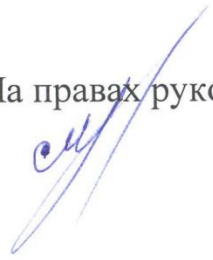


На правах рукописи



Мальцев Евгений Алексеевич

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ С ЛИНЕЙНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

05.13.17 – Теоретические основы информатики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Маглинец Юрий Анатольевич.
- Официальные оппоненты: Гук Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра физической геодезии и дистанционного зондирования, профессор – консультант.
- Гаченко Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, ФГБУН Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, лаборатория 4.1 Комплексных информационных систем, старший научный сотрудник.
- Ведущая организация: ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «07» апреля 2017 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.22 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» марта 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Покидышева Людмила Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Данные дистанционного зондирования Земли, получаемые с орбитальных и воздушных носителей, являются источником актуальной информации о пространственных объектах и служат идеальным средством глобального, постоянного и надежного мониторинга окружающей среды, включая атмосферу, сушу и океан.

К настоящему времени разработано множество моделей и методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) для решения различных экологических задач и задач сельскохозяйственного назначения: мониторинга наземных экосистем, оценки состояния растительного покрова, прогнозирования урожайности зерновых культур, анализа противопожарной вспашки и др. Этому посвящены многочисленные работы зарубежных ученых Wu Bingfang¹, P. S. Thenkabail², C. L. Wiegand³, Н. Н. Куссуль⁴ и российских учёных С. А. Барталев⁵, В. Б. Кашкин⁶, М. Ю. Катаев⁷, А. Д. Клещенко⁸, Е. А. Лупян⁹, И. Ю. Савин¹⁰, Л. Ф. Спивак¹¹ и др. Все эти работы направлены на решение какой-либо конкретной задачи или ориентированы на определенные типы пространственных объектов.

Сложность детектирования пространственных объектов сельскохозяйственного назначения по космическим снимкам значительная, что определяет достаточно низкую степень автоматизации решения этой задачи в мировой и отечественной практике. Одним из способов повышения степени автоматизации и точности распознавания является создание объектно-ориентированных моделей предметной направленности в заданной совокупности ограничений. Это позволяет привлекать дополнительную информацию о рассматриваемых типах пространственных объектов и формировать математические модели и алгоритмы, ориентированные на выявление эталонных объектов данного типа.

¹ Global Crop Monitoring: A Satellite-Based Hierarchical Approach // Remote Sens. 2015, 7(4), 3907-3933.

² Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation // Press- Taylor and Francis group, Boca Raton, London, New York. Pp. 781. 2011.

³ Vegetation Indices in Crop Assessments // REMOTE SENS. ENVIRON. 35:105-119 (1991).

⁴ Intelligent Data Processing in Global Monitoring for Environment and Security // ITHEA, Киев-София, 2011.

⁵ Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. № 1. С. 49-56.

⁶ Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений // Логос, Москва, 2001 г.

⁷ Геоинформационная система мониторинга экологического состояния территории по данным прибора MODIS // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2014. С. 120

⁸ Технология ежегодной оценки урожайности зерновых культур по спутниковой и наземной агрометеорологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 178-182

⁹ Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. №. 3. С. 215-232.

¹⁰ О новом подходе к использованию NDVI для мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследование Земли из космоса, 2003г. С. 91-96.

¹¹ Использование многолетних спутниковых данных различного разрешения для комплексной оценки состояния растительного покрова территории Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. В. 6. Т. 2. С. 450-458

Пространственные объекты с линейной геометрической структурой (формой, контуром) – один из типов пространственных объектов. Противопожарная вспашка относится к наиболее характерным пространственным объектам сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой. Анализ противопожарной вспашки требуется для МЧС с целью контроля выполнения необходимых мероприятий по противопожарной безопасности, и для органов государственной власти с целью контроля расходования бюджетных средств, субсидируемых для выполнения данных мероприятий. Несмотря на существенную значимость данной задачи, разработке методов и алгоритмов ее решения на основе ДДЗ уделено незначительное количество работ. В основном эти работы касаются в целом пространственных объектов с линейной геометрической структурой и не учитывают определенные особенности противопожарной вспашки (спектральные характеристики и пространственные признаки объекта). Таким образом, актуальны исследования, направленные на разработку моделей, методов и алгоритмов автоматизированного распознавания противопожарной вспашки путем комбинирования, фильтрации и отбора ДДЗ высокого и сверхвысокого пространственного разрешения на основе привлечения дополнительной геометрической и пространственной информации.

