроматическом и мультиспектральном режиме, обеспечивая оперативной информацией различные ведомства РФ: Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Министерство природных ресурсов и экологии, Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и т. д. Информация, получаемая с помощью данных спутников, может использоваться в первую очередь при мониторинге чрезвычайных ситуаций (как природного, так и техногенного характера), сельскохозяйственном и экологическом мониторинге, землепользовании и картографировании [19, 52, 59].

Ширина полосы обзора составляет 920 км при высоте солнечно-синхронной орбиты, равной 510 км. На борту КА «Канопус-В» установлено два типа сенсоров: панхроматическая съемочная система (ПСС) и многозональная съемочная система (МСС). Периодичность повторной съемки территории составляет 5 суток, основные характеристики целевой аппаратуры приведены в таблице 8 [52].

Таблица 8 – Характеристики съемочной аппаратуры КА «Канопус-В»

Спектральный канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
ПСС			
Панхроматический	0,54–0,86	2,5	23
МСС			
Синий	0,46–0,52	12,0	20
Зеленый	0,51–0,60		
Красный	0,63–0,69		
Ближний инфракрасный	0,75–0,84		

«Ресурс-П»

Разработчиком серии КА природно-ресурсного назначения «Ресурс-П» является АО «РКЦ «Прогресс», всего было запущено три аппарата данной серии. КА «Ресурс-П» № 1 был выведен на орбиту 25 июня 2013 г., «Ресурс-П» № 2 – 26 декабря 2014 г., «Ресурс-П» № 3 – 13 марта 2016 г. В настоящее время функционируют два аппарата этой серии – «Ресурс-П» № 1 и «Ресурс-П» № 2. Информация, полученная с помощью данных аппаратов, находит применение в различных областях: исследование природных ресурсов, оценка состояния окружающей среды, картография, мониторинг чрезвычайных ситуаций, оценка состояния водных и растительных объектов, строительство сооружений и дорожных сетей и т. д. [17, 52].

Спутники выведены на круговые солнечно-синхронные орбиты с высотой 475 км, период повторной съемки составляет трое суток. Съемка земной поверхности осуществляется в четырех режимах: объектовый, маршрутный, стереосъемка маршрутов и площадной режим. Спутники оснащены оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения «Геотон-Л1» (ОЭА «Геотон-Л1»), широкозахватной мультиспектральной аппаратурой высокого и среднего разрешения (ШМСА-ВР и ШМСА-СР) и гиперспектральной аппаратурой (ГСА). Основные характеристики целевой аппаратуры КА «Ресурс-П» представлены в таблицах 9–11 [17, 18, 52].

Таблица 9 – Характеристики съемочной аппаратуры ОЭА «Геотон-Л1»

Спектральный канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
Панхроматический	0,58–0,80	1	38
1	0,45–0,52	3	
2	0,52–0,60		
3	0,61–0,68		
4	0,67–0,70		
5	0,70–0,73		
6	0,72–0,80		
7	0,80–0,90		

Таблица 10 – Характеристики съемочной аппаратуры ШМСА-ВР и ШМСА-СР

Спектральный канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
ШМСА-ВР			
Панхроматический	0,43–0,90	12	97
1	0,43–0,51	24	
2	0,51–0,58		
3	0,60–0,70		
4	0,70–0,90		
5	0,80–0,90		
ШМСА-СР			
Панхроматический	0,43–0,70	60	441
1	0,43–0,51	120	
2	0,51–0,58		
3	0,60–0,70		
4	0,70–0,90		
5	0,80–0,90		

Таблица 11 – Характеристики съемочной аппаратуры ГСА

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон, мкм	0,40–1,10
Число каналов	96
Пространственное разрешение, м	30
Ширина полосы съемки, км	25
Спектральное разрешение, нм	5–10

«Метеор-М»

Разработчиком серии спутников гидрометеорологического и океанографического назначения «Метеор-М» является АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Первый КА данной серии «Метеор-М» № 1 был выведен на орбиту 17 сентября 2009 г., завершив оперативное использование к 1 октября 2014 г. Второй аппарат данной серии, находящийся в настоящий момент в оперативной эксплуатации, «Метеор-М» № 2 был запущен 8 июля 2014 г. на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 832 км. Спутниковая информация обеспечивает проведение глобальных наблюдений за состоянием атмосферы и подстилающей поверхности, мониторинг опасных явлений природного и техногенного характера, оценку ледового и снежного покровов, а также ряд других задач. Помимо получения изображений подстилающей поверхности, спутник осуществляет прием и передачу данных от раз-

личных типов платформ сбора данных. В составе целевой аппаратуры, установленной на борту данного спутника, присутствуют комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) и многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР). КМСС включает в себя два многозональных съемочных устройства – МСУ-50 и МСУ-100. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры приведены в таблицах 12, 13 [17, 52, 59].

Таблица 12 – Характеристики съемочной аппаратуры КМСС

Режим съемки	МСУ-50	МСУ-100
Спектральный диапазон длин волн, мкм	0,37–0,45	0,535–0,575
	0,45–0,51	0,63–0,68
	0,58–0,69	0,76–0,90
Пространственное разрешение, м	120	60
Ширина полосы съемки, км	900	

Таблица 13 – Характеристики съемочной аппаратуры МСУ-МР

Спектральный канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
1	0,5–0,7	1 000	2 850
2	0,7–1,1		
3	1,6–1,8		
4	3,5–4,1		
5	10,5–11,1		
6	11,5–12,5		

1.4 Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для обеспечения потребностей сельскохозяйственного производства

В отрасли сельского хозяйства, наряду с использованием материалов спутниковой съемки, широкое применение находит активно развивающееся в последнее время направление съемки территории с помощью БПЛА [46, 102]. Использование данного вида съемки в силу оперативности и детальности получаемой информации позволяет в кратчайшие сроки принимать решения о проведении необходимых агротехнических мероприятий, обеспечивая тем самым потребности

точного земледелия. Съёмка сельхозугодий отдельного фермерского хозяйства или ряда хозяйств с помощью БПЛА позволяет выполнять работы высокой детальности, а при отсутствии возможности получения материалов спутниковой съёмки может являться единственным источником информации.

В результате обработки материалов съёмки, выполненной с помощью БПЛА, формируются следующие виды информационной продукции: карта полей фермерского хозяйства, карта температур почвы, цифровая модель рельефа, индексные карты, карты-задания для дифференцированного внесения удобрений на полях и пр. Данные материалы позволяют выполнять мониторинг развития культур, подготовить рекомендации по применению удобрений и средств защиты от вредителей в соответствии с фактическим состоянием посевов и т. д. Для конечного пользователя интерес также представляют непосредственно сами снимки, которые помогают визуализировать проблемные участки полей, оценить густоту и однородность посевов. Некоторые типы БПЛА среди прочего могут использоваться в качестве средства распыления удобрений при точечной обработке полей. В начале посевных работ большую актуальность приобретает тепловизионная съёмка для определения температуры почвы, с помощью которой можно оптимизировать сроки проведения посевных работ.

Аэрофотосъёмка применяется для подготовки карт и планов, которые позволяют решать следующие задачи: определение границ поля; инвентаризация земель; выявление брошенных земель, подверженных зарастанию древесно-кустарниковой растительностью; контроль использования земель согласно их назначению; подготовка планово-картографической основы для обеспечения землеустроительного проектирования и т. д.

Помимо формирования карт и планов, по материалам съёмки создаются ЦМР, карты поперечных профилей и абсолютных высот местности (рисунок 3), карты крутизны и экспозиции склонов и пр. С помощью данных продуктов можно выполнять планирование агротехнических работ, выявлять участки потенциального переувлажнения посевов на основании информации о рельефе местности,

разрабатывать противоэрозионные мероприятия, выполнять оценку соответствия типа возделывания культур исследуемому участку.

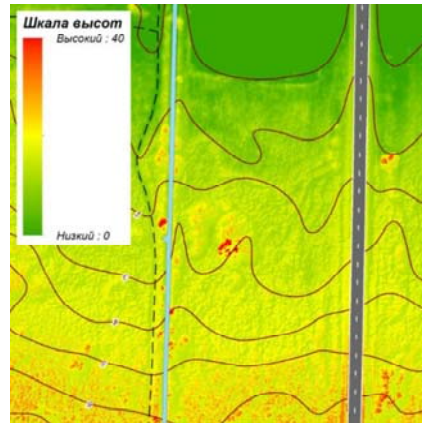


Рисунок 3 – Фрагмент карты высот местности [46]

С помощью БПЛА осуществляется как панхроматическая, так и мультиспектральная съемка. Мультиспектральная съемочная аппаратура позволяет выполнять съемку в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра. В среднем число спектральных каналов, на основании которых рассчитываются индексные изображения, варьируется от 4 до 12. Камера Sequoia (рисунок 4) разработана для целей сельскохозяйственного производства французской компанией Parrot, производящей БПЛА [95]. Съемочная аппаратура включает камеру для цветной фотосъемки территории и мультиспектральную камеру, производящую съемку в четырех спектральных диапазонах (таблица 14). Величина пространственного разрешения и охвата территории зависит от заданной высоты полета.



Рисунок 4 – Внешний вид мультиспектральной камеры Sequoia [95]

Таблица 14 – Характеристики камеры Sequoia

Название канала	Спектральный диапазон длин волн, мкм	Высота полета, м	
		120	2 000
		Площадь покрытия территории, га	
		200	3 000
Пространственное разрешение, см			
Green	0,53–0,57	12	200
Red	0,64–0,68		
Red Edge	0,73–0,74		
NIR	0,77–0,81		
RGB	0,55–0,79	3,1	55

Съемочная аппаратура ADC-micro американской компании Tetracam выполняет съемку в трех спектральных каналах (красный, зеленый и ближний ИК-диапазон спектра), а мультиспектральная камера Mini-MCA, в зависимости от комплектации, позволяет получать изображение в 4, 6 или 12 спектральных диапазонах, при этом пользователь может самостоятельно выбирать и менять необходимые фильтры [107]. Настраиваемая полоса пропускания каждого спектрального диапазона может варьироваться от 10 до 40 нм, обеспечивая решение разносторонних задач. В таблице 15 приведены средние значения длины волны для стандартных фильтров камеры Mini-MCA 12.

Таблица 15 – Характеристика камеры Mini-MCA 12

Номер канала	Среднее значение диапазона длин волн, мкм	Номер канала	Среднее значение диапазона длин волн, мкм	Высота съемки, м	Пространственное разрешение, см
1	0,49	7	0,70	122	6,6
2	0,52	8	0,72		
3	0,55	9	0,80	366	19,8
4	0,57	10	0,84		
5	0,67	11	0,90	915	49,6
6	0,68	12	0,95		

1.5 Методики применения данных дистанционного зондирования для целей сельского хозяйства

1.5.1 Идентификация сельскохозяйственных культур по космическим снимкам

Существует ряд работ, посвященных вопросам распознавания культур по космическим снимкам высокого [42], среднего [25, 67] и низкого пространственного разрешения [73]. Общим для работ [25, 42, 67] служит создание обучающих выборок с делением каждого класса культуры на подклассы, а также использование классификации по правилу максимального правдоподобия как одного из наиболее универсальных классических методов управляемой классификации [70].

В работе [42] авторами были исследованы возможности применения данных сверхвысокого разрешения спутниковой группировки RapidEye для распознавания двух культур (пшеница и подсолнечник) на территории сухостепной зоны Алтайского края. Исследования проводились на территории Кулундинского района в хозяйстве ОАО «Курское», при этом, помимо спутниковых данных, использовались данные о структуре посевных площадей и статистические данные сельскохозяйственного предприятия. Площади посевов пшеницы, полученные из классификации и из статистических данных, имеют коэффициент корреляции порядка 0,99. В целом, авторами сделан вывод о перспективности применения данных RapidEye при выполнении мониторинга посевов сельскохозяйственных культур на локальном уровне.

В работах [25, 67] описано, что распознавание культур осуществляется по спутниковым данным с КА Landsat-5 и Landsat-8 соответственно. Проведено сравнение результатов классификаций, выполненных по исходному снимку, а также на основе использования преобразованных изображений: методом главных компонент, методом Tasseled Cap, различных индексных изображений, основанных на алгебраических преобразованиях спектральных каналов. В обеих работах

для улучшения качества классификации использовалась маска в виде векторного слоя полей.

В работе [67] изучались характеристики пяти сельскохозяйственных культур: пшеница озимая, ячмень яровой, подсолнечник, кукуруза и многолетние травы. Это наиболее типичные сельскохозяйственные культуры для территории Иваньковского района Белгородской области. Кроме исходного снимка при классифицировании использовалось порядка 13 преобразованных изображений. Первоочередной задачей являлось изучение спектральных отражательных свойств исследуемых культур на снимке, а также проведение наземных полевых обследований, которые позволили оценить реальное состояние каждой культуры. Было установлено, что одни и те же культуры находятся на разных стадиях развития, а также имеют различное проективное покрытие, следовательно, различаются и их отражательные свойства. Исходя из этого обосновывалось количество эталонов для выполнения классификации и для каждой культуры создавались спектральные эталоны, соответствующие каждой категории их состояния. После создания обучающих выборок по каждому изображению выполнялась классификация с последующей оценкой точности. Суммарная достоверность определения культур по анализируемым изображениям составила порядка от 36 до 57 %, а наибольшая достоверность распознавания отдельных категорий культур составила порядка от 87 до 100 %. Автором данного эксперимента были сделаны выводы о наибольшей достоверности распознавания культур при использовании первых трех главных компонент, а также трех компонент Tasseled Cap.

Объектом исследования белорусских ученых [25] послужили сельскохозяйственные территории Смолевичского района Минской области, на которых определялись следующие культуры: пшеница яровая, ячмень, овес, гречиха, кукуруза, многолетние травы и зернобобовые, озимые пшеница, рожь, тритикале и рапс. Источником информации о расположении культур послужили книги истории полей, на основе которых были заданы обучающие выборки. Классификации подвергались: исходные снимки (полученные в мае, июле и августе), снимки с рас-

считанным вегетационным индексом (NDVI), изображения, преобразованные по методу главных компонент и Tasseled Cap. Как и в работе, рассчитывалась достоверность дешифрирования, как по отдельным культурам, так и суммарная достоверность по всему снимку. Наименьшая достоверность дешифрирования соответствует изображению с рассчитанным вегетационным индексом и составляет около 35 % или 65 % в зависимости от даты съемки. По остальным изображениям суммарная достоверность дешифрирования составила 75 % (снимок за август) и 90 % (майский и июльский снимки).

Использование векторного слоя полей в качестве маски при классификации позволило повысить точность распознавания культур, однако создание корректных обучающих выборок возможно только при наличии априорной информации о расположении культур на полях.

В работе [73] отмечено, что при классификации сельскохозяйственных культур сотрудниками Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) использовались четырехдневные композиты, созданные на основе данных радиометра MODIS (продукт MOD09). Для исследования был выбран участок сельскохозяйственных земель общей площадью порядка 130 тыс. га, расположенный в Ленинск-Кузнецком районе Кемеровской области. Данные наземных полевых обследований для создания обучающих выборок были предоставлены сотрудниками Центра агрохимической службы «Кемеровский». Выполнен анализ эффективности использования для распознавания культур как значений перпендикулярного вегетационного индекса (Perpendicular Vegetation Index, PVI), так и значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красном и ИК-диапазонах спектра. Достоверность идентификации сельскохозяйственных культур на основе использования значений индекса PVI в среднем составила 94,4 %, а использование рядов данных КСЯ позволило достичь достоверности 91,2 %. Помимо этого проводились исследования, позволяющие определить зависимость достоверности классификации от величины интервала между наблюдениями (4, 8 и 12 дней). Также определялись наиболее ранние сроки, при которых уже возможно получение досто-

верной идентификации культур. Наиболее достоверные результаты идентификации достигаются при использовании четырехдневных композитов, а достаточная точность обеспечивается к концу июля.

Более основательный и трудоемкий подход к распознаванию используемых пахотных земель, основанный на анализе сезонной и межгодовой динамики изменения характеристик пахотных территорий, описан в статье [47]. При этом стоит учесть, что чем протяженнее и обширнее исследуемая территория, тем хуже работают стандартные методы классификации. Разработанный в ИКИ РАН локально-адаптивный алгоритм глобального картографирования (Locally-Adaptive Global Mapping Algorithm, LAGMA [7, 69]) и одноименный программный комплекс LAGMA позволили получить карты пахотных земель, а также карты растительного покрова для территории России. Для картографирования пахотных земель были проанализированы данные радиометра MODIS (продукт MOD09) за период с 2000 по 2010 г. Была выполнена предварительная обработка, которая включала в себя отбор пригодных данных по пороговым значениям углов освещения и наблюдения, получение масок облачного и снежного покрова [21], а также выделение затененных облачностью участков территории, статистическая фильтрация временных рядов данных, и, на завершающем этапе, – получение еженедельных композитных изображений. На основе рассчитанного индекса PVI были сгенерированы признаки распознавания пахотных земель (рисунок 5), которые могут быть пригодны как для использования на всей исследуемой территории (основная группа признаков), так и для отдельных локальных участков территории (вспомогательная группа признаков). По каждому признаку была выполнена отдельная классификация с последующим объединением полученных результатов и исключением не относящихся к землям сельскохозяйственного назначения участков.



Рисунок 5 – Признаки распознавания пахотных земель с использованием алгоритма локально-адаптивной классификации

Полученные карты отражают пахотные территории за соответствующий исходным данным временной период, при этом есть возможность выполнять их ежегодное обновление и отслеживать происходящие изменения. По полученным данным были рассчитаны площади пахотных земель и проведено их сравнение с официальными данными, полученными из Министерства сельского хозяйства РФ. Также было выполнено сравнение полученных контуров пахотных земель с векторными границами полей, оцифрованными по спутниковым данным высокого пространственного разрешения (от 5 до 10 м). Количественная оценка, характеризующая точность выделения пахотных территорий, осуществлялась с применением оптимума Парето и также подтвердила высокую эффективность разработанного метода.

1.5.2 Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе использования данных дистанционного зондирования Земли

Прогнозированием урожайности сельскохозяйственных культур на основе использования данных ДЗЗ занимаются ученые разных стран. Например,

в Украине много работ [41, 50, 63] посвящено данному вопросу. Авторами работ рассматриваются вопросы оценки состояния растительности и прогнозирования урожайности озимых культур, в частности, озимой пшеницы. В статье [41] описан расчет прогноза урожайности озимой пшеницы, который осуществлялся с помощью линейной регрессионной модели на основе использования усовершенствованного вегетационного индекса (EVI). По результатам сравнения со статистическими данными об урожайности точность прогнозирования для разных областей составила от 83 до 87 %. Также в рамках данной работы полученные значения сравнивались с результатами прогнозирования, выполненного с помощью системы Crop Growth Monitoring System (CGMS). Величина отклонения составила около 8 %. Помимо этого в работе представлены результаты оценки площадей полей, занимаемых озимыми культурами, на основе анализа временного ряда индекса EVI. Величина отклонения полученных результатов от данных официальной статистики составила 9 %.

В качестве модели для расчета урожайности озимой пшеницы в работе [50] рассматривается регрессионная модель, входными параметрами которой служат 16-дневные композиты индекса NDVI (в период с максимальным значением NDVI). Объект исследования – сельскохозяйственные территории 27 районов Винницкой области, для каждого из которых были построены свои регрессионные модели. Алгоритм обработки спутниковых данных включал использование масок, соответствующих посевам основных групп культур (озимые, яровые и поздние яровые), которые определялись автоматически методом кластеризации временных рядов вегетационного индекса. Оценка построения масок посевных площадей, занимаемых яровыми культурами, проводилась с помощью сравнения со статистическими данными о посевных площадях, точность определения площадей составила 90 %. Величина средней относительной ошибки прогнозирования урожайности по районам Винницкой области составила 13,8 % (получена путем усреднения прогнозных значений по отдельным районам). При прогнозировании урожайности на основе данных в целом по области величина средней относительной ошибки составила 1,9 %. Полученные результаты могут свидетельствовать о неточных

статистических данных, предоставляемых по отдельным районам, ошибки в которых минимизируются при усреднении данных по всей области.

В статье [63] был произведен расчет урожайности озимой пшеницы по трем моделям и выполнена оценка эффективности прогнозирования. При расчетах использовалась линейная регрессионная модель (основанная на рассчитанных по спутниковым данным индексам NDVI), нелинейная регрессионная модель (основанная на метеорологических данных) и система CGMS, в основе которой лежит использование модели роста растительности World Food Studies (WOFOST) и метеорологических данных. Наилучшие результаты по точности рассчитанного прогноза обеспечивает система CGMS. К недостаткам данного подхода относится сложность настройки модели из-за большого объема входных данных, а также требования к заблаговременности результатов. Обе регрессионные модели показали примерно одинаковые результаты по точности, что с учетом получения прогнозов урожайности за два-три месяца до уборки урожая позволяет использовать их на практике. Величина среднеквадратического отклонения (СКО) для системы CGMS составила порядка 3 ц/га, остальные модели позволяют получать результаты с СКО порядка 8 ц/га. В линейной регрессионной модели рассматривались 16-дневные композиты индекса NDVI, рассчитанные по данным радиометра MODIS. В нелинейной регрессионной модели в качестве входных данных использовались ежемесячные метеорологические параметры: максимальная, минимальная и средняя температуры воздуха, совокупный уровень осадков, запас продуктивной влаги в слое от 0 до 20 см за периоды с сентября по октябрь и с апреля по июнь.

Большая роль в информационном обеспечении сельскохозяйственной отрасли России принадлежит Гидрометцентру России. В структуре Росгидромета с конца 80-х по начало 90-х гг. при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур основным источником информации в прогностических моделях служили данные агрометеорологических наблюдений, поступающие со станций. Ввиду сокращения числа гидрометеостанций, наблюдаемого в последние годы,

специалисты отдела агрометеорологических прогнозов рассматривали новые способы получения информации. Для решения задач прогнозирования урожайности и выполнения оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур было принято решение об использовании дистанционных способов получения информации на основе применения спутниковых данных. Объектом исследования служили центральные земледельческие области Центрального федерального округа (ЦФО) (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области [45]) и территории Приволжского федерального округа (ПФО) (Самарская, Саратовская, Оренбургская, Пензенская, Ульяновская области, Республики Татарстан и Мордовия [8]). Для прогнозирования урожайности используются регрессионные физико-статистические и динамико-статистические модели. Целью данных исследований являлась разработка, на основе комплексного использования метеорологических параметров и значений индекса NDVI (рассчитанных по спутниковым данным), новых регрессионных нелинейных моделей, которые можно использовать при прогнозировании средней по областям урожайности сельскохозяйственных культур, а именно зерновых и зернобобовых.