Цель работы. Разработка алгоритмов распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой по многоспектральным космическим снимкам с учетом влияния облачности.

В качестве объекта распознавания в данной диссертационной работе выступает противопожарная вспашка.

Решаемые задачи.

1. Анализ признаков пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой (противопожарной вспашки) и разработка его многоаспектной информационной модели.

2. Разработка алгоритма распознавания пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой по данным ДЗЗ с учетом влияния облачности.

3. Разработка алгоритма оценки облачности для спутниковых данных космической программы *SPOT*.

4. Разработка системы получения космических снимков, свободных от влияния облачности и каталога спутниковых данных регионального центра ДЗЗ с соответствующим интерфейсом доступа.

5. Экспериментальная апробация разработанных методов и алгоритмов.

Научная новизна.

1. Разработан алгоритм распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой по данным ДЗЗ с учетом влияния облачности, который, в отличие от существующих алгоритмов, позволяет сократить количество анализируемых

участков территорий за счёт использования разнородных признаков исследуемого объекта (противопожарной вспашки);

2. Разработан алгоритм оценки облачности для спутниковых данных космической программы *SPOT*. Алгоритм позволяет проводить оценку облачности спутниковых снимков в системе предварительной обработки данных регионального центра ДЗЗ и, в отличие от существующих алгоритмов, оценивать её геометрическую концентрацию;

3. Разработана информационная модель пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой (противопожарная вспашка), отличающаяся от существующих моделей многоаспектностью. Модель позволяет учесть как топологические, метрические и пространственные признаки исследуемого объекта, так и его спектральные характеристики.

Практическая значимость. Представленные в работе модель и алгоритмы реализованы программно, обеспечены методически и встроены в действующий программно-аппаратный комплекс центра дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) Сибирского федерального университета (СФУ). Разработанные алгоритмы были использованы при реализации проектов: «Создание регионального центра ДЗЗ СФУ»; «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель на примере Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот»; «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края».

Методы исследований. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории распознавания образов и анализа изображений, методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, современные ГИС-технологии, методы системного анализа.

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

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новый алгоритм распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой по космическим снимкам с учетом влияния облачности.

2. Новый алгоритм оценки облачности для спутниковых данных космической программы *SPOT*, позволяющий проводить оценку облачности спутниковых снимков, рассчитывать процентное содержание облачности и в отличие от существующих алгоритмов оценивать её геометрическую концентрацию.

3. Многоаспектная информационная модель пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой,

позволяющая учитывать его топологические, метрические, пространственные признаки и спектральные характеристики.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии в нефтегазовом комплексе», Министерство образования и науки Российской Федерации, Российская Академия Наук, Москва, 20–22 октября 2009 г.; Региональная конференция «Проблемы информатизации региона», Красноярск, 2–3 ноября 2009 г.; 3-я Международная научно-техническая конференция «Image Mining Theory and Applications», Анжи, Франция, 20 мая 2010 г.; Международная научно-техническая конференция «Приложения теории информации, кодирование и безопасность», Ереван, Армения, 14–16 апреля 2010 г.; Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 2010 г.; 10-я Международная конференция «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (PRIA-10-2010), Санкт-Петербург, 5–12 декабря 2010 г.; 11-я Международная конференция «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (PRIA-11-2013), Самара, 23–28 сентября 2013 г.; Второй ежегодный международный ГИС-форум «Интеграция геопространства – будущее информационных технологий», Москва, 23–25 апреля 2014 г.; 3-я Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (РПДЗЗ-2016), Красноярск, Сибирский федеральный университет, 13–16 сентября 2016 г.

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

- Программа министерства природных ресурсов Красноярского края «Мониторинг состояния окружающей среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли» в соответствии с Законом Красноярского края от 04.12.2008 № 7-2558 «О краевом бюджете на 2009 год и плановый период 2010–2011 годов»;

- Грант Минобрнауки России «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г. Проект «Развитие регионального центра получения, архивации, обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли»;

- Грант Красноярского краевого фонда науки 2011 г. «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот»;

- Грант Красноярского краевого фонда науки 2015 г. «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует области исследований

специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики по п. 7 «Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания» и п. 5 «Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений».

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 статей, из них 6 – в журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве изданий, рекомендуемых для опубликования научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 2 свидетельства о регистрации программ, зарегистрированных в Российском реестре программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации включает 136 страниц. Изложение иллюстрируется 51 рисунком и 7 таблицами. Список литературы на 13 страницах содержит 110 наименований. В приложении приведены документы о внедрении и практическом использовании результатов диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлена формулировка задачи распознавания исследуемого объекта.

Задан пространственный объект сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой. В роли такого объекта выступает противопожарная вспашка. Требуется распознать данный объект по спутниковым изображениям с учётом влияния облачности и особенностей объекта распознавания.

Противопожарная вспашка (далее ППВ или коротко вспашка), как объект распознавания, имеет следующие особенности. На снимках дистанционного зондирования Земли, полученных с космических аппаратов (КА) среднего и высокого пространственного разрешения, вспашка имеет линейную геометрическую форму. Протяженность вспашки может варьироваться в зависимости от площади опаханного сельскохозяйственного поля и целесообразности проведения работ по вспашке. Ширина вспашки должна составлять 4~8 м. Время уборки урожая в осенний период составляет 1–2 месяца, это накладывает временные ограничения на получение необходимых спутниковых данных. В целом ППВ – это пространственный объект открытой почвы с линейной геометрической структурой.

Мероприятия по опаживанию полей регламентируются правилами пожарной безопасности (ППБ 01-03), утвержденными приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от

18 июня 2003 г. № 313 «Об утверждении правил пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03)».

На рисунке 1 (а–в) представлены изображения противопожарной вспашки, полученные с использованием космического аппарата (КА) *SPOT* в 2012 г. для Манского района Красноярского края.



Рисунок 1 – Снимки ДЗЗ. Красным цветом выделена противопожарная вспашка

В работе проведен анализ методов получения и обработки космических снимков для мониторинга пространственных объектов. Рассмотрены методы получения и предварительной обработки исходных данных ДЗЗ на примере данных КА *SPOT*. Рассмотрены уровни предварительной обработки и её основные этапы. Проведен обзор методов детектирования облачности для данных ДЗЗ. Сделан анализ существующих методов решения задачи обнаружения пространственных объектов с линейной геометрической структурой по данным ДЗЗ.

Согласно существующим методикам анализа изображений, задача распознавания противопожарной вспашки разбита на следующие этапы:

1) предварительная обработка исходного изображения; 2) локализация области возможного появления объекта; 3) сегментация и выделение сегментов открытой почвы; 4) классификация объектов ППВ.

Исходные данные (спутниковые изображения) для решения задачи распознавания поступают из регионального центра ДЗЗ с помощью приемного комплекса. Для каждого снимка требуется выполнить ряд процедур предварительной обработки, таких как радиометрическая коррекция, геопривязка с использованием опорных точек, атмосферная коррекция, оценка облачности. КА высокого разрешения позволяют получать исходные данные на выбранную территорию с периодичностью 1–2 раза в месяц. Учитывая вероятность получения снимков, частично или полностью закрытых облачностью, облачные пиксели замаскированы для формирования признаков классификации и автоматизированной локализации скопления облачности, а также для фильтрации и поиска нужных данных.

Локализация областей возможного появления объекта производится исходя из ППБ 01-03. Согласно этим правилам, вспахивание земли проводится по контуру полей в местах их прилегания к лесным и торфяным массивам, авто- и железным дорогам, ЛЭП.

Задача сегментации спутникового изображения с целью выделения открытой почвы на спутниковом изображении формулируется следующим образом. Пусть $f(x, y)$ – функция яркости обработанного спутникового изображения, X – конечное подмножество точек плоскости, на котором определена функция $f(x, y)$; $\Omega^* = \{\omega_i\}$ – разбиение X на k непустых связных подмножества ω_i , LP – предикат, определенный на множестве Ω и принимающий истинные значения тогда и только тогда, когда любая пара точек из каждого подмножества ω_i удовлетворяет критерию однородности LP . При этом, критерий LP определен так, что для каждого ω_i можно определить решающее правило $\bar{g}(\omega)$, задающее разбиение множества Ω на два непересекающихся подмножества «открытая почва» Ω_n , «фон» Ω_ϕ : $\Omega = \Omega_n \cup \Omega_\phi$; $\Omega_n \cap \Omega_\phi = \emptyset$.