При обработке спутниковых данных за период с 2003 по 2013 г. (доступ к данным осуществлялся посредством сервиса ВЕГА-PRO) для решения поставленной задачи на этапе подготовительных работ анализировалось изменение значений NDVI зерновых и зернобобовых культур по каждой области и средняя многолетняя динамика NDVI в весенне-летний период. Последующие исследования были направлены на сравнение динамики NDVI с динамикой биомассы озимой пшеницы, с целью выявления их реакции на изменение состояния посевов в экстремальных условиях (засуха). Последний показатель рассчитывался исходя из полевых обследований, как произведение общего количества стеблей, занимающих площадь в 1 м^2 , на высоту стеблей. Проведенное сравнение показало, что из этих двух показателей индекс NDVI является лучшим индикатором изменения состояния посевов сельскохозяйственных культур.

Следующий этап работ был направлен на анализ статистических значений урожайности исследуемых культур за период с 1993 по 2013 г. Несмотря на перепады значений урожайности, наблюдаемые из года в год, в целом для большинства областей в исследуемом периоде наблюдается положительная динамика. Однако, для ряда исследуемых областей, таких как Самарская, Саратовская и Оренбургская области, характерна отрицательная динамика урожайности. Исходя из анализа изменения соответствующих агрометеорологических условий было выявлено, что положительная динамика роста урожайности в большей степени связана с улучшением культуры земледелия. Отрицательная динамика связана с недостаточным увлажнением, в ряде областей доходившим до сильной засухи.

На завершающих этапах на основе применения двух методов анализа (корреляционного и графического) исследовалась связь урожайности зерновых и зернобобовых культур с 18 факторами (метеорологическими показателями и значениями NDVI) по декадам и месяцам в весенне-летний период вегетации. Исходя из анализа коэффициентов корреляции между средней урожайностью по областям и подекадными значениями NDVI, выявлены периоды с наиболее тесной связью этих показателей. На основе комплексного использования наземных и спутниковых данных для расчета значений урожайности были разработаны две прогностические модели, позволяющие получать результаты в мае (имеет важное стратегическое значение) и июне. При этом для каждой области рассчитаны свои коэффициенты, используемые в регрессионных моделях. Для выполнения оценки проделанной работы были посчитаны средние ошибки прогнозов для территории ЦФО, которые варьировались в пределах от 8 до 19 % в майских прогнозах и от 6 до 15 % в июньских прогнозах урожайности зерновых и зернобобовых культур [45]. Средняя ошибка прогнозов урожайности озимой пшеницы на территории ПФО [8] колеблется в апреле от 17 до 30 %, ошибки майских прогнозов – от 13 до 16,5 %, июньские прогнозы показали худший результат – от 23 до 37 %.

Также задачами информационного обеспечения нужд сельскохозяйственного производства занимается ФГБУ «ВНИИСХМ», которое использует данные ра-

диометра MODIS (сервис BEGA-PRO) для целей оперативной оценки состояния посевов и расчета продуктивности зерновых культур [24, 27]. Разработано два основных направления применения спутниковых данных:

- оценка урожайности зерновых культур с помощью физико-математических моделей (путем совместного использования спутниковых и агрометеорологических данных);
- расчет газообмена с помощью динамических моделей при оперативном прогнозировании урожайности.

Для разработки собственного динамико-статистического метода прогнозирования урожайности зерновых культур, в частности кукурузы, специалистами ФГБУ «ВНИИСХМ» было изучено порядка двадцати динамических имитационных моделей (как отечественных, так и зарубежных) [27]. Каждая из рассмотренных моделей имеет свои достоинства и особенности, но в чистом виде не может быть применена для решения задачи прогнозирования урожайности кукурузы на территории России без внесения коррективов. Однако идеи, заложенные в них, имеют большой потенциал, и часть из рассмотренных моделей была использована в качестве базовой основы при реализации собственной динамической модели. Динамическая модель была создана в двух вариациях, одна из которых опиралась на использование лишь метеорологической информации, а другая в своих расчетах учитывала спутниковую информацию. Основными метеорологическими показателями в данном случае служат средняя подекадная температура воздуха и количество осадков за декаду, а под спутниковой информацией подразумевается использование значений NDVI. Ввиду отсутствия данных о влажности почвы и дефиците влажности воздуха (из-за сокращения числа полевых наблюдений) в модели учитывалась подекадная сумма осадков (за текущий период) и увлажнение за предшествующий период. Зона исследования распространялась на наиболее значимые (по объемам производства кукурузы) сельскохозяйственные территории – субъекты Северо-Кавказского и Южного федеральных округов. По информации за период с 2002 по 2010 г. была проведена авторская проверка работоспо-

собности динамической модели. Метод прогнозирования урожайности кукурузы, основанный на использовании лишь метеорологической информации, показал значение средней ошибки прогноза, равное 15 % (на основе сравнения с фактическими показателями урожайности). Другой метод (учитывающий дополнительно значения NDVI) показал лучшую эффективность – значение средней ошибки прогноза составило порядка 6 %.

Также в ФГБУ «ВНИИСХМ» на основе комплексного использования спутниковых и агрометеорологических данных разработана технология, позволяющая проводить ежедекадную оценку урожайности зерновых культур с помощью регрессионных моделей. Урожайность считается для сельхозугодий трех управлений Росгидромета: Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного. Кроме значений NDVI рассматриваются следующие параметры: подекадная сумма осадков, средняя декадная температура воздуха, подекадный средний дефицит влажности воздуха, гидротермический коэффициент. На основании зависимостей некоторых агрометеорологических параметров, значений NDVI и урожайности зерновых культур были разработаны регрессионные модели, позволяющие подекадно осуществлять расчет урожайности зерновых культур. При сравнении расчетной и фактической урожайности по областям величина относительной ошибки составила от 10 до 15 %. Помимо прогноза урожайности создаются карты оценки состояния посевов по трем градациям, формирование которых основано на пересчете значений рассчитанной урожайности. Первая градация – «плохое» – отражает ожидание урожайности менее 80 % от величины среднесуточной урожайности; вторая – «удовлетворительное» – от 80 до 105 %; третья – «хорошее» – более 105 %. Полученные карты сравнивались с построенными по фактическим значениям урожайности картами.

Применение динамико-статистического метода позволяет предоставлять прогнозы урожайности сельскохозяйственных культур в сроки, принятые Росгидрометцентром (от 1 до 4 месяцев до уборки). В рамках данного направления работ были изучены зависимости между датами наступления фаз развития посевов,

значениями индекса NDVI и листового индекса, а также густотой растений. Разработанный метод помогает смоделировать продукционный процесс посевов за фиксированный временной промежуток, позволяя определять как прирост общей биомассы растений, так и биомассы отдельных органов растений. Индекс NDVI при этом является индикатором интенсивности процесса фотосинтеза. Средняя ошибка прогноза урожайности, полученной с помощью данного метода, варьируется в пределах от 10 до 12 % [24].

1.5.3 Методики обработки материалов спектрозональной съемки для выявления состояния вегетации

В вопросах предоставления в органы власти официальной информации о состоянии сельскохозяйственных культур сотрудники Гидрометцентра России долгие годы основывались на использовании данных наблюдений на гидрометеостанциях, проводимых наземных маршрутных обследованиях полей, а также расчетных данных (учитывающих запасы влаги в почве и температуру воздуха). Последние десятилетия, с учетом уменьшения наблюдательных пунктов, трудностей в проведении маршрутных обследований, сотрудниками Гидрометцентра предпринимаются попытки поиска альтернативных способов получения достоверных и актуальных данных о состоянии озимых культур. В связи с этим в качестве дополнительных данных привлекаются результаты обработки спутниковых данных (в рамках сотрудничества Гидрометцентра России с такими организациями, как Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ФГБУ «ВНИИСХМ»), ИКИ РАН [2, 45]). Разрабатываются новые методы оценки состояния посевов на основе внедрения спутниковых данных в модели, прогнозирующие развитие сельскохозяйственных культур.

Первые совместные исследования Гидрометцентра России с ИКИ РАН, начатые в 2013 г., были направлены на проведение оценки состояния озимых зерновых культур и основывались на комплексном использовании данных наземных агрометеорологических маршрутных обследований и спутниковых данных (дос-

туп к которым осуществлялся посредством сервиса ВЕГА). В основу анализа озимых культур положено использование ВИ (полученных с помощью радиометра MODIS), таких как перпендикулярный вегетационный индекс PVI и нормализованный разностный индекс растительности NDVI [2].

Отличительной чертой озимых культур является рост зеленой биомассы к концу года, по которому можно выявить их расположение. Использование индекса PVI, рассчитанного по четырехдневным композитным изображениям, легло в основу алгоритма выявления посевов озимых культур. Индекс NDVI использовался для выполнения оценки состояния посевов озимых культур, для чего проводилось сравнение динамики изменения ВИ в исследуемом сезоне со среднемноголетней динамикой. Состояние посевов сравнивается с усредненным значением, оценка дается в следующих градациях: близко к средней, лучше средней и хуже средней.

Метод оценки состояния посевов озимых культур (в системе ВЕГА) основан на анализе многолетних рядов данных, полученных с помощью радиометра MODIS. Разработанный метод оценки состоит из этапов, представленных на рисунке 6. Результат работы визуализируется в виде карты состояния озимых культур на конец вегетации в осенний сезон.

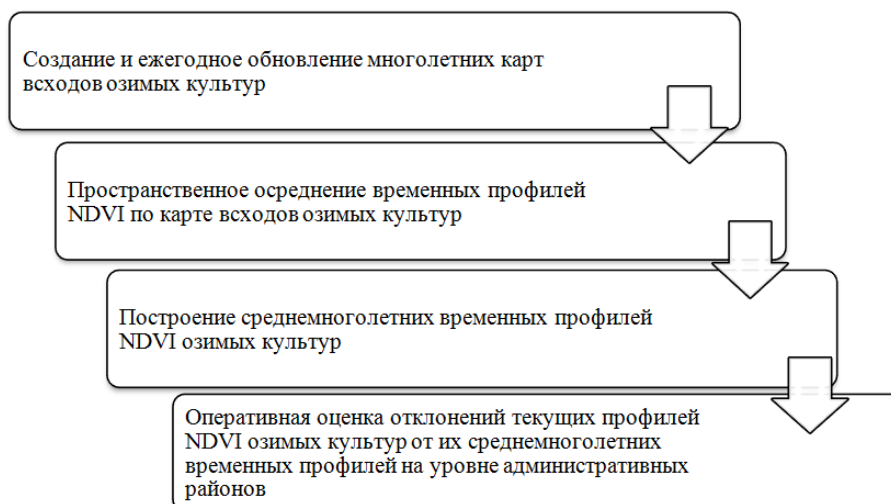


Рисунок 6 – Этапы оценки состояния озимых культур в системе ВЕГА

В работе [2] в качестве района исследования были выбраны земли Приволжского федерального округа. Для выполнения оценки озимых культур были привлечены следующие данные: архивы многолетних спутниковых данных и данных наземных обследований за период с 2003 по 2012 г. На основании этих данных, а именно – значений индекса NDVI и агрометеорологических данных по декадам вегетации, рассчитывались интегральные значения ВИ (NDVI) для озимых культур и площади, занимаемые посевами с плохим состоянием в осенний период. Изначально был выполнен анализ временных рядов NDVI в осенний период вегетации в годы с нормальным увлажнением и в засушливые годы. Также исследовались зависимости между значениями ВИ и агрометеорологическими параметрами, при этом тестовые поля выбирались в непосредственной близости от гидрометеостанций. В качестве основных изучаемых агрометеорологических параметров выступали: количество осадков, максимальные и минимальные температуры воздуха, запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы, показатель растительной массы озимых (представляющий собой произведение кустистости на высоту растения). По результатам сравнения оценки озимых культур, полученной по спутниковым данным, и оценки, рассчитанной с привлечением наземных обследований, совпадение между двумя методами составило 80 %.

Проведенные исследования на территории Приволжского федерального округа позволили разработать методику расчета площадей озимых культур, находящихся в плохом состоянии в осенний период. В основе оценки лежит совместное использование наземных агрометеорологических параметров и ВИ, полученных по спутниковым данным. В связи с большой протяженностью и различными климатическими условиями исследуемой территории, субъекты округа были поделены на пять групп. Для каждой группы были получены свои нелинейные регрессионные уравнения, отражающие связь агрометеорологических параметров и площадей посевов с плохим состоянием в осенний период. Достоверность расчетов площадей на основе использования наземных данных составила 86 %, а ком-

плексное использование наземных и спутниковых данных позволило достичь значения достоверности в 94 %.

1.5.4 Использование радарных данных для решения задач сельскохозяйственного производства

Главным преимуществом данных радарной съемки является всепогодность и чувствительность к изменению биофизических характеристик посевов. Однако существует и ряд недостатков, среди которых можно выделить сложность обработки данных, а также существенную зависимость получаемого сигнала от угла наклона, а также от влажности и характера подстилающей поверхности. В работе [37] сотрудниками компании «Совзонд» были рассмотрены возможности применения радарных данных Sentinel-1 (С-диапазон длин волн – 6 см). В качестве объекта исследования выступали поля ООО «Гелио-Пакс» Новониколаевского района Волгоградской области. Изначально по тестовым участкам необходимо было изучить интенсивность рассеивания сигнала в зависимости от типа сельскохозяйственных культур. В ходе исследования было выявлено, что на интенсивность рассеивания радарного сигнала большое влияние оказывает влажность подстилающей поверхности (влажность как почвы, так и посевов). Чем больше влажность, тем больше интенсивность рассеивания сигнала. Поэтому при обработке данных из анализа следует исключать наиболее пиковые значения интенсивности сигнала ввиду их зашумленности. Для того чтобы минимизировать влияние данного фактора, рассчитывают «радарные NDVI» на основе изображений с поляризацией VV и VH. Исследования временного хода значений ВИ показали обратную зависимость объема зеленой биомассы и значений «радарных NDVI» для озимой и яровой пшеницы. Изучение временного хода значений ВИ для подсолнечника не позволили выделить какие-либо закономерности развития, а для кукурузы характерна тенденция понижения значений «радарных NDVI» по мере созревания. В работе была отмечена возможность применения радарных данных для автоматизированной идентификации ряда культур.

1.6 Системы глобального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения

1.6.1 Информационный потенциал данных дистанционного зондирования Земли для реализации систем мониторинга сельскохозяйственных земель

В последнее время наблюдается значительное расширение областей применения спутниковых данных, а продукты, полученные в результате их обработки, становятся более востребованными. Использование спутниковых данных в различных сферах жизнедеятельности человека приобретает широкий размах, и все более очевидной становится эффективность их внедрения. В области сельского хозяйства данные ДЗЗ также находят широкий спектр применения, позволяя решать различные задачи как на глобальном, так и на локальном уровнях. Для решения задач глобального космического мониторинга сельскохозяйственных земель в настоящее время используются различные системы, позволяющие отслеживать ситуацию на уровне отдельно взятого региона или страны, а также на территории группы стран [9, 10, 23, 31, 36, 39, 44, 48, 93]. Эффективный спутниковый мониторинг сельскохозяйственных посевов опирается на использование как оперативных, так и архивных данных наблюдений, позволяя оценивать динамику происходящих изменений. В зависимости от особенностей решаемой задачи, для повышения достоверности результатов возможно привлечение дополнительной информации: метеорологической, статистической, картографической, результатов наземных полевых обследований и т. д. [35].

1.6.2 Зарубежные системы глобального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения

Один из наиболее масштабных примеров системы глобального космического мониторинга сельскохозяйственных земель – проект «Мониторинг сельскохозяйственных ресурсов» (Monitoring Agriculture through Remote Sensing techniques,

MARS) Объединенного научно-исследовательского центра Европейской комиссии (Joint Research Center, JRC) [39]. Данный проект поддерживает общеевропейскую сельскохозяйственную политику, обеспечивая решение таких задач, как прогнозирование урожайности, контроль над сельскохозяйственной деятельностью, изучение влияния изменения климата и т. д. Также на проект возложена миссия распространения данных ДЗЗ из архивных хранилищ Европейского Союза (ЕС), обеспечения данными проекта глобального мониторинга окружающей среды Copernicus (до декабря 2012 г. – GMES).

Вопросами обеспечения актуальной информацией сельскохозяйственной отрасли США занимается Национальная сельскохозяйственная статистическая служба США (National Agricultural Statistics Service, NASS) [39, 93]. Обновление статистических данных происходит с определенной периодичностью (раз в 5 лет) на уровне всей страны. С помощью данных ДЗЗ осуществляется контроль достоверности поступающих сведений, оцениваются посевные площади, рассчитывается урожайность сельскохозяйственных культур, создаются тематические слои для геоинформационных систем, выбираются тестовые участки для проведения наземных полевых обследований (рисунок 7). Ежегодно по спутниковым данным подготавливается информация о типах возделываемых культур, которая находится в свободном доступе на веб-сервисах CropScape, VegScape [80, 105]. В работе используются спутниковые данные Resourcesat-1 AWiFS, Deimos-1, NOAA (AVHRR), Landsat, данные радиометра MODIS и прочие. Предоставляемая информация востребована фермерами, представителями сельскохозяйственной отрасли, органами власти, научно-исследовательскими организациями и др.

Большой интерес к использованию космических данных для решения задач сельскохозяйственной отрасли наблюдается в КНР, где исследования в данном направлении велись еще с конца 1970-х гг., а в 1990-х гг. в оперативную работу была внедрена система мониторинга посевов [39]. На современном этапе своего развития система включает в себя следующие составляющие: Система космического сельскохозяйственного мониторинга Китая (China Agriculture Monitoring

with Remote Sensing, CHARMS), Система наблюдений за посевами Китая (China Crop Watch System, CCWS), Система мониторинга роста сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности Китая (Метеорологическая служба Китая).

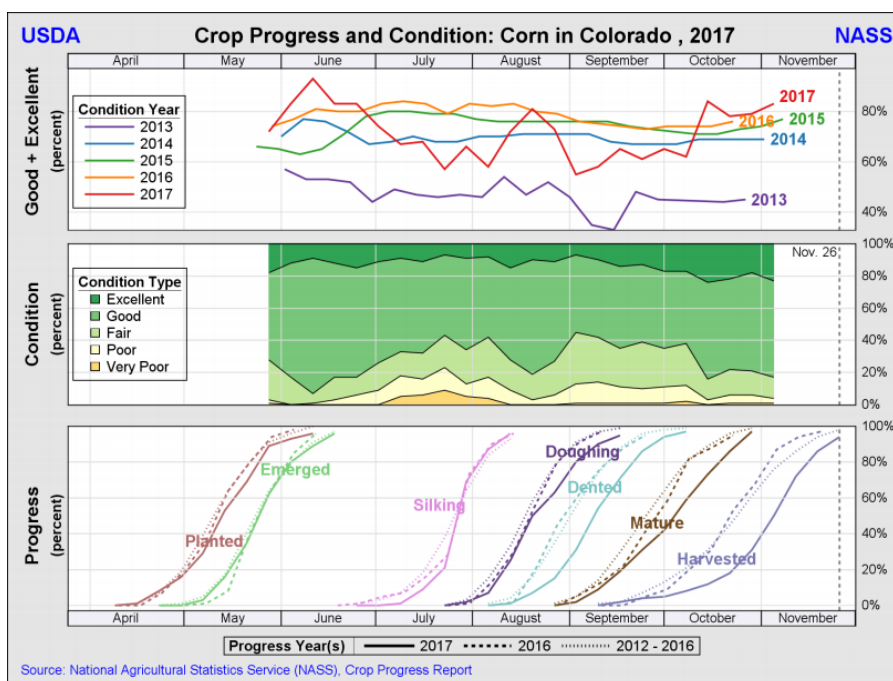


Рисунок 7 – Оценка развития и состояния посевов кукурузы, Штат Колорадо, США, 2017 г. [93]

Первая система (CHARMS) является разработкой Центра применения данных ДЗЗ Министерства сельского хозяйства, обеспечивает информационной продукцией сельскохозяйственные управления. Для пяти основных культур Китая (среди которых наиболее значимыми являются рис, пшеница, кукуруза) рассчитывается урожайность сельскохозяйственных культур, выполняется мониторинг изменения площадей посевов, отслеживается влияние чрезвычайных ситуаций, а также рассчитываются прочие параметры (рисунок 8). Используются спутниковые данные со следующих КА: Landsat, SPOT, IRS, Aster, ENVISAT и прочие. В рамках данной работы на тестовых участках (порядка 6 тысяч полигонов размером $500 \times 500 \text{ м}^2$) проводятся наземные полевые обследования [76].

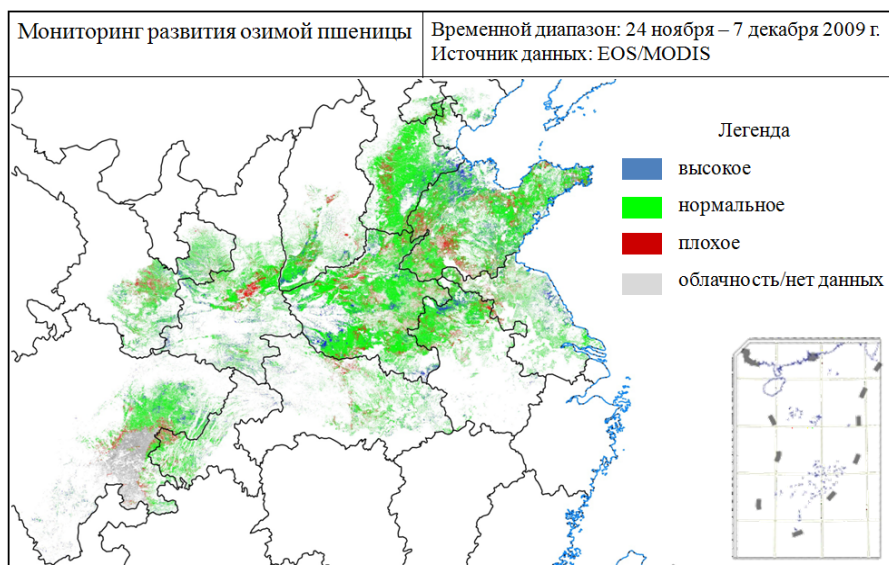


Рисунок 8 – Мониторинг развития озимой пшеницы [76]

Вторая система (CCWS) является разработкой Института дистанционного зондирования и цифровой Земли Китайской Академии наук, при этом области интереса затрагивают и другие зернопроизводящие страны. Выполняется мониторинг условий произрастания сельскохозяйственных культур, засух, оценивается продуктивность культур и структура посевных площадей. Спутниковые данные используются для уточнения статистической информации, принятия управленческих решений, мониторинга земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота (используются спутниковые данные RapidEye) [81].