Задача классификации объектов ППВ – это построение решающего правила, удовлетворяющего условию:

$$P\{\bar{g}(x(\omega)) = g(\omega)\} \geq 90\% , \quad (1)$$

где P – вероятность правильной классификации; $g(\omega)$ – индикаторная (эталонная) функция, разбивающая множество образов Ω_n на 2 непересекающихся класса «вспашка», «отсутствие вспашки»; $\bar{g}(\omega)$ – решающее правило по вектору признаков; $x(\omega)$ – функция, ставящая в соответствие каждому объекту ω точку $x(\omega)$ в пространстве признаков X . Вектор признаков объекта $\omega \in \Omega$ – объекта ППВ.

Вторая глава посвящена разработке многоаспектной информационной модели объекта ППВ, алгоритмам обнаружения данных объектов по многоспектральным космическим снимкам с учетом влияния облачности.

Проведенный анализ позволил выявить следующее пространство признаков объекта ППВ:

- 1) *топологические признаки*: ППВ – односвязный объект;
- 2) *метрические признаки*: $L \gg T$, где L – длина объекта, T – толщина объекта. Толщина объекта задается формулой $T = 4\pi(NS / NP^2) > 4$ м, где NS – площадь объекта, NP – периметр объекта;
- 3) *спектральные признаки*: ППВ – объект открытой почвы, его дешифрирование описывается нормализованным дифференциальным вегетационным индексом ($NDVI$)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} , \quad (2)$$

где NIR – значение в спектральном канале соответствующему ближнему инфракрасному диапазону с длиной волны 0,76–1 мкм; RED – значение в спектральном канале, соответствующему видимой части спектра с длиной волны от 0,6–0,76 мкм (красной части спектра). Для открытой почвы значение $NDVI$ лежит в интервале (0,025–0,1), соответственно выражение для этого признака будет следующим:

$$0,025 \leq NDVI \leq 0,1; \quad (3)$$

4) *пространственные признаки*: это участки территорий, определяемые взаиморасположением целевых объектов с другими объектами в пространстве. Пространственные признаки основываются на ППБ 01-03.

Таким образом, необходимо искать границы сельскохозяйственных полей и прилегающих к ним заранее классифицированных объектов, к которым относятся: лесные массивы; автомобильные дороги; железные дороги, ЛЭП.

Пусть S_1 – множество объектов типа «лесной массив»; S_2 – множество объектов типа «автомобильная дорога»; S_3 – множество объектов типа «железная дорога»; S_4 – множество объектов типа «ЛЭП»; B – множество объектов типа «сельскохозяйственное поле», множество $A = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4$. Определим топологические отношения O_1 – «не пересекаются», O_2 – «соприкасаются» и метрическое отношение O_3 – «расстояние между границами объектов не более L ». Расстояние L определяется шириной вспашки, регламентируется в ППБ 01-03 и должно составлять 4–8 метров. Пусть множество локализованных участков территорий W_1 определяется соотношением:

$$W_1 = \{ \langle \{A, B\}, \{O_1, O_3\} \rangle \cup \langle \{A, B\}, \{O_2\} \rangle \}. \quad (4)$$

Многоаспектная информационная модель объекта «ППВ» [1] на цифровых снимках ДЗЗ представляет собой конкретизацию объекта открытой почвы с линейной геометрической структурой и имеет вид:

$$\text{ППВ} = \langle M, T, L, N, E \rangle, \quad (5)$$

где M – многосвязность; T – ограничения на толщину объекта; L – ограничения на длину объекта; N – диапазон значений $NDVI$, присущий открытой почве; E – пространственные соотношения между искомым объектом и смежными объектами. Данная модель используется в алгоритме распознавания объектов противопожарная вспашки по цифровым снимкам ДЗЗ.

Для решения задачи сегментации открытой почвы определим предикат $LP(\omega)$, построенный на основе спектрального признака – значения $NDVI$:

$$LP(\omega) = \begin{cases} \text{TRUE, если } 0,025 \leq NDVI(f(x, y)) \leq 0,1. \\ \text{FALSE, в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

где $f(x, y)$ – функция яркости точки спутникового изображения, $NDVI$ – функция расчёта значения $NDVI$ для точки спутникового изображения.