1.6.3 Опыт ближнего зарубежья в космическом мониторинге земель сельскохозяйственного назначения

Из сопредельных стран, выполняющих мониторинг сельскохозяйственных посевов с использованием спутниковых данных, можно выделить Республику Казахстан (РК). Разработкой данного направления занимается Институт космических исследований Министерства образования и науки РК с передачей полученных результатов Министерству сельского хозяйства РК [36, 65]. На основе анализа космических данных предоставляется информация о весенних запасах влаги,

размерах обрабатываемых посевных площадей, датах сева, прогнозируемом объеме валового сбора зерновых культур и т. д. Решение поставленных задач основано на использовании регрессионных моделей и стандартных методов классификации. Для данного региона исследований основными культурами являются яровые зерновые культуры, которые занимают порядка 10 млн гектар земли и составляют около 90 % всех посевных площадей. На территории Северного Казахстана располагаются преимущественно крупные сельскохозяйственные поля (размерами от 400 га), что в значительной степени облегчает проведение спутникового мониторинга. В работе используются спутниковые данные Terra и Aqua (радиометр MODIS), Landsat, IRS LISS, RADARSAT-1, а также для калибровки спутниковых данных проводятся наземные маршрутные обследования. Спутниковые данные высокого разрешения используются при картировании границ полей, определении типа землепользования, создании масок земель различного назначения (яровые посевы, брошенные поля, естественная растительность). Мониторинговые работы выполняются на основе спутниковых данных низкого пространственного разрешения [23]. Анализ растительного покрова осуществляется с использованием следующих вегетационных индексов: относительный ВИ (Ratio Vegetation Index, RVI), нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), интегральный вегетационный индекс (IVI), разностный вегетационный индекс (Difference Vegetation Index, DVI), перпендикулярный вегетационный индекс (PVI), взвешенный разностный вегетационный индекс (Weighted Difference Vegetation Index, WDVI), инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage Vegetation Index, IPVI), почвенный вегетационный индекс (SAVI), индекс глобального мониторинга окружающей среды (GEMI) [23, 36, 44].

В Украине на основе использования космических данных среднего и высокого разрешения создана распределенная система агромониторинга, включающая геопортал с web-интерфейсом [3] и упрощенную настольную версию (рисунок 9). Первая версия разработана для пользователей министерского уровня, вторая – для представителей отдельных фермерских хозяйств [48]. Все данные, подгружаемые

разными потребителями, проходят обработку и поступают в общую базу данных. Для пользователей из отдельных хозяйств выполняется построение цифровых карт полей, карт внесения удобрений, рассчитывается урожайность культур. Также, по желанию пользователя, по каждому конкретному полю можно построить график динамики индексов вегетации и сравнить их между собой. Разработкой данной системы занимались Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (НУБиП) и Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИКИ НАНУ и ГКАУ). Организации-партнеры проекта: Украинский гидрометеорологический центр Министерства Украины по вопросам чрезвычайных ситуаций и по делам защиты населения от последствий Чернобыльской катастрофы, NOAA (США) [3]. Задачами системы являются предоставление информации по оценке площадей сельскохозяйственных культур, выполнение на регулярной основе мониторинга состояния посевов, прогнозирование урожайности. Привлечение наземных измерений позволяет осуществлять контроль качества продукции, полученной на основе данных ДЗЗ. Система предусматривает обработку и хранение разнородной информации (пользовательская документация, спутниковые данные), структурирование этой информации, предоставление аналитической документации с помощью пользовательского интерфейса.



Рисунок 9 – Интерфейс системы агромониторинга Украины [3]

В качестве примера коммерческого проекта сельскохозяйственного спутникового мониторинга можно привести продукт компании Pixel Solution, ориентированный на работу с конкретными потребителями – аграрными холдингами [31]. Заказчику работ предоставляются следующие виды услуг и информационной продукции: выполняется уточнение площадей и границ полей, составляются карты азотных подкормок, рассчитывается прогноз урожайности сельскохозяйственных культур (с заблаговременностью до двух месяцев до начала уборочных работ), выявляются проблемные участки, а также участки, на которых необходимо проводить отбор проб при агрохимических лабораторных исследованиях. Точность полученных продуктов напрямую зависит от пространственного разрешения спутниковых данных, которые выбираются исходя из возможностей и потребностей заказчика работ. Доступ к данным осуществляется через веб-интерфейс в удаленном режиме работы, карты могут быть представлены в векторном или растровом виде, отчеты генерируются в текстовый или графический формат.

1.6.4 Российские разработки для решения задач сельскохозяйственной отрасли на основе использования спутниковых данных

В России также отмечается большая заинтересованность возможностями использования данных ДЗЗ в сельскохозяйственном мониторинге. Особо стоит отметить достижения сотрудников ИКИ РАН, которым принадлежит разработка сервисов космического мониторинга сельского хозяйства ВЕГА-PRO и VEGA-GEOGLAM [9, 10]. Благодаря поддержке Фонда развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий (фонд «Сколково») был создан Сервис ВЕГА-PRO. В настоящий момент вместе с ИКИ РАН работу сервиса поддерживает Институт космических исследований Земли (ИКИЗ). Автоматическая обработка спутниковых данных позволяет выполнять оценку и мониторинг возобновляемых биологических ресурсов, тем самым решая задачи в сфере агропромышленного комплекса, лесного хозяйства и лесной промышленности. Данный сервис

может быть полезен для Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, сельхозпроизводителей, производителей удобрений, страховых компаний, специалистов лесного хозяйства и прочих организаций. Для анализа сельскохозяйственных земель используются временные ряды вегетационных индексов и их сравнение с временными рядами за предыдущие годы, изучается сезонная и многолетняя динамика развития посевов. В течение периода вегетации в автоматическом режиме осуществляется мониторинг состояния посевов, который может использоваться, в том числе, и для оценки влияния факторов внешней среды. В работе применяются маски пахотных земель, созданные на основе анализа многолетних рядов данных радиометра MODIS. Пользователи самостоятельно задают границы исследуемой территории, могут анализировать как архивные, так и оперативные спутниковые данные (такие как Terra, Aqua, Landsat и прочие). По заданным территориям пользователь может получить информацию о типе возделываемой культуры, временном ходе вегетационного индекса и временном ходе метеопараметров. При наличии у пользователя значений статистической урожайности на исследуемых полях за последние 10 лет, возможно рассчитать прогнозную оценку урожайности, основанную на сравнении с релевантными параметрами прошлых лет [10, 54, 62].

Сервис глобального спутникового мониторинга сельского хозяйства VEGA-GEOGLAM создан в рамках проекта Созвездие-ВЕГА и представляет собой специализированную информационную систему. В рамках проекта Stimulating Innovation for Global Monitoring of Agriculture (SIGMA) для участников сети Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring (JECAM) обеспечен доступ к спутниковым данным высокого разрешения и данным радиометра MODIS. Сервис VEGA-GEOGLAM предоставляет пользователям инструменты для анализа спутниковых данных и предназначен для проведения исследовательских работ в сфере спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель. Так, например, данный сервис позволяет проводить анализ динамики изменения ВИ для тестовых участков сети JECAM (графики сезонного хода и многолетней динамики). В качестве

атрибутивных данных для каждого тестового участка выступает следующая информация: идентификатор поля, площадь, местоположение (страна, область, район), вид использования, возделываемая культура, данные наземных обследований и пр. [9].

Один из тестовых полигонов проекта SIGMA находится на территории Ставропольского края (доля посевных площадей составляет порядка 87 % от всей площади края), который был создан в 2014 г. совместными усилиями сотрудников Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства РАН (Ставропольский НИИСХ) и ИКИ РАН [4]. С помощью данного полигона осуществляется решение следующих задач: картографирование и оценка сельскохозяйственных угодий, идентификация и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, контроль смены фенологических фаз исследуемых культур. Кроме этого Ставропольский НИИСХ занимается самостоятельными разработками. Так, с 2012 г. под руководством Министерства сельского хозяйства Ставропольского края ведутся работы по внедрению спутниковых данных в сельскохозяйственную отрасль. С различной заблаговременностью осуществляется прогнозирование урожайности зерновых культур, для чего используются данные об агроклиматических условиях (при этом дополнительно выполняется автоматический поиск года-аналога) и спутниковые данные (индекс NDVI). Проведенные исследования показали, что наилучшая точность (по озимой пшенице) характерна для прогнозов, подготовленных за полтора месяца до уборки, и в среднем по краю составляет порядка 2 ц/га. Исследуется пространственное распределение линейной водной эрозии, выявляются потенциально опасные участки развития эрозионных процессов (по радарным данным SRTM). На основе использования данных ДЗЗ рассчитываются площади и уточняются границы полей, подготавливается информация об использовании сельхозугодий и о состоянии посевов сельскохозяйственных культур, производится контроль севооборота, отслеживается положение сельскохозяйственной техники, осуществляется дозированное внесение удобрений и т. д.

В качестве примера отечественного геоинформационного web-сервиса спутникового мониторинга можно привести коммерческий продукт компании «Совзонд» – «Геоаналитика.Агро», работающий на принципах модели облачных вычислений Software as a Service (SaaS) [13, 38]. Данный сервис стремится обеспечить помощь при принятии управленческих решений на основе комплексного использования спутниковой информации, анализа данных и геосистемного моделирования. Преимуществом сервиса является автоматизация следующих процессов обработки: импорт метеорологических и спутниковых данных, выполнение предварительной и тематической обработки снимков, расчет вегетационных индексов. Также к достоинствам стоит отнести возможность оперативного проведения анализа метеорологической информации и ЦМР, предоставление информации об условиях произрастания культур с привлечением как спутниковой, так и наземной информации. Основные модули web-сервиса «Геоаналитика.Агро» отображены на рисунке 10.

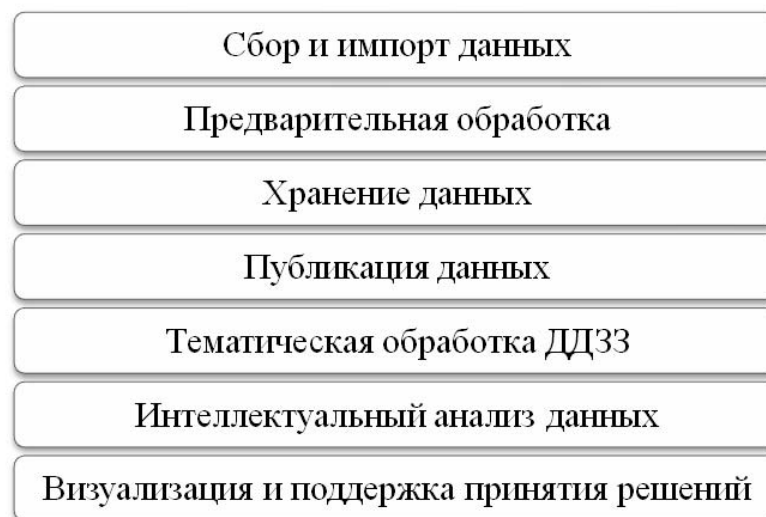


Рисунок 10 – Составляющие модули web-сервиса «Геоаналитика.Агро»

Авторы считают, что использование данного сервиса вызовет наибольший интерес у представителей государственной власти и бизнеса, работников страховых компаний, а также инвесторов. Актуальность данного сервиса объясняется

возможностью получения спутниковых данных, находящихся в свободном доступе, а также коммерческих снимков на интересующую территорию. Также сервис позволяет получать информацию о структуре земель и состоянии сельскохозяйственных культур, составлять аналитические отчеты, оценивать риски возникновения различных негативных процессов как природного, так и техногенного характера [38].

Сервис предоставляет информационную продукцию различного рода, отражающую агрометеорологические характеристики, характеристики рельефа, почвенные показатели, параметры роста и развития сельскохозяйственных культур. Большое влияние на формирование и развитие сельскохозяйственных посевов оказывают метеорологические условия. В качестве дополнительного источника информации при принятии решений web-сервис «Геоаналитика.Агро» предоставляет пользователям карты снежного покрова, карты погоды, а также различные карты распределения метеорологических параметров (температурные характеристики, влажность воздуха, осадки, направление и скорость ветра и пр.). Данные поступают с метеорологических станций и проходят последующую обработку (преобразование точечных измерений в площадную форму представления информации), однако в силу редкого расположения сети метеостанций ряд параметров не может быть корректно рассчитан на территориях, отдаленных от места проведения измерений. Данное обстоятельство влечет ряд ошибок, которые могут быть исключены при использовании наземных измерений на каждом конкретном исследуемом участке. Также актуальным является вопрос поиска альтернативных источников данных о метеорологических параметрах, например, таких как осадки [14, 16].

Помимо создания web-сервиса, обеспечивающего космический мониторинг сельскохозяйственных земель, компания «Совзонд» выполняет ряд договорных работ. В качестве примера такого сотрудничества можно привести работу по инвентаризации земель сельскохозяйственного назначения [58], реализованную с 2012 по 2014 г. совместно с Государственным бюджетным учреждением Калуж-

ской области «Агентство информационных технологий Калужской области» (ГБУ КО «Калугаинформтех»). Главной проблемой сельскохозяйственной отрасли Калужской области, наряду с изначально малым плодородием почв (нечерноземный регион), является процесс зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью. В дополнение к этому, бóльшая часть территории южных районов радиоактивно заражена.

В результате выполнения работы были подготовлены карты, показывающие фактическое использование сельскохозяйственных земель, и карты, отражающие степень зарастания полей. Подготовлены карты и отчетная документация трех уровней детальности: отдельные поля, сельхозпредприятия и муниципальные образования. Кроме дешифровочных работ проводились выборочные полевые обследования, которые помогли провести аналогию между состоянием сельскохозяйственного поля и его отображением на спутниковом снимке. Сельскохозяйственные угодья Калужской области были поделены на семь категорий:

- пахотные земли;
- неиспользуемые пахотные земли;
- многолетние насаждения;
- многолетние насаждения, заросшие кустарником и мелколесьем;
- чистые кормовые угодья;
- кормовые угодья, заросшие древесно-кустарниковой растительностью;
- сельскохозяйственные земли иного фактического использования.

По материалам дешифрирования снимков была выполнена оценка неиспользуемых сельскохозяйственных территорий, которая показала, что на момент 2014 г. к данной категории относится порядка 68 % от общей площади земель сельскохозяйственного назначения. Результаты инвентаризации сельскохозяйственных земель используются представителями органов власти, управления Россельхознадзора по Калужской области, например, в целях оптимизации проведения налогообложения.

1.7 Эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли при решении задач сельскохозяйственного производства

Помимо получения дополнительной информации при принятии управленческих решений в системе сельскохозяйственного производства, использование данных ДЗЗ позволяет также получать экономическую выгоду. В работе [31] показана эффективность использования спутникового мониторинга при внесении удобрений. Так, например, формирование карт-заданий для управляющих компьютеров сельскохозяйственной техники позволяет дозированно вносить удобрения там, где это необходимо. При наличии наземных обследований, отражающих содержание азота в растениях, потребитель получает карту с рассчитанными нормами внесения удобрений. Если такие обследования полей не проводились, то на основании только лишь спутниковой информации потребителю будет предоставлена карта с относительным зонированием. Экономический эффект от внедрения данной технологии (по данным на 2013 г.) для территории в 5 000 га составил 2,94 млн руб. Общий эффект от внедрения системы спутникового мониторинга посевов сельскохозяйственных культур составил до 20 % экономии денежных средств за сезон, на внесении азотных подкормок по картам-заданиям удалось сэкономить порядка 30 %.

В 2015 г. подобными исследованиями, отражающими экономическую эффективность внедрения данных ДЗЗ при расчете количества вносимых удобрений, занимались в Белорусском государственном университете [12]. В качестве исходных спутниковых данных применялись снимки с КА Landsat-8 (индекс NDVI), на основе анализа которых рассчитывалось количество внесения азотных удобрений и составлялись карты-задания. Сельскохозяйственная техника должна быть оснащена бортовым компьютером и GNSS-антенной для точного определения координат. Как отмечают авторы, наибольший эффект наблюдается при комплексном использовании данных ДЗЗ (спутниковые снимки; материалы, полученные с БПЛА) и данных наземных полевых обследований. Неземные обследования

проводились с использованием прибора компании Trimble – GreenSeeker handheld crop sensor (рисунок 11) [101]. Данный прибор работает в красном и ближнем ИК-диапазонах, что позволяет производить расчеты ВИ, которые в дальнейшем используются при расчетах нормы внесения азотных удобрений.



Рисунок 11 – Ручной датчик биомассы GreenSeeker [101]

Карта-задание для дозированного внесения удобрения на полях составлялась по снимку, полученному 12 апреля 2015 г. В качестве объекта исследования были выбраны посевы озимых культур, которые в ближайшее время должны были подвергаться обработке. Из данных объектов было отобрано поле с посевами озимой тритикале, площадь которого составила 97 га. Поле пересекается дорогой и представлено, таким образом, двумя частями: северной и южной. Особенностью данного поля является значительное разнообразие ВИ, значения которого меняются от 0,13 до 0,46, при этом значения северной и южной частей отличаются на 27 %. Также в это время было выполнено наземное обследование данного поля. Коэффициент детерминации между значениями ВИ, полученными по спутниковым данным и данным прибора GreenSeeker, составил 0,85.

Значения ВИ, полученные по снимку, были поделены на три градации относительно среднего значения ($\pm 20\%$). Поле было поделено на 16 однородных участков, значения ВИ в каждом из которых соответствовали одной из градаций.

В соответствии с этим для каждого участка были рассчитаны нормы внесения удобрений (карбамид, азот) и составлялась карта-задание для техники.

Оценка проведенной работы проводилась на основе обработки снимка за 4 мая. На участках поля с максимальной нормой внесения удобрений наблюдалось увеличение ВИ на 30 % (по сравнению с первой датой), на участках со средней нормой – от 20 до 30 %, на участках с минимальной нормой – от 5 до 20 %. Дозированное внесение удобрений в целом способствовало повышению однородности распределения значений ВИ на поле.

Выводы по первому разделу

Информационное обеспечение отрасли сельскохозяйственного производства с применением результатов обработки данных ДЗЗ реализуется как на локальном, так и на глобальном уровнях. Важными факторами при выборе космических снимков являются величина пространственного и спектрального разрешения, а также ширина полосы съемки, которые выбираются исходя из требований поставленной задачи. Среди известных зарубежных сервисов глобального космического мониторинга наибольший интерес представляют: «Мониторинг сельскохозяйственных ресурсов» (MARS), «Национальная сельскохозяйственная статистическая служба США» (NASS), «Система космического сельскохозяйственного мониторинга Китая» (CHARMS), среди Российских разработок – сервисы «БЕГА-ПРО» (ИКИ РАН) и «Геоаналитика.Агро» (Компания «Совзонд»). Структура данных сервисов включает следующие этапы: сбор данных ДЗЗ, их предварительную обработку (атмосферная и геометрическая коррекция, исключение территории, экранированной облачностью), архивирование космических снимков, тематическую обработку (классификация снимков, получение различных индексных изображений), анализ данных с последующей визуализацией полученных результатов.

Большинство представленных исследований по глобальному мониторингу и прогнозированию ожидаемой урожайности сельскохозяйственных посевов основано на использовании космических снимков Тетра. Для выявления пахотных зе-

мель на региональном уровне, идентификации возделываемых культур, осуществления более детальной оценки посевов на локальном уровне целесообразно использовать материалы спутниковой съемки среднего пространственного разрешения, например, данные с КА Landsat.

2 РЕГИОНАЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

2.1 Система регионального космического мониторинга состояния сельскохозяйственных культур

Стандартная обработка данных ДЗЗ состоит из нескольких обязательных этапов, к которым относятся прием космических данных, предварительная обработка, архивирование космических снимков, тематическая обработка и интерпретация полученных результатов [30, 51, 70, 71]. На этапе предварительной обработки космических снимков осуществляется их геометрическая коррекция, радиометрическая калибровка, коррекция влияния атмосферы, преобразование в заданную систему координат и т. д. [47]. Для накопления статистических данных с возможностью их последующего анализа применяется архивирование данных, что позволяет выполнять ретроспективный анализ данных [53]. Тематическая обработка данных ДЗЗ основана на получении индексных изображений, применении разнообразных методов классификации и сегментации снимков, распознавании образов с целью повышения их информативности. Для интерпретации полученных результатов обработки космических снимков дополнительно могут использоваться различные виды вспомогательной информации: статистические данные, картографический материал, ЦМР, результаты наземных измерений и пр. [45, 63].

С целью прогнозирования ожидаемой урожайности и определения состояния посевов зерновых культур в СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» создана система регионального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения (рисунок 12), которая полностью реализует все вышеперечисленные этапы обработки космических снимков начиная с оперативного приема космических снимков и до предоставления пользователю тематической информационной продукции. База знаний, сформированная за счет накопления многолетних статистических данных при прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур, позволила совершенствовать методику обработки данных ДЗЗ для определения состоя-

ния посевов зерновых культур, которая в свою очередь позволила расширить функциональные возможности системы регионального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения [55, 61].



Рисунок 12 – Схема регионального космического мониторинга состояния посевов и прогноза урожайности зерновых культур

При организации регионального космического мониторинга состояния посевов зерновых культур используются как оперативные, так и архивные материалы космической съемки. Пополнение архива индексных изображений основано на использовании данных с КА Terra, которые обладают достаточно большой шириной полосы съемки для осуществления регионального мониторинга, а также ежедневной периодичностью получения информации о землях сельскохозяйственного на-

значения. В оперативной работе снимки с КА Terra используются при прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур на территории Новосибирской области и Алтайского края, а также при осуществлении работ по регулярному мониторингу состояния посевов зерновых культур. Посредством данных, полученных с помощью серии спутников КА Landsat, ежегодно осуществляется формирование архива малооблачных снимков в период с мая по сентябрь. Данный вид спутниковых данных используется в дальнейшей работе для создания и обновления схем внутрихозяйственного землеустройства, размещения реперных точек на полях.

С 2005 г. на территории тестовых хозяйств Новосибирской области рассчитывается ожидаемая урожайность зерновых культур. На рисунке 13 отражено территориальное распределение тестовых хозяйств Новосибирской области. При этом рассчитывается ожидаемая урожайность зерновых культур отдельно по каждому полю, сельскохозяйственному предприятию, административному району и в целом по области. С 2014 г. на территории Алтайского края производятся расчеты ожидаемой урожайности по 30 административным районам и краю в целом.

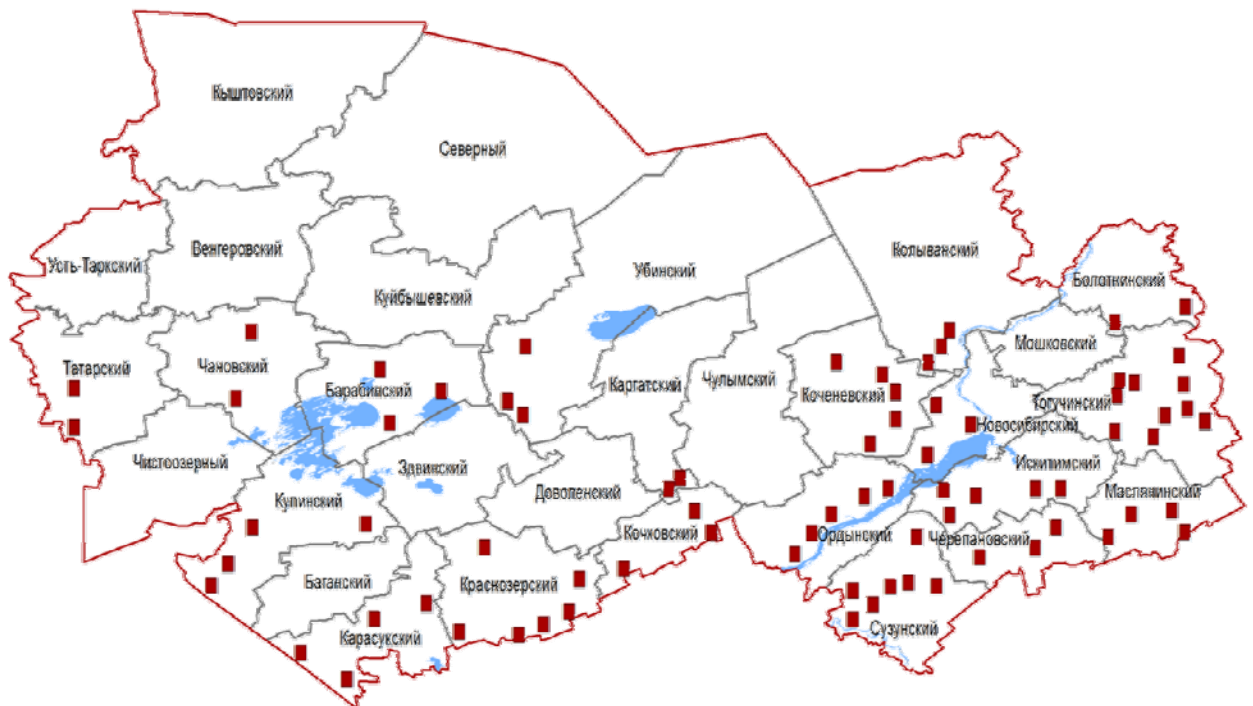


Рисунок 13 – Схема территориального распределения тестовых хозяйств на территории Новосибирской области

На основе использования космических снимков с КА Landsat для каждого тестового хозяйства Новосибирской области созданы схемы внутрихозяйственного землеустройства, на которых отражены поля, наиболее крупные населенные пункты, дорожная сеть, водоемы и участки древесной растительности на полях (колки). На полях отмечаются рабочие участки – части поля, которые обычно отделены друг от друга лесополосами. Внутри каждого рабочего участка расставлены реперные точки, каждой из которых соответствует уникальное значение, отражающее порядковый номер, принадлежность к административному району, сельскохозяйственному предприятию. Каждая реперная точка занесена в общую базу данных и используется для автоматических измерений значения ВИ, с накоплением результатов измерений. Измеренные и накопленные значения индекса NDVI используются в дальнейшем при расчетах ожидаемой урожайности и при определении состояния посевов зерновых культур [59].

Выбор перечня тестовых хозяйств для прогнозирования урожайности зерновых культур ежегодно осуществляется в соответствии с рекомендациями главных агрономов административных районов. В начале мая схемы внутрихозяйственного землеустройства передаются главным агрономам в районные управления сельского хозяйства Новосибирской области и руководителям сельскохозяйственных предприятий для сбора информации о возделываемых сельскохозяйственных культурах в текущем году. По каждому сельскохозяйственному предприятию формируется схема размещения возделываемых культур (рисунок 14), на основании которой выполняется наблюдение за определенными культурами с момента появления всходов и до окончания вегетационного периода. Данные о размещении сельскохозяйственных культур используются при прогнозировании урожайности зерновых культур. По мере необходимости производится обновление схем по актуальным спутниковым данным в связи с изменением границ полей, выведением полей из оборота или присоединением новых земель.

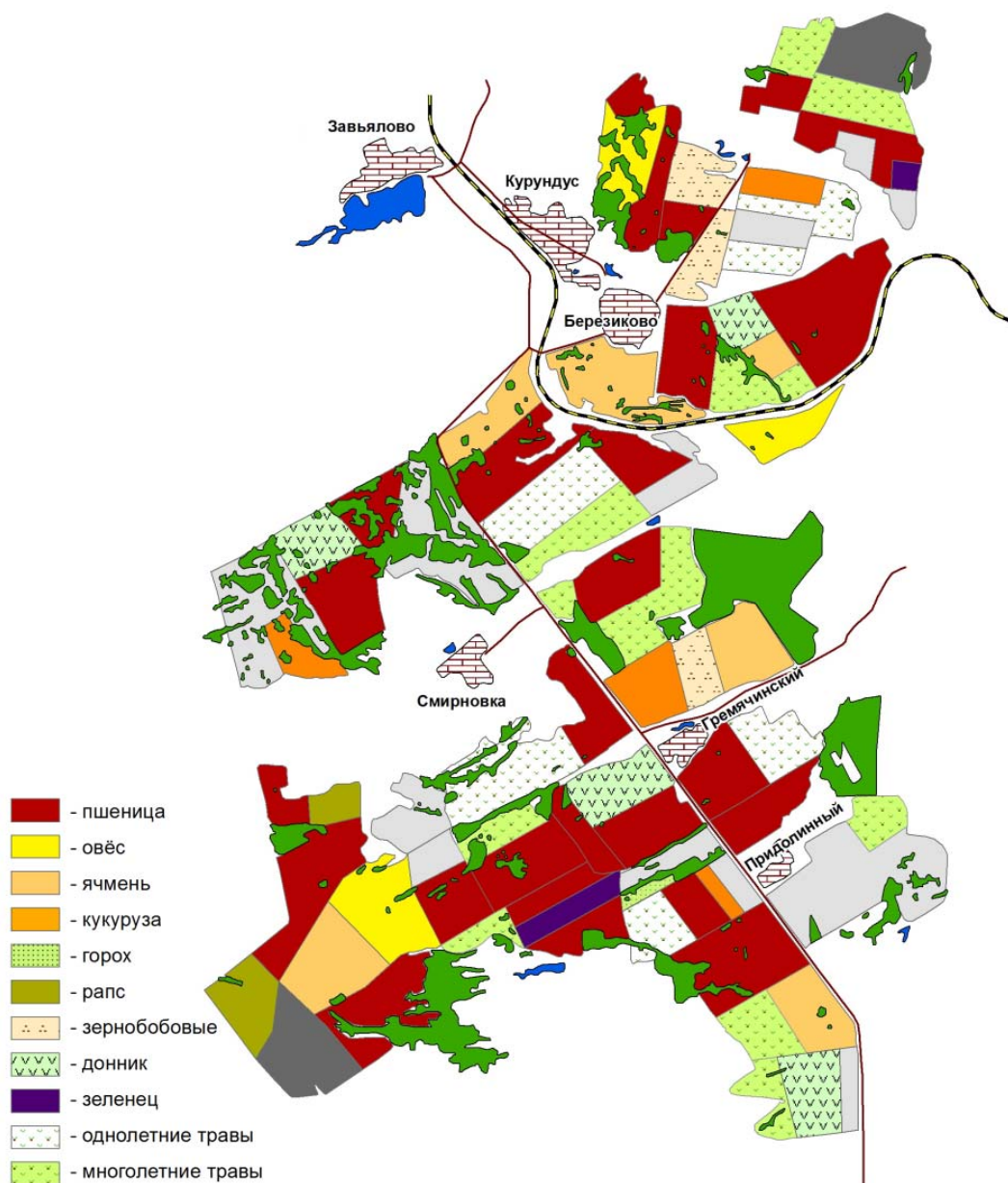


Рисунок 14 – Схема размещения культур в ЗАО «Завьяловское»,
Тогучинский район, Новосибирская область, 2013 г.

В качестве базового параметра при прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур в системе регионального космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения используется индекс NDVI, рассчитываемый по данным с КА Terra. Каждый вегетационный сезон с 2005 по 2018 г. в период с 1 июня по 20 июля измерялись индексы NDVI в пределах каждого поля минимум на три даты: два июньских дня и один день в июле, отражающий максимальное

значение вегетационного индекса. В качестве примера на рисунке 15 приведены результаты измерений индексов NDVI на полях тестового хозяйства Тогучинского района Новосибирской области за 2018 г. Измеренные за все годы значения индексов NDVI формируют ежегодно обновляемую базу данных ВИ.

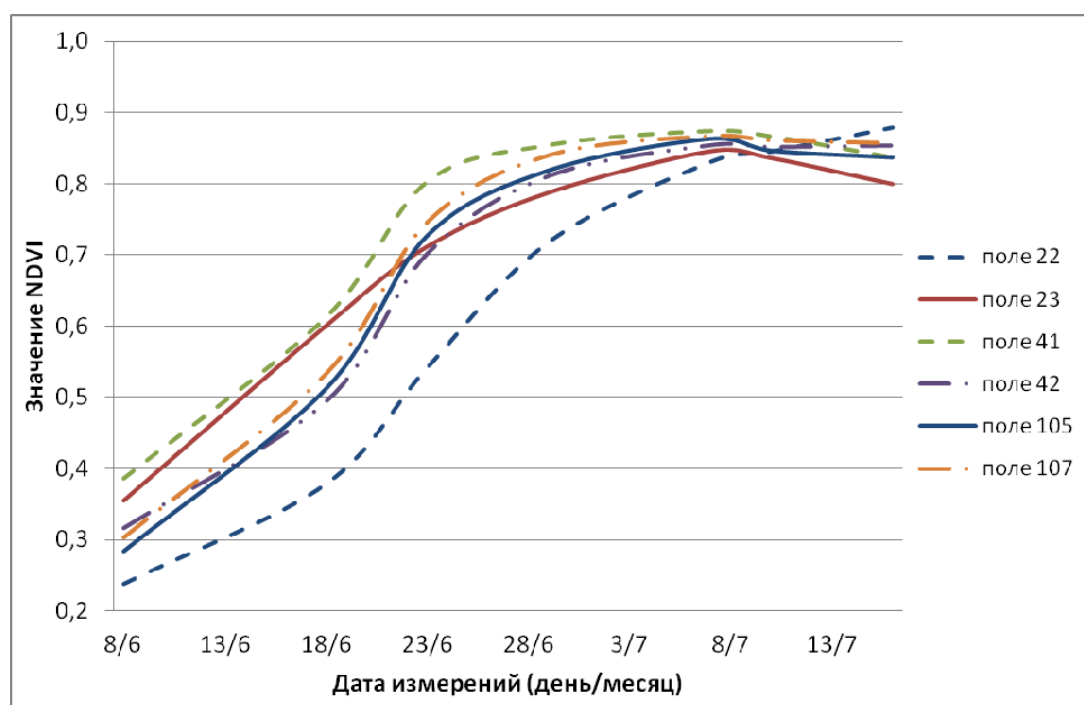


Рисунок 15 – Динамика значений NDVI по данным с КА Terra

Помимо индексов вегетации для прогнозирования ожидаемой урожайности зерновых культур применяются также результаты измерений климатических параметров на гидрометстанциях, к которым относятся максимальная и минимальная температуры воздуха, количество суточных осадков, относительная влажность воздуха, средняя скорость ветра, суммарная солнечная радиация. В период с мая по август с метеостанций поступают ежедневные данные об измеренных величинах, в остальные месяцы (с января по апрель и с сентября по декабрь) используется средняя за месяц величина каждого параметра. На основании полученных данных формируется база данных метеорологических параметров по 32 метеостанциям Новосибирской области (с 1985 г.) и 32 метеостанциям Алтайского края (с 1999 г.). Величину суммарной солнечной радиации измеряют на двух метеостанциях Ново-

сибирской области и двух метеостанциях Алтайского края. В таблице 16 представлен фрагмент базы данных ежедневных климатических параметров.

Таблица 16 – Фрагмент базы данных ежедневных климатических параметров (Барабинская метеостанция, 2018 г.)

Метеостанция	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Дата	T_{\max} , ° С	T_{\min} , ° С	Количество суточных осадков, мм	Отн. влажность воздуха, %	Средняя скорость ветра, м/с
BARABIN	55,333	78,367	01.05.2018	11,2	4,2	0	81	3,8
BARABIN	55,333	78,367	02.05.2018	9,4	-4,1	0	78	3,1
BARABIN	55,333	78,367	03.05.2018	9,7	-0,5	0	61	2,3
BARABIN	55,333	78,367	04.05.2018	11,6	0,3	0	47	3,9
BARABIN	55,333	78,367	05.05.2018	8,5	1,7	11,0	81	7,5
BARABIN	55,333	78,367	06.05.2018	3,9	-2,0	0,3	51	4,0
BARABIN	55,333	78,367	07.05.2018	6,1	-2,4	1,4	83	2,6
BARABIN	55,333	78,367	08.05.2018	7,0	4,2	13,0	91	4,1
BARABIN	55,333	78,367	09.05.2018	10,4	-2,9	0	82	1,8
BARABIN	55,333	78,367	10.05.2018	13,1	-2,3	0	63	2,4

Сформированные базы данных ежедневных климатических параметров используются в качестве основных переменных прогнозирования урожайности и для определения года – аналога текущего года, т. е. наиболее близкого к исследуемому году по своим климатическим характеристикам. Для каждого административного района в соответствии с климатическими параметрами и статистическими данными о фактической урожайности зерновых культур определены соответствующие им индексы урожайности. Таким образом, от года-аналога зависит величина индекса урожайности в текущем году, на основании которой с использованием имитационной модели SDIM (System of Databases and Imitating Modeling) осуществляется расчет величины ожидаемой урожайности зерновых культур. Каждому сельскохозяйственному предприятию, административному району Новосибирской области и Алтайского края соответствует свой индивидуальный год-аналог, следовательно, индивидуальный индекс урожайности. Наибольшее влияние на развитие посевов оказывает температура воздуха и количество суммарных осадков [56]. Именно по

этим характеристикам в результате сравнения суммарных значений каждого отдельного параметра (максимальная температура воздуха, минимальная температура воздуха, суточные осадки) и осуществляется подбор года-аналога, наиболее похожего на текущий год.

При прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур также используются картографические материалы, статистические данные о величине фактической урожайности зерновых культур, данные о выращиваемых сельскохозяйственных культурах и прочие виды вспомогательной информации (рисунок 16).

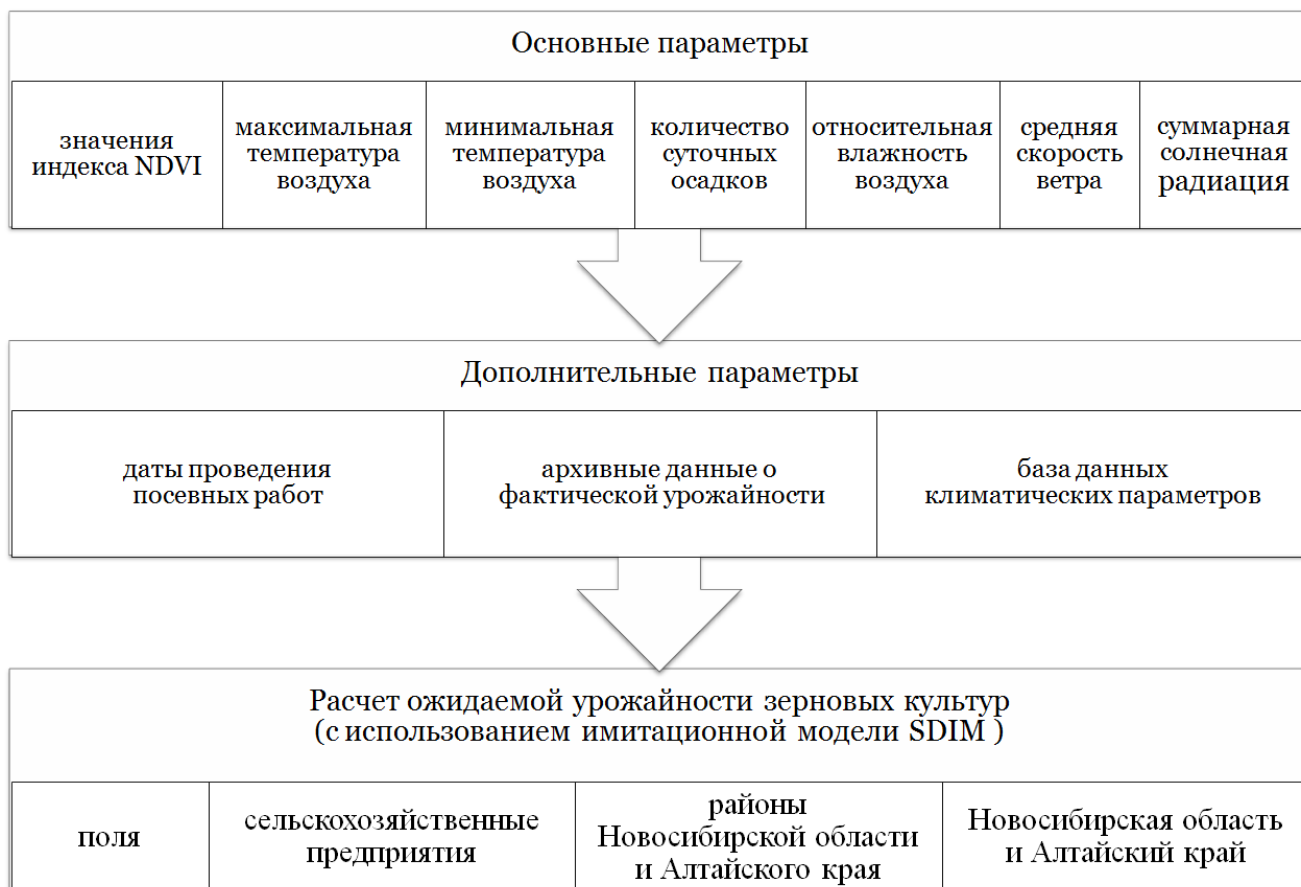


Рисунок 16 – Виды исходных данных для прогнозирования урожайности зерновых культур

Расчет ожидаемой урожайности зерновых культур выполняется по каждому отдельному полю, в среднем по хозяйству, по каждому административному району и в целом по всей области и краю к 20 июля. Для расчета величины ожидаемой

урожайности зерновых культур использовалась имитационная модель SDIM, реализующая американскую модель биопродуктивности EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). Основными параметрами для определения ожидаемой урожайности в имитационной модели SDIM служит индекс NDVI, рассчитываемый по снимкам с КА Terra, климатические параметры, также вносятся временной период посевных работ и предварительная дата уборки урожая для каждого поля [61].

Результаты ежегодных прогнозов формировали базу данных и передавались в Росгидромет, районные управления сельского хозяйства Новосибирской области и руководителям сельскохозяйственных предприятий. В отделы агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и ФГБУ «Алтайский краевой центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» предоставлялась информация о прогнозе урожайности зерновых культур, рассчитанная по административным районам Новосибирской области и Алтайского края соответственно. На рисунке 17 приведено сравнение фактической и прогнозируемой урожайности зерновых культур (яровой пшеницы) по районам Новосибирской области за 2017 г.

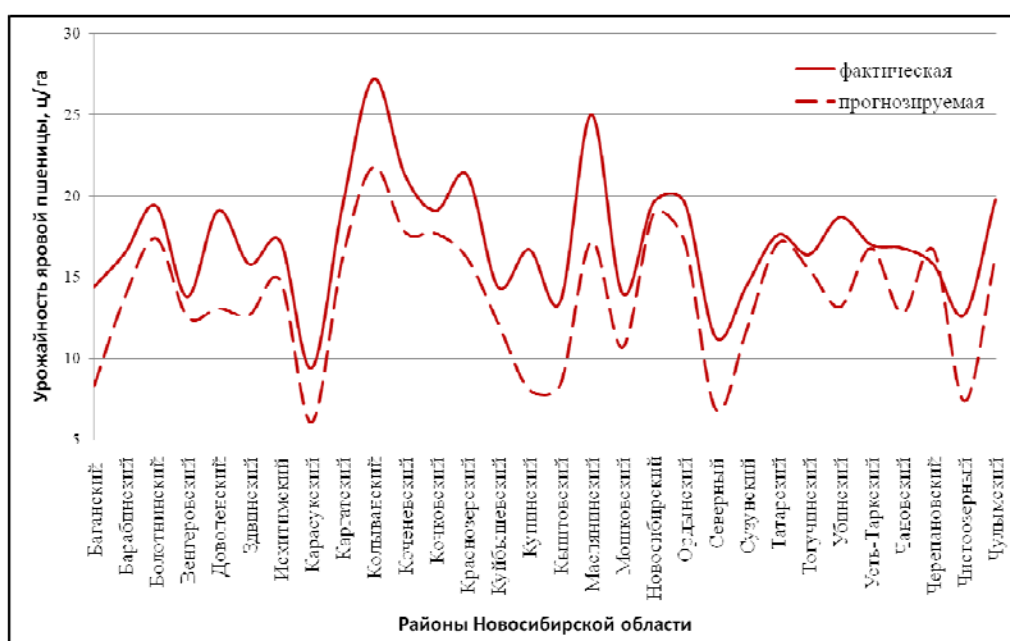


Рисунок 17 – Сравнение фактической и прогнозируемой урожайности зерновых культур (яровой пшеницы)

Качество определения ожидаемой урожайности зерновых культур оценивалось по величине оправдываемости прогноза (γ), которая рассчитывалась после получения из Министерства сельского хозяйства [33] данных о фактической урожайности.

Расчет оправдываемости оперативного агрометеорологического прогноза осуществлялся с использованием формулы [22]:

$$\gamma = 100 \% - \left| \frac{u_{\text{п}} - u_{\text{ф}}}{u_{\text{ф}}} \right| 100 \%, \quad (7)$$

где $u_{\text{ф}}$ – фактическая величина урожайности;

$u_{\text{п}}$ – прогнозируемая величина урожайности.

В таблицах 17, 18 приведены результаты выполненной оценки качества прогнозирования урожайности зерновых культур (яровой пшеницы) в Новосибирской области с 2005 по 2017 г. и Алтайском крае с 2014 по 2017 г.

Таблица 17 – Оправдываемость прогноза урожайности яровой пшеницы по хозяйствам и районам Новосибирской области

Оправдываемость прогноза урожайности	Год мониторинга													Средняя оправдываемость прогнозов, %
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Хозяйства, %	74	76	80	80	80	82	82	-	69	81	81	79	86	79
Районы, %			90	83	87	87	85	67	66	79	83	85	79	81
Область, %				84	88	93	96	73	71	97	92	100	80	87

Таблица 18 – Оправдываемость прогноза урожайности яровой пшеницы по районам Алтайского края

Оправдываемость прогноза урожайности	Год мониторинга				Средняя оправдываемость прогнозов, %
	2014	2015	2016	2017	
Районы, %	73	72	81	83	77
Край, %	95	84	93	88	90

В соответствии с Инструкцией [22] выполнена оценка качества прогноза по следующей шкале: оправдываемость прогноза урожайности больше 90 % – 5 баллов, от 90 до 81 % – 4 балла, от 80 до 70 % – 3 балла, меньше 70 % – 0 баллов. Таким образом, можно сделать вывод, что результаты определения ожидаемой урожайности соответствовали оценкам «хорошо» и «удовлетворительно». На точность прогноза урожайности зерновых культур оказывает влияние ряд факторов, к которым относятся: засоренность посевов, оказывающих угнетающее воздействие на развитие сельскохозяйственных культур и влияющих на величину индексов NDVI; дымовые шлейфы и облачность, которые негативно сказываются на количестве производимых измерений; неблагоприятные условия уборки урожая, которые приводят к снижению качества и урожайности зерновых культур.

Данные оценки качества прогноза свидетельствуют о состоятельности информации формируемых баз данных. Следовательно, на основе многолетнего (2005 по 2018 г.) выполнения работ по прогнозированию ожидаемой урожайности зерновых культур сформирована база знаний, которая содержит:

- архив измеренных индексов NDVI на тестовых полях;
- архив статистических значений урожайности зерновых культур в сельскохозяйственных предприятиях Новосибирской области, районах Новосибирской области и Алтайского края;
- архив планов размещения возделываемых культур в сельскохозяйственных предприятиях Новосибирской области;
- банк архивных снимков с КА Terra.

2.2 Методика обработки космических снимков в системе регионального мониторинга состояния посевов зерновых культур

При прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур дополнительным источником информации являются результаты оценки состояния посевов зерновых культур в пределах крупных административных единиц, таких как область или край. Существуют наземные способы определения состояния посевов

зерновых культур, которые выполняют агрометеорологи посредством оценки состояния почвы, метеорологических и климатических условий, наблюдений за динамикой роста сельскохозяйственных культур и учета качества проведения агротехнических мероприятий. В разных административных районах обследования проводятся в течение установленного временного периода, но в разные дни и на разном количестве полей. В связи с этим стоит учитывать, что полученные в результате проведения наземных маршрутных агрометеорологических обследований достоверные данные носят нерегулярный характер по времени и пространственному охвату из-за большой протяженности исследуемой территории. Поэтому в качестве дополнения натуральных измерений важно развивать методики обработки данных ДЗЗ при определении состояния посевов зерновых культур, которые позволяют повысить достоверность информационного обеспечения отрасли сельскохозяйственного производства.

Оценка состояния посевов с помощью наземных методов осуществляется с учетом качественных и количественных признаков, к которым относятся высота и густота стояния растений, количество зерен в колосе зерновых культур, фаза развития, степень повреждения вредителями и болезнями и т. д. Оценка общего состояния и развития посевов сельскохозяйственных культур осуществляется по условной пятибалльной шкале посредством визуальной оценки. Оцениваются изреженность, высота, засоренность, повреждение растительного покрова (таблица 19). Таким образом, результаты наземных маршрутных обследований позволяют определить относительную продуктивность сельскохозяйственных культур [49].

Как видно из таблицы 19, определение состояния посевов в конечном итоге сводится к оцениванию ожидаемой урожайности зерновых культур по сравнению со средним значением: ожидаемая урожайность выше среднего, близкая к среднему и ниже среднего значения. Поэтому при усовершенствовании методики обработки космических снимков для определения состояния посевов зерновых культур было принято решение производить оценку по трем градациям: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое. Основным показателем развития

посевов по космическим снимкам является значение индекса NDVI, который служит комплексным показателем развития посевов и характеризует совокупность параметров сельскохозяйственных культур, влияющих в конечном итоге на их продуктивность: густота стояния, высота растений, изреженность и засоренность.

Таблица 19 – Критерии оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур при наземных маршрутных обследованиях [49]

Оценка состояния, балл	Характеристика состояния участка, роста и развития культуры, ожидаемого урожая
5 (отличное, очень хорошее)	Густота стояния растений равномерная, высота одинаковая. Растения мощные, здоровые, хорошо укоренившиеся, злаки имеют много колосоносных стеблей. Рост и развитие посевов проходит нормально. В сравнении с состоянием посевов в прошлые годы можно ожидать урожая, близкого к максимальному
4 (хорошее)	Густота стояния растений недостаточно равномерная, местами наблюдается небольшая изреженность, при общем хорошем состоянии растения имеют среднюю кустистость, нарастание растительной массы идет несколько замедленно, посевы заметно засорены, повреждены вредителями, болезнями и т. д. Ожидаемый урожай – выше среднего
3 (среднее)	Густота стояния растений не вполне равномерная. Высота и кустистость средние. Имеются повреждения растений болезнями, вредителями или неблагоприятными метеорологическими явлениями. Посевы засорены. Можно ожидать урожая, близкого к среднему многолетнему
2 (плохое)	Посевы изрежены, густота стояния растений неравномерная, часто встречается оголенная почва. Растения имеют угнетенный вид, небольшую высоту, слабую кустистость. Посевы сильно засорены, отмечается значительное повреждение болезнями, вредителями или неблагоприятными метеорологическими явлениями. Урожай ожидается ниже среднего
1 (очень плохое)	Полная или почти полная гибель растений. Посевы сильно изрежены, густота стояния растений очень неравномерная, много свободных мест. Растения преимущественно низкорослые, слаборазветвленные. Имеются значительные повреждения вредителями, болезнями или неблагоприятными метеорологическими явлениями. Ожидается очень плохой урожай или его вовсе нет

Для учета региональных агрометеорологических особенностей исследуемого региона при обработке космических снимков с целью определения состояния посевов зерновых культур использовались материалы базы знаний, сформированной

при прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур. На основании средних многолетних значений урожайности зерновых культур (яровой пшеницы) за период с 2001 по 2011 г. тестовые хозяйства Новосибирской области были поделены на три группы. Анализ значений базы данных индексов NDVI каждой группы тестовых хозяйств показал, что чем меньше урожайность зерновых культур, тем меньше изменяется индекс NDVI в течение вегетационного периода, при увеличении урожайности диапазон индексов NDVI также увеличивается. Каждой группе хозяйств соответствует свой диапазон индексов NDVI на каждый день и своя динамика изменения индексов NDVI в течение вегетационного периода (разница между минимальным и максимальным значениями) [55, 96]. На рисунке 18 представлена динамика значений NDVI за вегетационный период 2017 г. по данным с КА Terra в сельскохозяйственных предприятиях трех групп уровня урожайности.

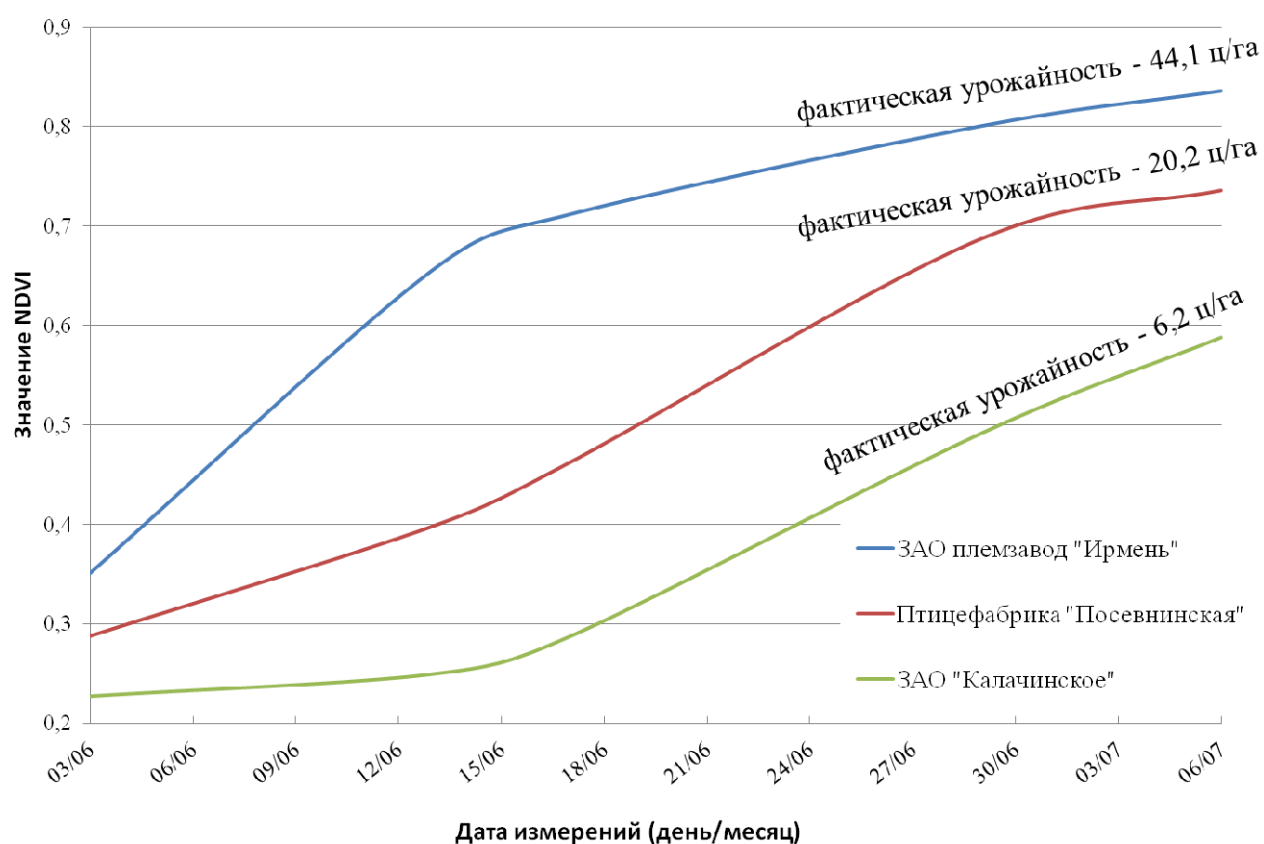


Рисунок 18 – Динамика значений NDVI по данным с КА Terra в сельскохозяйственных предприятиях трех групп по уровню урожайности (2017 г.)

Каждой градации оценки состояния посевов в соответствие была приведена своя группа тестовых хозяйств с определенным уровнем урожайности: плохому состоянию посевов соответствует группа хозяйств с низкой урожайностью, удовлетворительному состоянию посевов – группа хозяйств со средней величиной урожайности, хорошему состоянию посевов – группа хозяйств с урожайностью выше среднего. Для автоматизированного разделения значений индекса NDVI по трем градациям использовалась база данных (Приложение А), сформированная на основе обработки архива космических снимков за период с 2001 по 2011 г., множество сборов включали индексы NDVI, идентификаторы реперных точек, даты (день и год) измерения индекса вегетации. Затем определялись подмножества измерений, представляющих собой наборы данных с каждой реперной точки за отдельный вегетационный период.

После этого рассчитывались функции для определения разниц между максимальным и минимальным значениями индекса в каждой реперной точке. Далее выстраивались три множества характерных значений индексов NDVI для каждого состояния посевов. Множества ежегодных характерных значений NDVI объединялись в одно множество для каждой градации состояния посевов за все вегетационные периоды. На основании таких множеств выстраивались пороговые значения NDVI, которые позволили оценить состояние посевов зерновых культур в любой день вегетационного периода [55]. Таким образом, на основании анализа многолетних данных эмпирическим путем получено соответствие пороговых значений индекса NDVI каждой градации состояния посевов. Данное соответствие легло в основу методики обработки космических снимков для оценки состояния зерновых культур с учетом региональных особенностей.

Сущность усовершенствованной методики обработки данных ДЗЗ для определения состояния посевов зерновых культур представлена на рисунке 12. На первом этапе выполняется предварительная обработка оперативных снимков с КА Terra, позволяющая исключить изображения территорий, экранированных облачностью. На основании полученных изображений рассчитываются индексы NDVI с последующим совмещением индексного изображения с векторным слоем

пахотных земель. В результате распределения вегетационных индексов по трем градациям (в соответствии с пороговыми значениями) осуществляется оценка состояния посевов зерновых культур. На заключительном этапе формируется карта состояния посевов посредством совмещения информации о площади посевов различного состояния (в процентах) с тематическими слоями (элементами гидрографии, населенными пунктами, границами административных районов).

2.3 Методика обработки многоспектральных космических снимков для выявления пахотных земель

Достоверная оценка состояния посевов зерновых культур возможна только при четком определении сельскохозяйственных земель на всей исследуемой территории. Для выявления пахотных земель на региональном уровне была усовершенствована методика обработки данных ДЗЗ за счет совместного использования космических снимков низкого и среднего пространственного разрешения. По снимкам КА Terra определяются временные периоды, соответствующие перепахиванию сельскохозяйственных земель, снимки КА Landsat применяются для выявления границ используемых пахотных земель.

При возделывании сельскохозяйственных культур обеспечивается определенная система севооборота, которая обуславливает чередование вида произрастающих культур и паров и, как следствие этого, периодическое перепахивание земель [49]. Идея выявления используемых пахотных земель по данным ДЗЗ заключается в определении полей, на которых в течение вегетационного периода происходит периодическая вспашка. При интенсивной обработке сельскохозяйственных земель увеличивается частота их перепахивания, следовательно, чаще наблюдаются факты понижения вегетационной активности. Поэтому, для выявления используемых пахотных земель в первую очередь необходимо определить временной промежуток (с мая по сентябрь), в который чаще встречается минимальное покрытие пашни растительностью или полное ее отсутствие. В качестве индикатора минимального покрытия пахотных земель растительностью при выявлении по космическому снимку

служат значения индекса NDVI от 0,18 до 0,2. Данный показатель не позволяет однозначно выделить участки пашни, так как в указанный диапазон значений NDVI также попадает облачность и антропогенные объекты (объекты городской застройки, автомобильные дороги и др.). Поэтому необходимо задать дополнительные критерии отбора, учитывающие геометрические особенности сельскохозяйственных полей. В качестве таких критериев выбраны ограничение минимальной площади объекта и значение отношения периметра объекта к его площади.

Усовершенствованная методика обработки космических снимков для выявления используемых пахотных земель включает следующие этапы (рисунок 19).

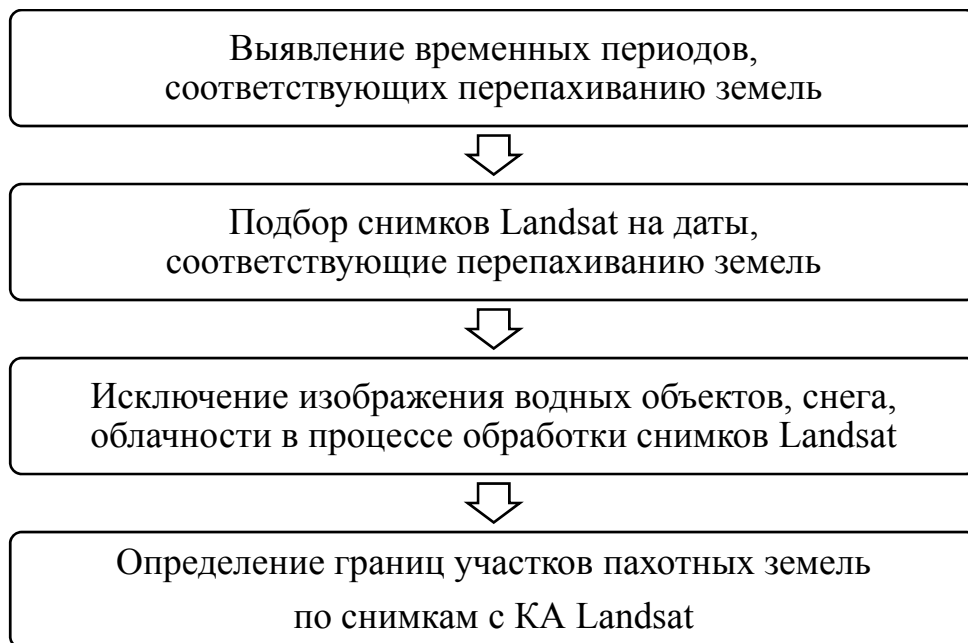


Рисунок 19 – Этапы обработки данных ДЗЗ для выявления пахотных земель

Для определения временных периодов, соответствующих вспашке земель, используются индексы NDVI в реперных точках, измеренные по снимкам КА Terra в автоматическом режиме. Далее производится подбор снимков КА Landsat на даты, соответствующие перепахиванию земель сельскохозяйственного назначения. Для исключения изображений водных объектов, снега и облачности в процессе обработки снимков КА Landsat применяются пороговые значения коэффициентов, содержащиеся в изображении оценки качества данных (BQA – Band

Quality Assessment). Существует набор стандартных значений коэффициентов (таблица 20), с помощью которых оценивается состояние атмосферы и принадлежность каждого пикселя изображения определенному типу покрытия [85].

Таблица 20 – Стандартные коэффициенты типов покрытия на изображении оценки качества данных (BQA) [85]

Значение коэффициента	Принадлежность пикселя изображения определенному типу покрытия				
	Облачность	Перистые облака	Снег / лед	Растительность	Водные объекты
61440	да	да	не определено	не определено	не определено
59424	да	возможно	возможно	не определено	возможно
57344	да	возможно	не определено	не определено	не определено
56320	да	нет	да	не определено	не определено
53248	да	нет	не определено	не определено	не определено
39936	возможно	нет	да	не определено	не определено
36896	возможно	нет	не определено	не определено	возможно
36864	возможно	нет	не определено	не определено	не определено
31744	нет	да	да	не определено	не определено
28672	нет	да	не определено	не определено	не определено
28590	нет	возможно	да	да	возможно
26656	нет	возможно	возможно	не определено	возможно
24576	нет	возможно	не определено	не определено	не определено
23552	нет	нет	да	не определено	не определено
20516	нет	нет	не определено	не определено	возможно
20512	нет	нет	не определено	не определено	возможно
20480	нет	нет	не определено	не определено	не определено

На завершающем этапе осуществляется определение векторных границ участков пахотных земель по снимкам КА Landsat с генерализацией полученных результатов для возможности дальнейшего их использования при определении состояния посевов по информации с КА Terra.

Таким образом, применение усовершенствованной методики обработки космических снимков позволяет выявить участки используемых пахотных земель (Приложение Б) для объективного определения состояния посевов зерновых культур. Сравнение результатов обработки снимков КА Landsat за два смежных трехлетних периода позволяет определить расположение заброшенных сельскохозяйственных земель (не обрабатывавшихся на протяжении трех лет).

Выводы по второму разделу

Усовершенствование методик обработки данных ДЗЗ в системе регионального мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур стало возможным благодаря использованию базы знаний, созданной при прогнозировании урожайности зерновых культур. Методика обработки космических снимков КА Terra для оценки состояния посевов зерновых культур основана на совместном использовании пороговых значений индекса NDVI и данных о выявленных пахотных землях. Методика обработки снимков КА Landsat для определения границ пахотных земель основана на учете региональных особенностей пороговых значений индекса NDVI, сезонности и периодичности обработки земель.

3 РЕЗУЛЬТАТ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМЕ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

3.1 Физико-географические особенности района исследования

Физико-географическая характеристика Западной Сибири. Земледельческая территория Западной Сибири расположена в следующих климатических зонах: таежно-лесная, лесостепная и степная. На урожайность сельскохозяйственных культур оказывают влияние различные факторы, среди которых тип и питательный режим почвы, климатические особенности, количество и разновидность сорняков, наличие вредителей и болезней, система обработки почвы и прочие факторы.

Для территории Западной Сибири характерен резко континентальный климат, что оправдывает утверждение о принадлежности ее к зоне рискованного земледелия. Между природными подзонами существуют значительные климатические различия. Так, например, среднемноголетняя сумма температур выше 10 °С варьируется в южно-таежно-лесной подзоне от 1 500 до 1 700 °С, а в северостепной – от 2 000 до 2 200 °С. Продолжительность периода с температурами выше 10 °С также отличается в этих подзонах: от 113 дней в году в первой подзоне до 130 дней во второй. Среднегодовое количество осадков меняется от 240 до 300 мм и от 400 до 600 мм в зависимости от зоны, глубина промерзания почвы колеблется от 0,5 до 2,0 м. Распределение температур и осадков неравномерно по сезонам и территориям. Пахотные земли из-за различий рельефа, количества осадков и режима ветра подвержены ветровой и водной эрозии почвы [26].

Характеристика условий Новосибирской области. В качестве района исследования выбраны сельскохозяйственные угодья Новосибирской области, расположенной на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Площадь Новосибирской области составляет порядка 178 тыс. км², административно-территориальное деление Новосибирской области представлено 30 административными районами.

Данной территории свойственен континентальный климат с 4 сезонами года. Ярko выражена продолжительная зима с низкими температурами и устойчивым снежным покровом от 20 до 70 см, который держится от 150 до 180 дней. Средняя продолжительность летнего периода составляет 100 дней: на севере – от 90 до 100 дней, на юге – от 120 до 130 дней. Переходные сезоны характеризуются неустойчивой погодой и периодическими заморозками. Среднегодовое количество осадков составляет от 290 до 540 мм, при этом 70 % осадков выпадает в виде дождя. Направление ветров в основном южное и юго-западное. Для южных степных районов Новосибирской области, прилегающих к территории Кулундинской равнины, характерны частые засухи и суховеи. Вегетационный период составляет от 144 до 148 дней на севере области и от 158 до 163 дней в южных районах.

Территория Новосибирской области расположена в лесостепной, степной и таежной природных зонах. Растительный состав отличается большим разнообразием и зональностью распределения, лесные массивы занимают около 26 % площади. На территории области протекает около 300 рек (главными реками являются Обь и Омь), находится более 2 500 озер и много болот [1].

На долю Новосибирской области приходится около 25 % от площадей всех сельскохозяйственных угодий Западной Сибири, посевные площади составляют около 2,4 млн га. В структуре посевных площадей преобладают зерновые и зернобобовые культуры (около 65 % от всех возделываемых культур), далее по занимаемым площадям следуют кормовые культуры (30 %), под посевы технических культур отведено около 3 %, картофель и овощные культуры занимают около 2 % (рисунок 20). Зерновые культуры подразделяются на озимые и яровые. На территории нашей области выращиваются следующие: озимая и яровая пшеница, озимая и яровая рожь, озимая и яровая тритикале, кукуруза на зерно, озимый и яровой ячмень, овес и др. К зернобобовым культурам относятся горох, фасоль, чечевица, бобы кормовые и прочие культуры. Лидирующие позиции среди возделываемых зерновых культур занимает яровая и озимая пшеница (около 46 %), яровой ячмень (около 8 %) и овес (менее 9 %). Кормовые культуры представлены

корнеплодными и бахчевыми культурами, культурами на силос, кукурузой, однолетними и многолетними травами. Большие площади занимают однолетние и многолетние травы (порядка 26 %), что говорит о развитии животноводства в Новосибирской области. К техническим культурам относятся цикорий, свекла сахарная, хлопок, эфирно-масличные и лекарственные культуры, а также различные масличные культуры [33, 43].

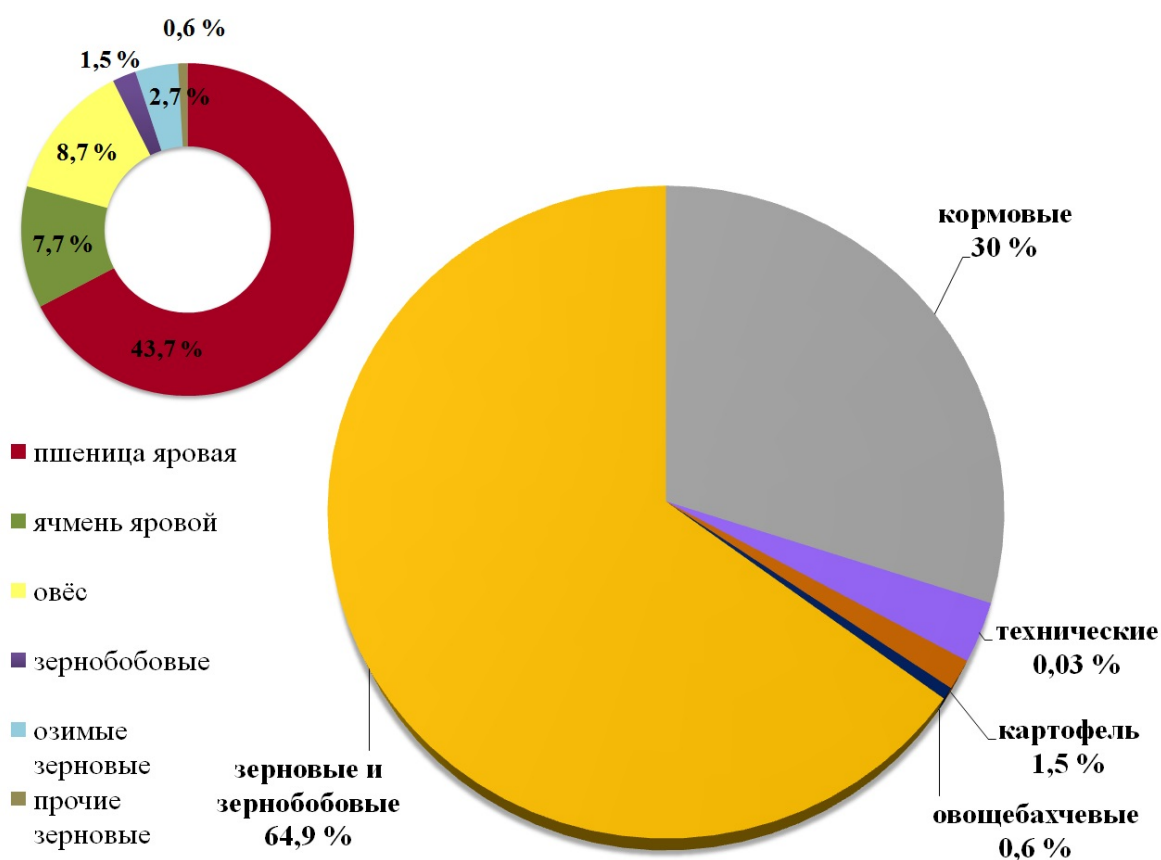


Рисунок 20 – Структура посевных площадей Новосибирской области по данным Федеральной службы государственной статистики [43]

3.2 Результаты обработки космических снимков для определения состояния посевов зерновых культур юга Западной Сибири

Для территории Новосибирской области при прогнозировании ожидаемой урожайности зерновых культур с 2005 по 2018 г. сформирована база знаний (см. 2.1). С 2012 по 2018 г. накапливалась информация для территорий Алтай-

ского края, Омской и Кемеровской областей (архив космических снимков, многолетние статистические данные об урожайности зерновых культур). Формирование баз данных для территории Красноярского края начато с 2017 г. (архивы спутниковых данных, измеренных индексов вегетации в реперных точках, статистические данные).

С использованием сведений баз знаний ежегодно выполнялась оценка состояния зерновых культур по снимкам КА Terra для южных территорий Западной Сибири: Омской, Новосибирской и Кемеровской областей, а также Алтайского и Красноярского краев.

Для сельскохозяйственных угодий большинства административных единиц в течение каждого вегетационного периода с 2012 по 2018 г. созданы карты состояния посевов зерновых культур на основании использования пороговых значений индекса вегетации. Данные карты отражают информацию о площадях пахотных земель (в процентах), соответствующих различному состоянию посевов и позволяют оценить общее развитие зерновых культур. Созданные карты состояния посевов зерновых культур в оперативном порядке предоставляются в отделы агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ (Новосибирская, Кемеровская, Омская области, Алтайский и Красноярский края). На рисунках 21, 22 в качестве примеров представлены карты состояния посевов зерновых культур для территорий Алтайского края и Новосибирской области.

На данных картах зеленый цвет соответствует хорошему состоянию посевов, желтый – удовлетворительному, красный – плохому. Подобные карты оценки состояния посевов также создаются для административных районов Новосибирской области (рисунок 23, 24).

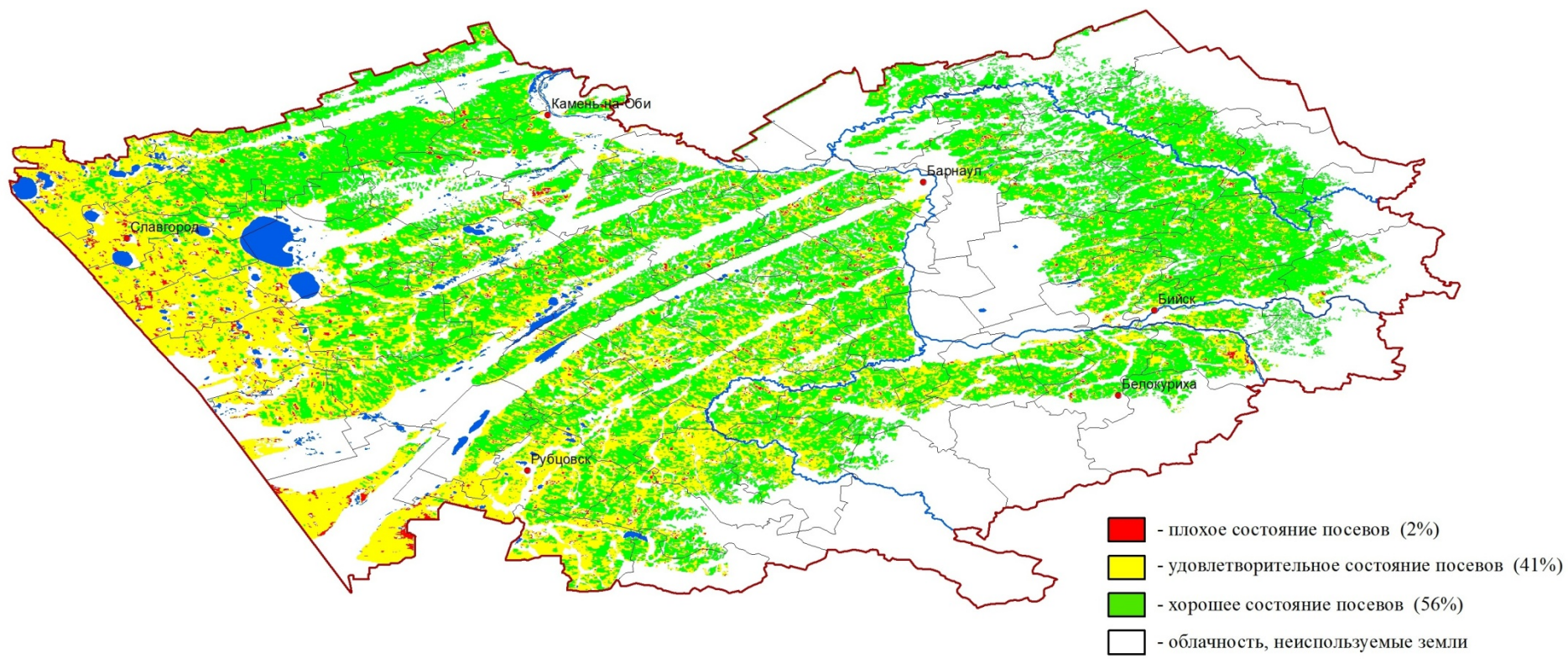


Рисунок 21 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур в Алтайском крае на 10 июля 2018 г. (по данным с КА Terra)

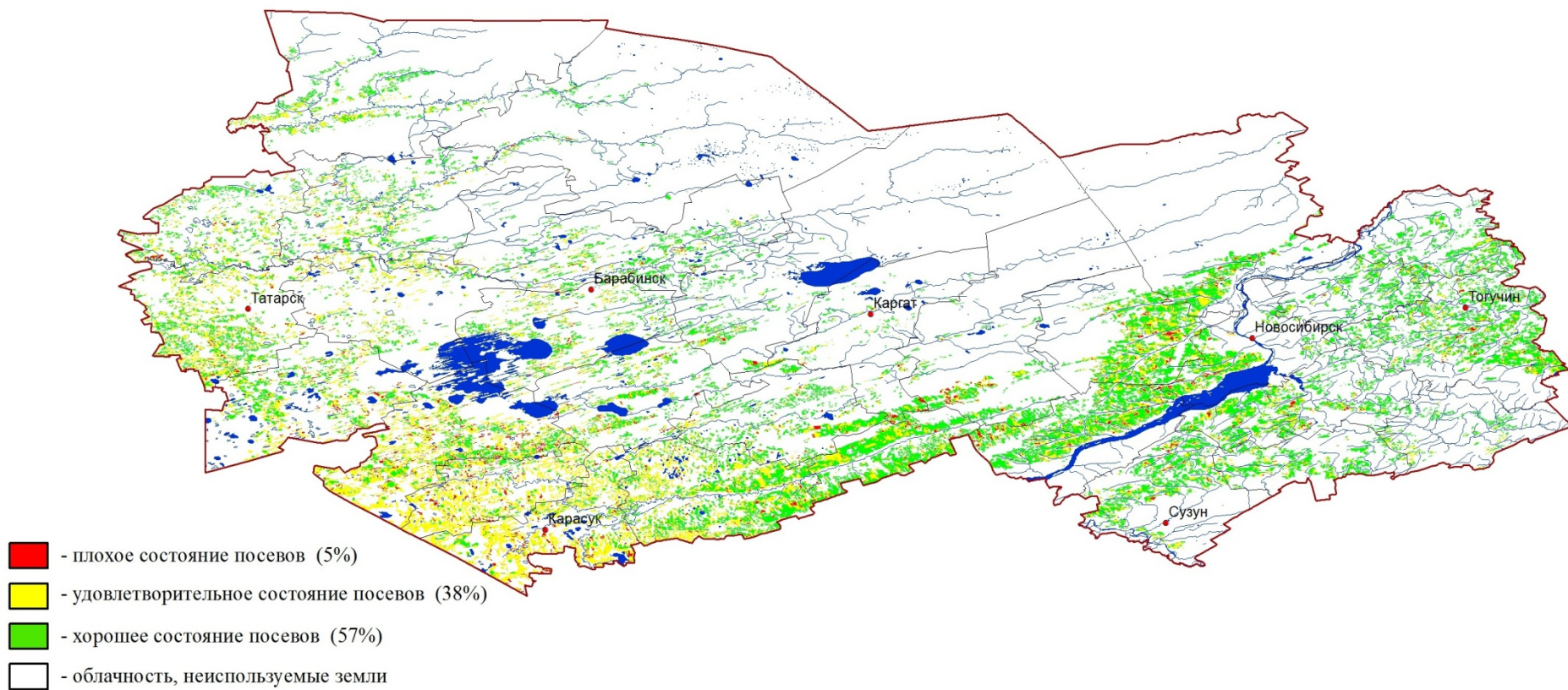


Рисунок 22 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур в Новосибирской области на 16 июля 2018 г. (по данным с КА Terra)

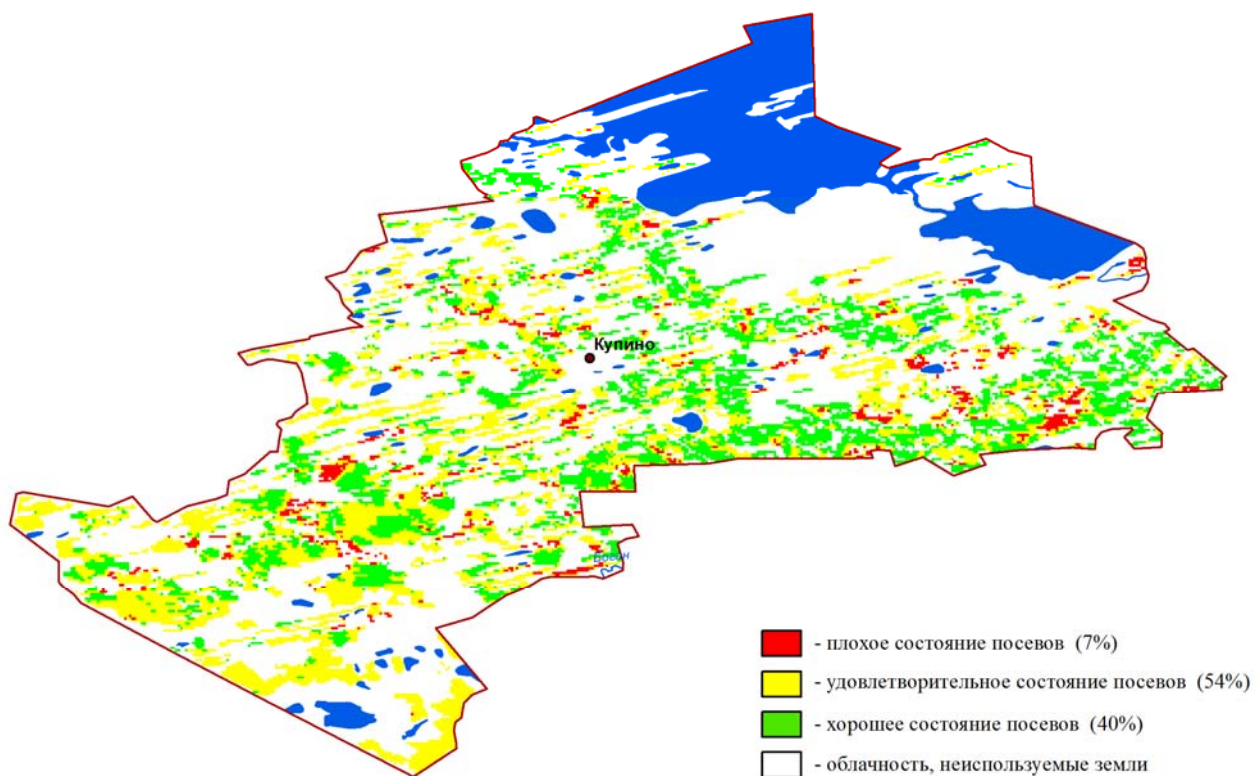


Рисунок 23 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур в Купинском районе Новосибирской области на 10 июля 2018 г. (по данным с КА Terra)

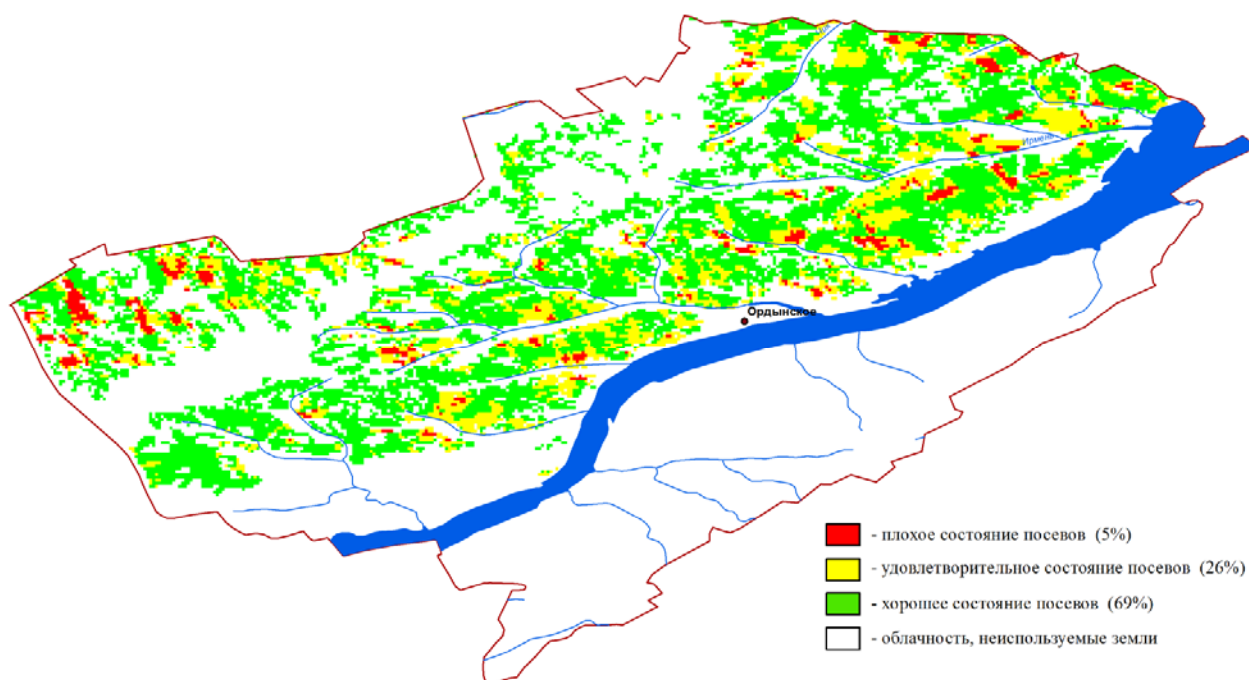


Рисунок 24 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур в Ордынском районе Новосибирской области на 16 июля 2018 г. (по данным с КА Terra)

Созданные карты состояния посевов зерновых культур являются комплексным показателем влияния климатических условий (засуха, град и т. д.) и внешних факторов (повреждение болезнями и вредителями, наличие сорняков и др.) на формирование и развитие посевов [56].

Помимо создания карт состояния посевов для крупных административных единиц, реализованная методика обработки космических снимков позволяет также оценивать состояние посевов на отдельных полях сельскохозяйственных предприятий с помощью измерения индексов NDVI в реперных точках. На основании данных о расположении зерновых культур по каждому отдельному полю ежегодно составляется список реперных точек, в которых в автоматическом режиме измеряются индексы NDVI, рассчитанные по данным КА Terra. Величина индекса вегетации каждой реперной точки классифицируется по трем градациям с использованием пороговых значений индексов для каждого класса (таблица 21).

Таблица 21 – Измеренные индексы NDVI зерновых культур по данным с КА Terra (ЗАО «Политотдельское» Тогучинского района, 2015 г.)

Номер точки	Даты измерений, 2015 г.					
	8 июня	12 июня	19 июня	26 июня	30 июня	17 июля
80	0,481	0,645	0,822	0,729	0,841	0,856
81	0,368	0,519	0,750	0,823	0,820	0,835
82	0,351	0,511	0,786	0,838	0,824	0,872
94	0,380	0,575	0,579	0,704	0,777	0,858
103	0,483	0,690	0,738	0,767	0,769	0,820
104	0,397	0,519	0,716	0,791	0,801	0,846
105	0,390	0,530	0,729	0,821	0,816	0,869
109	0,696	0,751	0,755	0,766	0,771	0,791
110	0,394	0,506	0,643	0,801	0,774	0,832
111	0,438	0,567	0,700	0,823	0,779	0,823
112	0,325	0,415	0,529	0,693	0,728	0,744

Для каждой даты, на основании измеренных значений, по каждому полю рассчитывается среднее значение индекса NDVI и определяется соответствие состояния посевов одной из трех градаций. На основании данной информации формируется карта состояния посевов для отдельного сельскохозяйственного пред-

приятия. На рисунке 25 представлена карта состояния посевов зерновых культур в ЗАО «Политотдельское» Тогучинского района Новосибирской области за 8 июня 2015 г.

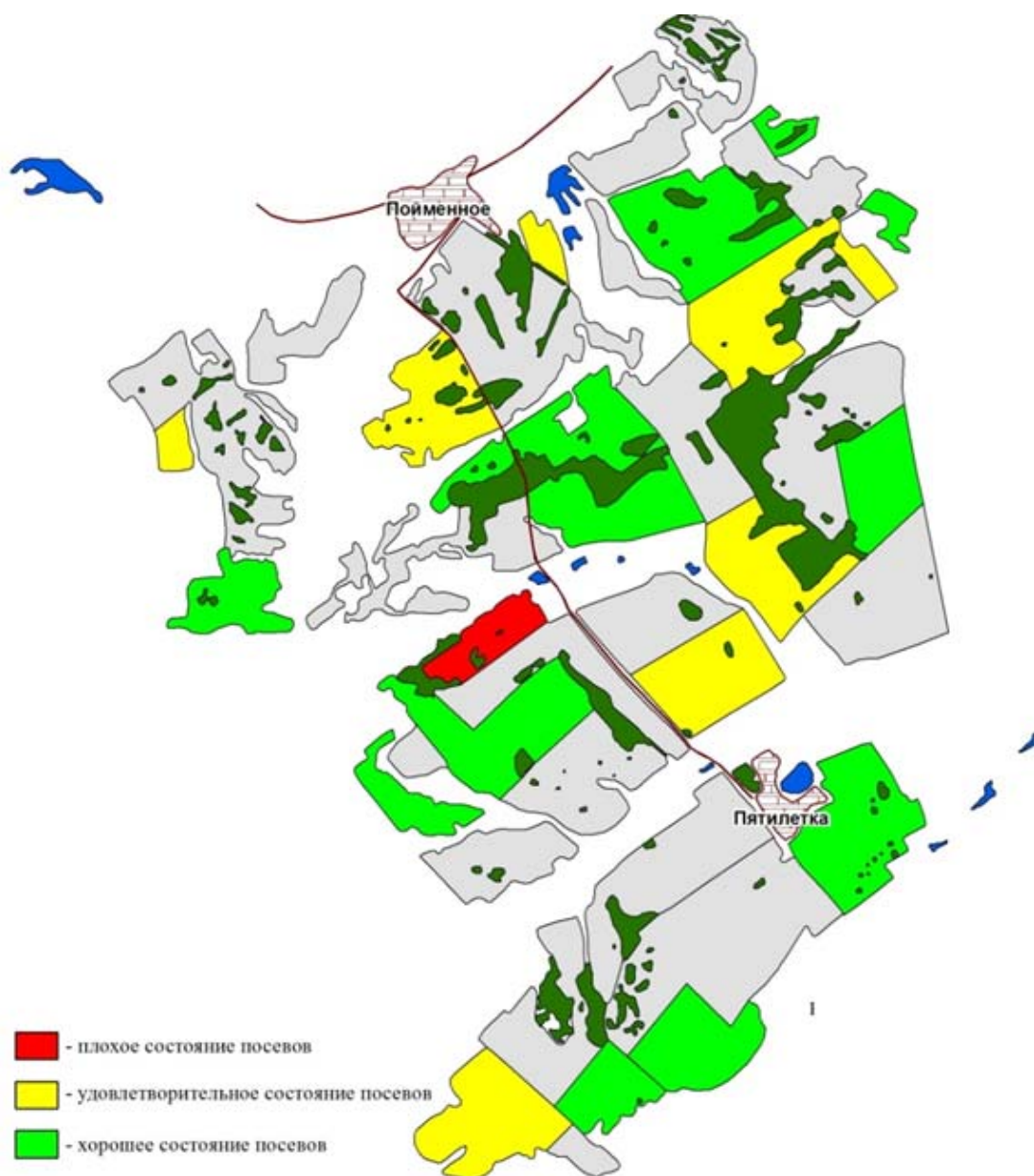


Рисунок 25 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур для отдельного сельскохозяйственного предприятия

3.3 Обработка спутниковых данных среднего пространственного разрешения для определения используемых пахотных земель

Для определения используемых пахотных земель был произведен анализ значений индексов NDVI в ряде хозяйств Новосибирской области за период с 2013 по 2016 г., на основании которого выявлены периоды вспашки земель [29]. В качестве тестовых сельскохозяйственных предприятий были выбраны пять хозяйств Ордынского района, семь хозяйств Сузунского района, пять хозяйств Коченевского района и пять хозяйств Искитимского района. На рисунке 26 приведены графики, отражающие характер изменения индексов NDVI на полях с известными посевами и тестовых полях с неизвестной возделываемой культурой в Ордынском районе Новосибирской области за 2016 г.

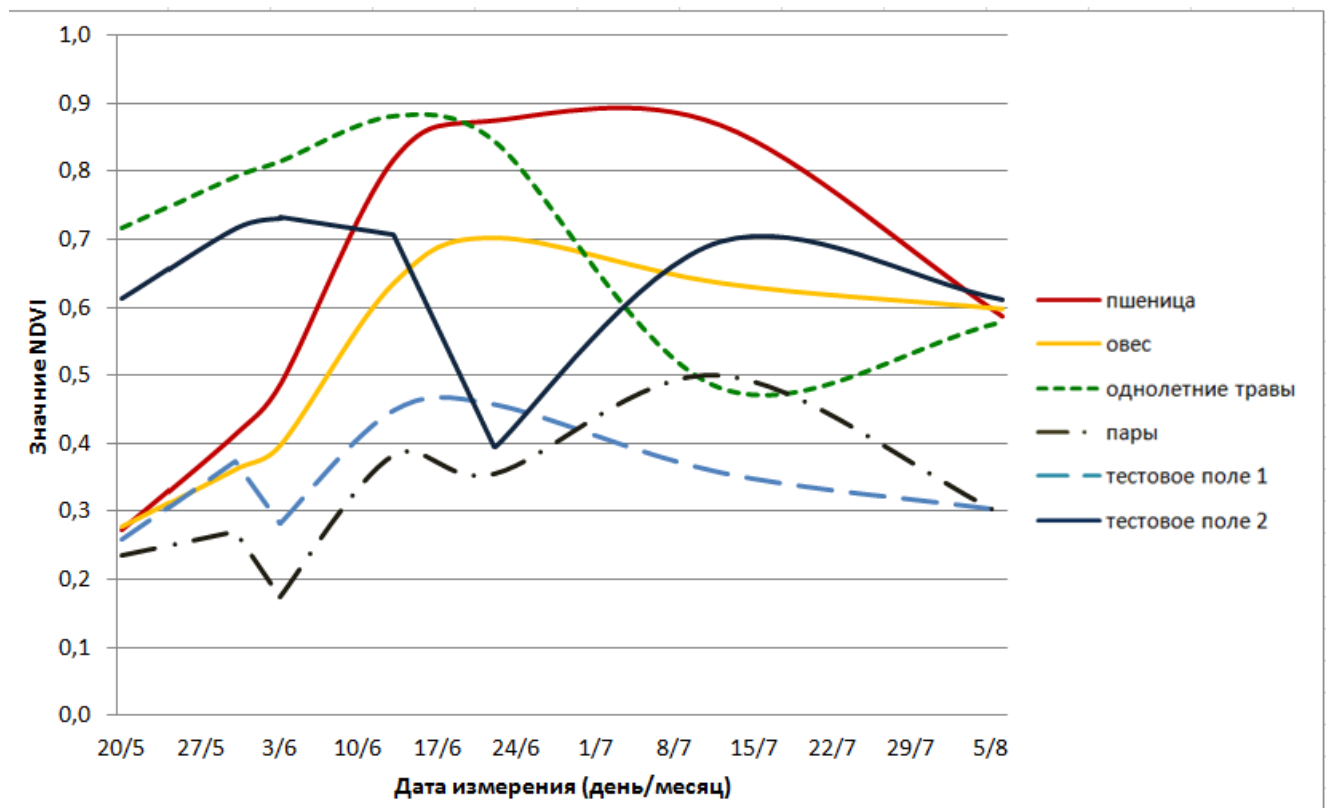


Рисунок 26 – Динамика значений NDVI по данным с КА Terra для определения периодов перепахивания земель

Анализ графиков изменения индексов вегетации на рисунке 26 показал:

- за вегетационный период заметное снижение вегетационной активности наблюдалось на паровом поле, тестовом поле 1 и тестовом поле 2;
- перепахивание земли производилось на паровом поле в первой декаде июня, на тестовом поле 2 – в третьей декаде июня;
- индекс вегетации вспаханной почвы в разные промежутки времени принимает разные значения в зависимости от состояния почвы, климатических факторов и даты осуществления съемки.

Анализ динамики значений индексов NDVI на территории тестовых хозяйств за период с 2013 по 2016 г. позволил определить наиболее типичные для исследуемых районов временные периоды перепахивания земель и соответствующие им диапазоны значений индекса вегетации (таблицы 22–25).

Таблица 22 – Диапазоны значений NDVI по снимкам Terra в зависимости от периодов перепахивания земель в 2013 г.

Хозяйства Искитимского района				
Временной период	26–28 мая	7–8 июня	22–26 июня	11–22 июля
Диапазон значений NDVI	0,26–0,35	0,30–0,35	0,30–0,45	0,32–0,36
Хозяйства Коченевского района				
Временной период	26–27 мая	6–7 июня	22–26 июня	11–22 июля
Диапазон значений NDVI	0,20–0,35	0,25–0,35	0,30–0,45	0,28–0,36
Хозяйства Ордынского района				
Временной период	26–27 мая	5–7 июня	22–26 июня	11–22 июля
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,35	0,30–0,45	0,28–0,36
Хозяйства Сузунского района				
Временной период	26–27 мая	4–8 июня	22–26 июня	11–22 июля
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,35	0,30–0,45	0,28–0,40

Таблица 23 – Диапазоны значений NDVI по снимкам Terra
в зависимости от периодов перепахивания земель в 2014 г.

Хозяйства Искитимского района						
Временной период	20–27 мая	5–7 июня	11–20 июня	23–27 июня	11–23 июля	5–7 августа
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,35	0,30–0,45	0,30–0,45	0,28–0,40	0,30–0,40
Хозяйства Коченевского района						
Временной период	20–27 мая	12–16 июня	21–27 июня	6–8 июля	12–24 июля	–
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,35	0,25–0,40	0,30–0,40	0,28–0,40	–
Хозяйства Ордынского района						
Временной период	20–27 мая	12–21 июня	25–27 июня	6–8 июля	11–24 июля	5–8 августа
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,45	0,30–0,45	0,30–0,40	0,28–0,40	0,26–0,40
Хозяйства Сузунского района						
Временной период	20–27 мая	11–20 июня	–	23–27 июня	11–24 июля	–
Диапазон значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,45	–	0,30–0,45	0,30–0,45	–

Таблица 24 – Диапазоны значений NDVI по снимкам Terra
в зависимости от периодов перепахивания земель в 2015 г.

Хозяйства Искитимского района						
Временной период	24–26 мая	5–8 июня	18–26 июня	1–2 июля	16–23 июля	1–6 августа
Диапазон значений NDVI	0,25–0,35	0,28–0,35	0,30–0,45	0,30–0,45	0,30–0,45	0,30–0,40
Хозяйства Коченевского района						
Временной период	5–8 июня	19 июня – 2 июля	16–21 июля	1–5 августа	–	–
Диапазон значений NDVI	0,28–0,35	0,28–0,45	0,25–0,4	0,25–0,4	–	–
Хозяйства Ордынского района						
Временной период	22–27 мая	4–8 июня	21 июня – 1 июля	13–21 июля	1–4 августа	–
Диапазон значений NDVI	0,22–0,3	0,28–0,35	0,28–0,45	0,3–0,45	0,25–0,4	–
Хозяйства Сузунского района						
Временной период	5–7 июня	17 июня – 2 июля	15–20 июля	1–6 августа	–	–
Диапазон значений NDVI	0,25–0,35	0,28–0,45	0,3–0,4	0,25–0,4	–	–

Таблица 25 – Диапазоны значений NDVI по снимкам Terra в зависимости от периодов перепахивания земель в 2016 г.

Хозяйства Искитимского района					
Временной период	20–27 мая	3–12 июня	23–30 июня	18–23 июля	3–7 августа
Диапазон значений NDVI	0,2–0,3	0,25–0,35	0,3–0,45	0,28–0,4	0,3–0,4
Хозяйства Коченевского района					
Временной период	20–27 мая	5–12 июня	3–6 августа	–	–
Диапазон значений NDVI	0,2–0,3	0,25–0,35	0,3–0,4	–	–
Хозяйства Ордынского района					
Временной период	20–27 мая	3–12 июня	21–23 июня	11–14 июля	3–6 августа
Диапазон значений NDVI	0,2–0,3	0,25–0,35	0,3–0,45	0,3–0,4	0,3–0,4
Хозяйства Сузунского района					
Временной период	20–27 мая	5–12 июня	23–28 июня	17–23 июля	3–7 августа
Диапазон значений NDVI	0,2–0,3	0,25–0,35	0,28–0,45	0,28–0,4	0,3–0,4

На основании обобщения результатов анализа значений индекса вегетации по каждому тестовому хозяйству выявлены временные периоды перепахивания земель и соответствующие им диапазоны значений индекса NDVI (рисунок 27).

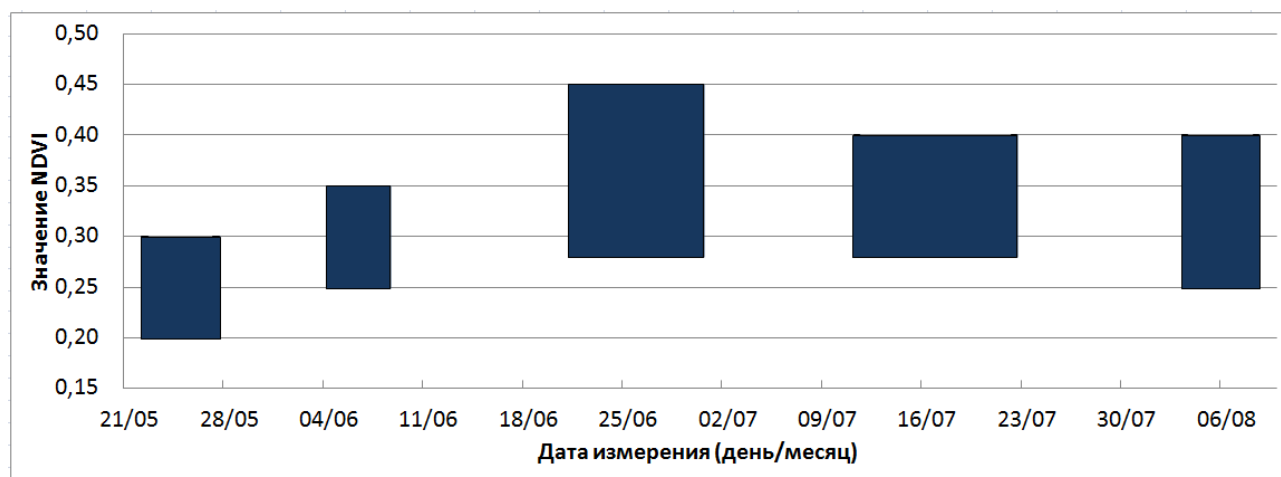


Рисунок 27 – Установленные диапазоны значений NDVI по снимкам КА Terra в зависимости от периодов перепахивания земель

Для определения участков используемых пахотных земель в соответствии с указанными на рисунке 27 временными периодами осуществлен выбор космических снимков КА Landsat, по которым рассчитаны индексы NDVI. При ежедневной оперативной обработке снимков КА Landsat для выявления используемых пахотных земель на территории Новосибирской области в течение вегетационного периода в среднем необходимо обработать спутниковые данные за 154 дня. Применение полученных временных периодов позволяет в четыре раза сократить количество обрабатываемых снимков, что обеспечивает оперативность получения сезонных результатов. С использованием диапазона значений индекса вегетации (см. рисунок 27) выявлены участки обрабатываемой пашни, после чего была выполнена генерализация полученных результатов для дальнейшего их использования при обработке снимков КА Terra в целях оценки состояния посевов зерновых культур (см. рисунок 12). В качестве критериев генерализации участков были заданы параметры, отражающие геометрические особенности сельскохозяйственных полей. Данные критерии были получены эмпирическим путем, на основании фактических величин тестовых полей и пространственного разрешения снимков КА Terra. Для надежного определения состояния посевов зерновых культур минимальная площадь полей была задана равной 75 га, а величина отношения периметра объекта к его площади – меньше либо равной $1/50$. На рисунке 28 представлен фрагмент результата обработки спутниковых данных с КА Landsat для выявления пахотных земель на территории Новосибирской области.

На рисунке 28 пахотные земли показаны зеленым цветом, желтым цветом отмечены объекты, которые не соответствуют критерию отношения периметра к площади объекта, а серым цветом – объекты с площадью меньше чем 75 га.

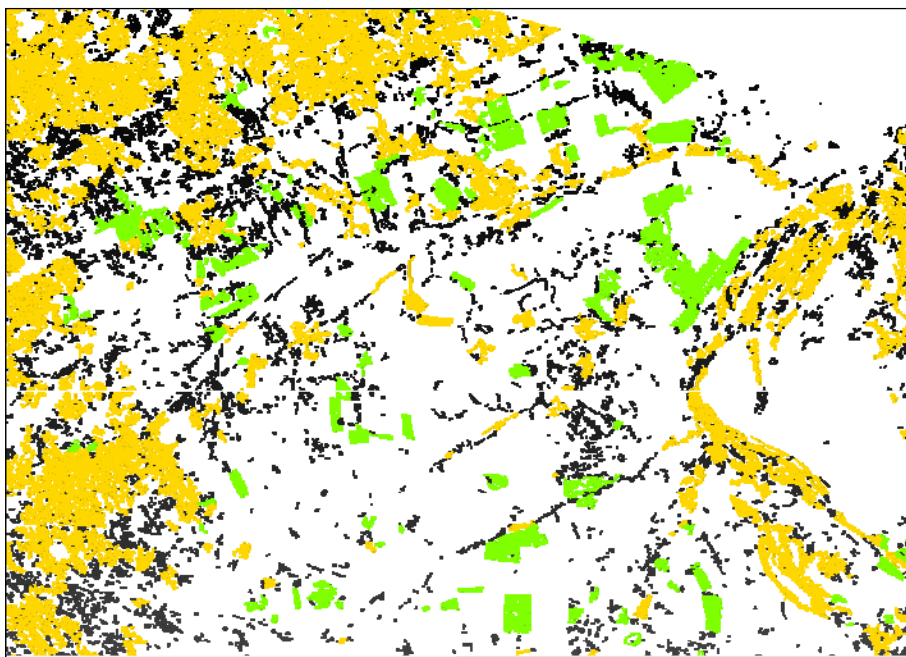


Рисунок 28 – Фрагмент снимка КА Landsat с участками
выявленных пахотных земель

Таким образом, в результате обработки космических снимков КА Landsat за трехлетний период (с 2015 по 2017 г.) был подготовлен векторный слой используемых пахотных земель на территорию Новосибирской области (рисунок 29), который применялся в процедуре обработки космических снимков с целью определения состояния посевов зерновых культур.

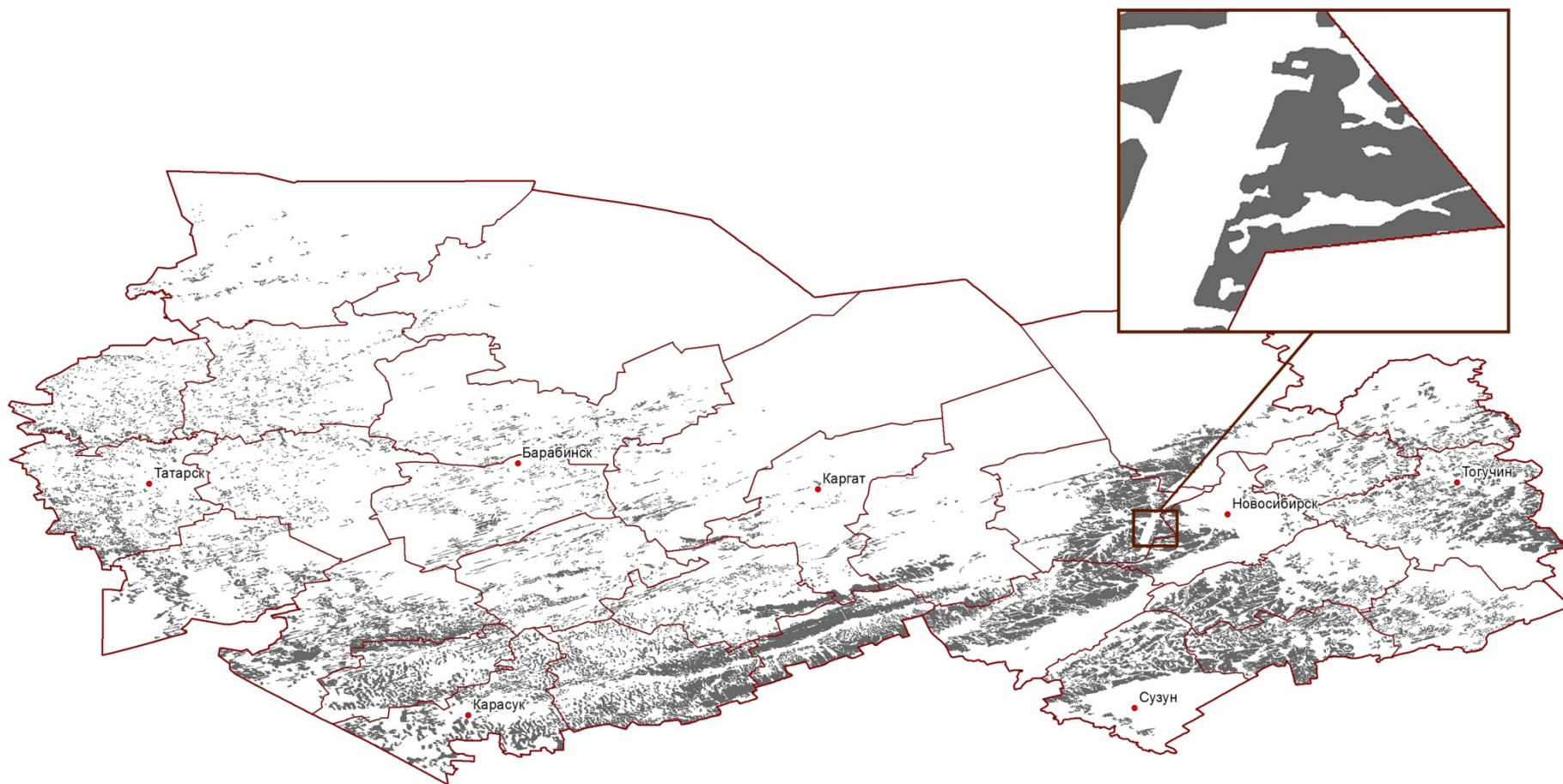


Рисунок 29 – Векторный слой выявленных пахотных земель
Новосибирской области по снимкам КА Landsat

3.4 Оценка достоверности результатов обработки космических снимков

В соответствии РД 52.33.217–99 [49] специалистами-агрометеорологами гидрометеорологических станций совместно с работниками сельскохозяйственных предприятий проводятся наземные маршрутные обследования посевов сельскохозяйственных культур с целью определения их состояния. В качестве оценки усовершенствованных методик обработки данных ДЗЗ проведен сравнительный анализ сведений о состоянии посевов зерновых культур, полученных с использованием космических снимков (КА Terra и Landsat), с данными маршрутных обследований. В результате сравнения было выявлено, что средняя величина разностей площадей посевов (в процентах) с различным состоянием зерновых культур, полученных дистанционным и контактными методами, за годы проведения наблюдений (с 2012 по 2018 г.) составила: по Новосибирской области – 11 %, по Алтайскому краю – 11 %, по Кемеровской области – 8 %. Результаты выполненных экспериментальных исследований подтверждают достоверность усовершенствованных методик обработки космических снимков и возможность их практического применения в системе регионального мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

Выводы по третьему разделу

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что предложенные методики позволяют увеличить оперативность обработки космических снимков среднего пространственного разрешения и обеспечить высокую надежность оценки состояния посевов зерновых культур с учетом региональных особенностей исследуемой территории. Созданные карты состояния посевов применяются в оперативной работе специалистами отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ (Новосибирская, Кемеровская, Омская области, Алтайский и Красноярский края).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги проверенного исследования заключаются в следующем:

- выполнен анализ существующих методик обработки спутниковых данных с целью оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель, в результате которого установлена необходимость совершенствования системы космического мониторинга сельскохозяйственных земель с учетом региональных особенностей и агроклиматических условий исследуемых территорий;
- усовершенствована методика обработки космических снимков с КА Terra для определения состояния посевов зерновых культур, отличающаяся от существующей использованием пороговых значений индекса вегетации и данных о выявленных пахотных землях, что обеспечивает повышение достоверности и надежности регионального мониторинга сельскохозяйственных угодий;
- выполнен анализ сезонной изменчивости вегетации тестовых посевов на территории Новосибирской области по данным с КА Terra, позволивший установить временные периоды перепаживания земель сельскохозяйственного назначения и соответствующие им диапазоны индексов вегетации;
- усовершенствована методика обработки мультиспектральных спутниковых изображений для выявления границ пахотных земель, основанная на учете региональных особенностей пороговых значений индекса вегетации, сезонности и периодичности обработки земель, что позволяет повысить оперативность обработки снимков среднего пространственного разрешения и обеспечить высокую достоверность оценки состояния посевов зерновых культур;
- проведены экспериментальные исследования усовершенствованных методик обработки данных ДЗЗ по оценке состояния сельскохозяйственных культур на юге Западной Сибири, которые подтвердили возможность их использования при ведении регионального мониторинга состояния посевов. Созданные карты состояния посевов зерновых культур применяются на практике специалистами отдела

агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ (Новосибирская, Кемеровская, Омская области, Алтайский и Красноярский края).

Таким образом, в результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель, направленная на разработку усовершенствованных методик обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, позволяющих повысить достоверность оценки состояния посевов, достигнута.

Методики обработки космических снимков рекомендуется использовать для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур на других территориях с учетом их региональных агрометеорологических особенностей.

Перспективы дальнейших исследований состоят в совершенствовании методик обработки данных ДЗЗ для выполнения мониторинга сельскохозяйственных земель на локальном уровне с использованием аэрокосмических снимков высокого пространственного разрешения и гиперспектральных спутниковых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 АГРИЭН (Аграрная интернет-энциклопедия) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.agrien.ru>.

2 Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа [Текст] / А. И. Страшная, С. А. Барталев, Т. А. Максименкова, О. В. Чуб, В. А. Толин, Д. Е. Плотников, Н. А. Богомолова // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 85–105.

3 Агромониторинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://agro.ikd.kiev.ua>.

4 Антонов, С. А. Опыт использования космических технологий для нужд сельского хозяйства Ставропольского края [Текст] / С. А. Антонов // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 49–54.

5 Асмус, В. В. Программные технологии в космическом мониторинге ледяного покрова Арктики [Текст] / В. В. Асмус, В. А. Кровотынцев, В. П. Пяткин // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 6. – С. 680–689.

6 Асмус, В. В. Программный комплекс обработки данных дистанционного зондирования Земли в прикладных задачах мониторинга природной среды [Текст] / В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. П. Пяткин // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 5. – С. 19–26.

7 Барталев, С. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова [Текст] / С. А. Барталев, Е. А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 197–214.

8 Береза, О. В. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных [Текст] / О. В. Береза, А. И. Страшная, Е. А. Лупян // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 18–30.

9 Веб-сервис глобального спутникового мониторинга сельского хозяйства VEGA-GEOGLAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://vega.geoglam.ru>.

10 ВЕГА-PRO. Спутниковый сервис анализа вегетации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://pro-vega.ru>.

11 Вегетационные индексы [Текст] // Геоматика. – 2011. – № 2 (11). – С. 98–102.

12 Генин, В. А. Опыт использования мультиспектральных космических снимков для дифференцированного внесения удобрений [Текст] / В. А. Генин, Н. В. Клебанович // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 26–31.

13 Геоаналитика.Агро [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://agro.geoanalitika.com/ru/>.

14 «Геоаналитика.Агро» – веб-сервис для поддержки принятия решений в сельском хозяйстве [Текст] / Справочный раздел // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 72–80.

15 Глушкова, Н. В. Использование ГИС и ДЗ для анализа антропогенной трансформации пригородных лесных экосистем на примере Новосибирского Академгородка [Текст] / Н. В. Глушкова, Н. Н. Лацинский, И. Д. Зольников // Геология и минерагения Северной Евразии : материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР (Новосибирск, 3–5 октября 2017 г.). – Новосибирск, 2017. – С. 63–64.

16 Горбачева, Е. Н. «Геоаналитика.Агро»: данные дистанционного зондирования Земли как источник агрометеорологической информации [Текст] / Е. Н. Горбачева, А. С. Скачкова // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 56–60.

17 Государственная корпорация по космической деятельности РОСКОСМОС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.roscosmos.ru>.

18 Дворкин, Б. А. Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel [Текст] / Б. А. Дворкин // Геоматика. – 2011. – № 3 (12). – С. 14–26.

19 Дворкин, Б. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли [Текст] / Б. А. Дворкин, С. А. Дудкин // Геоматика. – 2013. – № 2 (19). – С. 16–36.

20 Дворкин, Б. А. Новый спутник NPP продолжит комплексное наблюдение за Землей [Текст] / Б. А. Дворкин // Геоматика. – 2011. – № 4 (13). – С. 26–34.

21 Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS [Текст] / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт, И. Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Вып. 2. – Т. 5. – С. 228–236.

22 Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов [Текст]. – М. : Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.

23 Использование многолетних спутниковых данных различного разрешения для комплексной оценки состояния растительного покрова территории Казахстана [Текст] / Л. Ф. Спивак, А. Г. Терехов, И. С. Витковская, М. Ж. Батырбаева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Вып. 6. – Т. 2. – С. 450–458.

24 Использование спутниковой информации MODIS в оперативной агрометеорологии [Текст] / А. Д. Клещенко, В. М. Лебедева, Т. А. Найдина, О. В. Савицкая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 143–154.

25 Казяк, Е. В. Спектральные преобразования космических снимков Landsat 8 для картографирования растительности агроэкосистем [Текст] / Е. В. Казяк, А. В. Лещенко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в

2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 79–83.

26 Каличкин, В. К. Выбор приема основной (зяблевой) обработки почвы по агроэкологическим факторам [Текст] : практ. пособие / В. К. Каличкин, Ю. П. Филимонов, Л. Н. Иодко ; РАСХН. Сиб. отд-ние. ГНУ СибНИИЗХим. – Новосибирск, 2005. – 20 с.

27 Клещенко, А. Д. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы [Текст] / А. Д. Клещенко, Т. А. Найдина, Т. А. Гончарова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 259–268.

28 Кулик, Е. Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра [Текст] / Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 134–139.

29 Кулик, Е. Н. Распознавание пахотных земель на основе сезонной изменчивости характеристик растительного покрова [Текст] / Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 3–6.

30 Лагутин, А. А. Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные [Текст] : учеб. пособие для слушателей молодежной школы-семинара / А. А. Лагутин, Р. И. Райкин, Т. Н. Чимитдоржиев. – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2013. – 151 с.

31 Леонтьев, А. А. Система спутникового мониторинга состояния полей и прогнозирования урожайности [Текст] / А. А. Леонтьев // Геоматика. – 2013. – № 2 (19). – С. 77–79.

32 Малинников, В. А. Космический мониторинг окружающей среды застраиваемых территорий на примере города Москвы [Текст] / В. А. Малинников, В. В. Беленко // Вестник РАЕН. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 100–111.

33 Министерство сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mcx.ru>.

34 Михайлов, А. П. Фотограмметрия [Текст] : учебник для вузов / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев. – М. : МИИГАиК, 2016. – 294 с.

35 Михайлов, С. И. Применение данных дистанционного зондирования Земли для решения задач в области сельскохозяйственного производства [Текст] / С. И. Михайлов // Земля из космоса. Наиболее эффективные решения. – Вып. 9. – Весна 2011. – С. 17–23.

36 Муратова, Н. Р. Опыт пятилетнего оперативного мониторинга сельскохозяйственных угодий Северного Казахстана с помощью спутниковых данных [Текст] / Н. Р. Муратова, А. Г. Терехов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Вып. 4. – Т. 2. – С. 277–283.

37 Мышляков, С. Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства [Текст] / С. Г. Мышляков // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 16–24.

38 Мышляков, С. Г. «Геоаналитика.Агро» – инновационное решение для сельскохозяйственного мониторинга [Текст] / С. Г. Мышляков, А. А. Глотов // Геоматика. – 2015. – № 2 (27). – С. 58–62.

39 Мышляков, С. Г. Системы космического мониторинга сельскохозяйственных земель Европейского союза, США, Китая [Текст] / С. Г. Мышляков // Геоматика. – 2012. – № 2 (15). – С. 87–90.

40 Официальный сайт компании СКАНЭКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.scanex.ru>.

41 Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным [Текст] / Н. Н. КуССуль, Н. И. Ильин, С. В. Скакун, А. Н. Лавренюк // International Book Series

«INFORMATION SCIENCE & COMPUTING», Number 3. Supplement to the International Journal «INFORMATION TECHNOLOGIES & KNOWLEDGE». – 2008. – V. 2. – P. 103–109.

42 Плуталова, Т. Г. Мониторинг сельскохозяйственных культур сухостепной зоны Кулундинской равнины на основе данных спутниковой группировки RapidEye [Текст] / Т. Г. Плуталова, Н. М. Ковалевская // Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные. Материалы молодежной школы-семинара / Под ред. А. А. Лагутина. – Барнаул : АЗБУКА, 2013. – С. 16–23.

43 Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в 2015 году (предварительные данные) [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа : http://www.gks.ru/free_doc/doc_2015/bul_dr/sx/posev-2015.rar.

44 Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным LANDSAT и MODIS [Текст] / А. Г. Терехов, И. С. Витковская, М. Ж. Батырбаева, Л. Ф. Спивак // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 292–304.

45 Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных [Текст] / А. И. Страшная, Л. Л. Тарасова, Н. А. Богомолова, Т. А. Максименкова, О. В. Береза // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 353. – С. 128–153.

46 ПРОМаэро. Сельское хозяйство [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://prom.aero/catalog/selskoe-hozyajstvo>.

47 Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации [Текст] / С. А. Барталев, В. А. Егоров, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, И. А. Уваров // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 103–116.

48 Распределенная система спутникового агромониторинга в Украине [Текст] / А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун, А. Н. Кравченко, Н. Н. КуССуль // Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 141–149.

49 РД 52.33.217–99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Основные агрометеорологические наблюдения [Текст]. – Вып. 11. – Ч. I. – М. : Росгидромет, 2000. – 360 с.

50 Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS [Текст] / Н. Н. Куссуль, А. Н. Кравченко, С. В. Скакун, Т. И. Адаменко, А. Ю. Шелестов, А. В. Колотий, Ю. А. Грипич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 95–107.

51 Рис, У. Г. Основы дистанционного зондирования [Текст] / У. Г. Рис. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.

52 Российские космические системы – лидер космического приборостроения России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://russianspacesystems.ru>.

53 Рухович, Д. Применение данных дистанционного зондирования Земли для организации ретроспективного мониторинга земельного покрова [Текст] / Д. Рухович // Земля из космоса. – 2016. – № 5 (21). – С. 41–49.

54 Савин, И. Ю. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России [Текст] / И. Ю. Савин, Е. А. Лупян, С. А. Барталев // Геоматика. – 2011. – № 2 (11). – С. 69–76.

55 Сапрыкин, Е. И. Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли [Текст] / Е. И. Сапрыкин, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 40–46.

56 Сахарова, Е. Ю. Применение спутниковых данных для оценки влияния погодных условий на формирование и развитие сельскохозяйственных культур на

территории Новосибирской области [Текст] / Е. Ю. Сахарова // Геодезия и картография. – 2016. – № 7. – С. 31–37.

57 Сахарова, Е. Ю. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 47–52.

58 Сельскохозяйственное землепользование Калужской области: взгляд из космоса [Текст] / С. Г. Мышляков, А. С. Скачкова, Е. Н. Горбачева, С. С. Алдошин // Геоматика. – 2015. – № 2 (27). – С. 66–74.

59 Сибирский центр «НИЦ «ПЛАНЕТА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rcrod.ru>.

60 Сидько, А. Ф. Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края [Текст] / А. Ф. Сидько, И. Ю. Пугачева, А. П. Шевырногов // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 100–111.

61 Сладких, Л. А. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений [Электронный ресурс] / Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова // Журнал СФУ. Серия «Техника и технологии». – 2015. – Т. 8, № 6. – С. 726–733. – Режим доступа : <http://journal.sfu-kras.ru>.

62 Спутниковый сервис «ВЕГА» [Текст] / В. А. Толпин, И. В. Балашов, Е. А. Лупян, И. Ю. Савин // Земля из космоса. Наиболее эффективные решения. – Вып. 9. – Весна 2011. – С. 32–37.

63 Сравнительный анализ результатов регрессионных и биофизических моделей в задаче прогнозирования урожайности озимой пшеницы [Текст] / Ф. Коган, Н. Н. Куссуль, Т. И. Адаменко, С. В. Скакун, А. Н. Кравченко, А. А. Кривобок, А. Ю. Шелестов, А. В. Колотий, О. М. Куссуль, А. Н. Лавренюк // Современ-

ные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 215–227.

64 Стратегии обработки гиперспектральных изображений в задачах мониторинга возделывания сельскохозяйственных культур [Текст] / И. Г. Журкин, С. С. Карпухин, О. А. Карпухина, Ю. А. Никишин // Геодезия и картография. – 2011. – № 1. – С. 37–42.

65 Султангазин, У. М. Контроль севооборота пахотных земель Северного Казахстана по данным TERRA/MODIS [Текст] / У. М. Султангазин, Н. Р. Муратова, А. Г. Терехов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 302–307.

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

67 Терехин, Э. А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности [Текст] / Э. А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 4. – С. 243–248.

68 Терехин, Э. А. Особенности сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик посевов технических культур на территории Белгородской области [Текст] / Э. А. Терехин // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 3 (200). – Вып. 30. – С. 150–156.

69 Хвостиков, С. А. Разработка имитационных моделей и комплексов программ для оценки динамики наземных экосистем на основе интеграции данных спутникового мониторинга [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Хвостиков Сергей Антонович. – М., 2016. – 151 с.

70 Чабан, Л. Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных [Текст] : учеб. пособие / Л. Н. Чабан. – М. : МИИГАиК, 2013. – 96 с.

71 Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия: вчера, сегодня, завтра [Текст] / А. Г. Чибуничев, А. П. Гук // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – Т. 60, № 2. – С. 3–9.

72 Шатрова, К. В. Модель представления информации о состоянии и динамике земель сельскохозяйственного назначения [Текст] / К. В. Шатрова, Ю. А. Маглинец, Г. М. Цибульский // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2014. – Т. 7, № 8. – С. 984–989.

73 Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости [Текст] / Д. Е. Плотников, С. А. Баргалева, В. О. Жарко, В. В. Михайлов, О. И. Просяникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 199–208.

74 About Suomi NPP [Electronic resource] // Официальный сайт NASA. Polar Orbiting Missions. – Mode of access : https://jointmission.gsfc.nasa.gov/suomi_mission_details.html.

75 Airbus Defence and Space: Geo-Intelligence – Satellite Imagery & Maps, Geospatial Services, Geoinformation Products, Elevation data & 3D [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.intelligence-airbusds.com>.

76 Applications of Remote Sensing in Monitoring Agriculture in China: Introducing the CHARMS System [Electronic resource]. – Mode of access : <https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/f150/86f22c18edb8096257e3b1282418c9dc0300.pdf>.

77 Chander, G. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors [Electronic resource] / G. Chander, B. L. Markham, D. L. Helder // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113. – Mode of access : http://www.pancroma.com/downloads/Landsat_Calibration_Summary.pdf.

78 Copernicus Satellites – EUMETSAT [Electronic resource] // Официальный сайт EUMETSAT. Monitoring weather and climate from space. – Mode of access :

<http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/index.html>.

79 Copernicus. Europe's eyes on Earth [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.copernicus.eu>.

80 CropScape – Cropland Data Layer [Electronic resource]. – Mode of access : <http://nassgeodata.gmu.edu/CropScape/>

81 Delan Xiong. Crop Growth Remote Sensing Monitoring and its Application [Electronic resource] / Delan Xiong // Sensors & Transducers. – 2014. – V. 169. – Issue 4. – P. 174–178. – Mode of access : http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/april_2014/Vol_169/P_PR_0110.pdf.

82 ESA. Sentinel Online [Electronic resource]. – Mode of access : <https://earth.esa.int/web/sentinel>.

83 Gopal Krishna. Hyperspectral Remote Sensing for Agriculture [Electronic resource] / Gopal Krishna // GIS Resources. – 2017. – Issue 3. – P. 10–12. – Mode of access : <http://www.gisresources.com/wp-content/uploads/2017/09/GIS-Resources-Magazine-ISSUE-3-September-2017-GIS-Magazine.pdf>.

84 Knight, E. J. Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance [Electronic resource] / E. J. Knight, G. Kvaran // Remote Sensing. – 2014. – № 6 (11). – Mode of access : <http://www.mdpi.com/2072-4292/6/11/10286/pdf>.

85 Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 1.0. June 2015 [Electronic resource] // Официальный сайт USGS. Landsat Missions. – Mode of access : <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>.

86 Landsat-7 [Electronic resource] // Официальный сайт eoPortal Directory. – Mode of access : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7>.

87 Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research [Electronic resource] / D. P. Roy, M. A. Wulder, T. R. Loveland, C. E. Woodcock, R. G. Allen, M. C. Anderson, D. Helder, J. R. Irons, D. M. Johnson, R. Kennedy et al. //

Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 145. – Mode of access : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.

88 Modelling corn production in China using AVHRR-based vegetation health indices [Text] / F. Kogan, B. Yang, Z. Pei, X. Jiao, W. Guo // International Journal of Remote Sensing. – 2005. – Vol. 26. – № 11. – P. 2325–2336.

89 NASA [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.nasa.gov>.

90 NASA. Landsat Science [Electronic resource]. – Mode of access : <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.

91 NASA. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [Electronic resource]. – Mode of access : <https://modis.gsfc.nasa.gov>.

92 NASA's Earth Observing System [Electronic resource]. – Mode of access : <http://eospso.nasa.gov>.

93 National Agricultural Statistics Service [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.nass.usda.gov/>.

94 NPP. NPOESS Preparatory Project. Building a Bridge to a New Era of Earth Observations [Electronic resource]. – Mode of access : http://npp.gsfc.nasa.gov/images/NPP_Brochure_Color.pdf.

95 Parrot Store Official [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.parrot.com/ie/#hello-recent-drone-owner>.

96 Sakharova, E. Yu. Satellite Monitoring of Grain Crops in the South Part of Western Siberia [Text] / E. Yu. Sakharova, L. A. Sladkikh, E. N. Kulik // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016. – № 9 (7). – P. 1019–1024.

97 Sentinel-2A Launches – Our Compliments & Our Complements [Electronic resource] // Официальный сайт NASA. Landsat Science. – Mode of access : <http://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/>.

98 Sentinels Scientific Data Hub [Electronic resource]. – Mode of access : <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

99 SPOT [Electronic resource] // Официальный сайт CNES. Centre National d'Etudes Spatiales. – Mode of access : <https://spot.cnes.fr/fr>.

100 Step. Science toolbox exploitation platform (ESA) [Electronic resource]. – Mode of access : <http://step.esa.int/main/download/>.

101 Trimble – GreenSeeker handheld crop sensor [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.trimble.com/Agriculture/gs-handheld.aspx>.

102 Usage of flying robots for monitoring nitrogen in wheat crops [Text] / V. Lysenko, O. Opryshko, D. Komarchuk, N. Pasichnyk, N. Zaets, A. Dudnyk // The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – 2017. – Vol. 1. – P. 30–34.

103 USGS EarthExplorer [Electronic resource]. – Mode of access : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

104 USGS. Landsat Missions [Electronic resource]. – Mode of access : <https://landsat.usgs.gov>.

105 VegScape – Vegetation Condition Explorer [Electronic resource]. – Mode of access : <http://nassgeodata.gmu.edu/VegScape/>.

106 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Sensor Data Record (SDR) User's Guide. Version 1.2. [Electronic resource]. – Mode of access : <http://ncc.nesdis.noaa.gov/documents/documentation/viirs-users-guide-tech-report-142a-v1.2.pdf>.

107 Welcome to Tetracam [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.tetracam.com>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ
«ФОРМИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОСТОЯНИЕ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2015620924

Формирование и хранение многолетних данных
спутниковых измерений, характеризующих состояние
сельскохозяйственных культур

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии «Планета» (RU)*

Авторы: *Сладких Любовь Александровна (RU), Сапрыкин Евгений
Игоревич (RU), Сахарова Елена Юрьевна (RU), Демакова Галина
Семёновна (RU)*

Заявка № 2015620104

Дата поступления 17 февраля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 17 июня 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ
«МАСКИ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ, СОЗДАННЫЕ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2015620936

**Маски неиспользуемых земель, созданные по спутниковым
данным**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии «Планета» (RU)*

Авторы: *Сладких Любовь Александровна (RU),
Сахарова Елена Юрьевна (RU)*

Заявка № **2015620103**

Дата поступления **17 февраля 2015 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных **19 июня 2015 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



Л.Л. Кирий