Правило классификации объектов ППВ следующее: выделение сегментов по предикату LP , принадлежащих множеству локализованных участков территорий W_1 , толщина которых больше заданного порога и длина много больше их толщины:

$$\bar{g}(\omega) = T(\omega) > c_1 \text{ AND } \omega \in W_1 \text{ AND } T(\omega) \ll L(\omega) \text{ AND } LP(\omega) \quad (7)$$

где $T(\omega)$ – функция толщины объекта; $L(\omega)$ – функция длины объекта; c_1 – заданный порог толщины объектов (для ППВ 4 м); W_1 – множество локализованных участков территорий. Метрикой классификатора является евклидово расстояние.

Далее в главе 2 представлены результаты разработки базы данных и интерфейса доступа пользователя к каталогу спутниковых данных регионального центра ДЗЗ. Автором, в составе творческого коллектива, были созданы: инфраструктура каталога данных ДЗЗ [2], интерфейс доступа к данному каталогу, программные модули для автоматизации сквозного цикла приёма и предварительной и тематической обработки спутниковой информации [3, 4, 5], а также разработан и реализован алгоритм оценки облачности, который внедрен в цикл приема информации центра.

Алгоритм оценки облачности (рисунок 3а) базируется на известном алгоритме *ACCA* (*Automatic Cloud Cover Assessment*) для КА *Landsat 7*. Алгоритм *ACCA* был модифицирован следующим образом: 1) исключение теплового ИК канала из обработки в связи с отсутствием данного канала у сенсора *HRVIR* КА *SPOT*; 2) адаптация алгоритма под сенсор *HRVIR*; 3) изменение глобального порога *NDSI* (*normalized differential snow index*) на рассчитываемый – адаптивный; 4) добавление расчета геометрической концентрации облачности. После работы алгоритма строится бинарная маска облачности и рассчитывается процент облачности снимка.

Концепция выделения геометрической концентрации объектов в данной работе основывается на использовании диаграммы триангуляции Делоне, расчет производился по следующей формуле:

$$\tilde{n}_i(t^i) = \Delta NS_i / NS_i, \quad (8)$$

где t^i – цель анализа (класс целевых объектов); ΔNS_i – площадь треугольной области, образованной тремя геометрическими центрами областей, представляющей целевые объекты, находящиеся на минимальном евклидовом расстоянии друг от друга; NS_i – сумма площадей областей (объектов), представляющих вершины треугольной области (рисунок 2б).

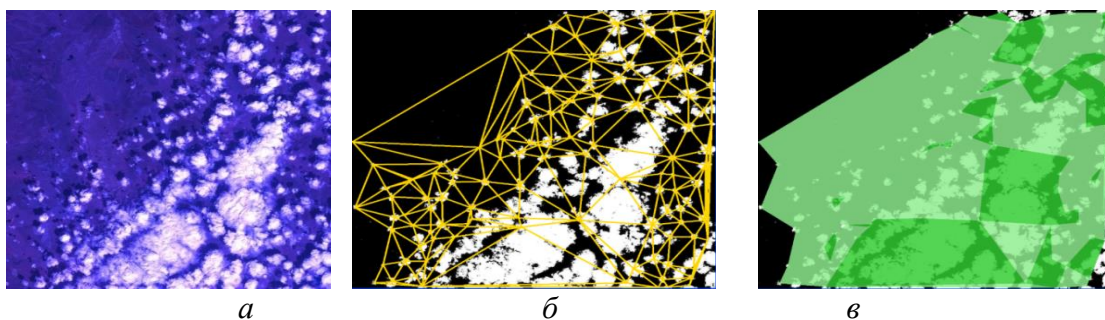


Рисунок 2 – Работа алгоритма облачности: а – исходный спутниковый снимок б – построенная триангуляция на маске облачности, облачность – белый цвет, фон – черный; в – вычисленная геометрическая концентрация облачности, оттенками зеленого цвета выделены области низкой, средней и высокой концентрации соответственно

Разработанный алгоритм детектирования облачности [6,7] позволяет применять алгоритм *ACCA* для данных КА *SPOT* с точностью классификации до 90 %, строить маску облачности, рассчитывать процентное содержание облачности и её геометрическую концентрацию. Рассчитанная геометрическая концентрация облачности (рисунок 2в) для снимков позволяет расширить спектр отбираемых данных либо, наоборот, выявлять снимки с низким процентом облачности, но со сплошным её расположением

на изображении, тем самым являясь дополнительным инструментом эксперта при отборе снимков для решения прикладных задач.

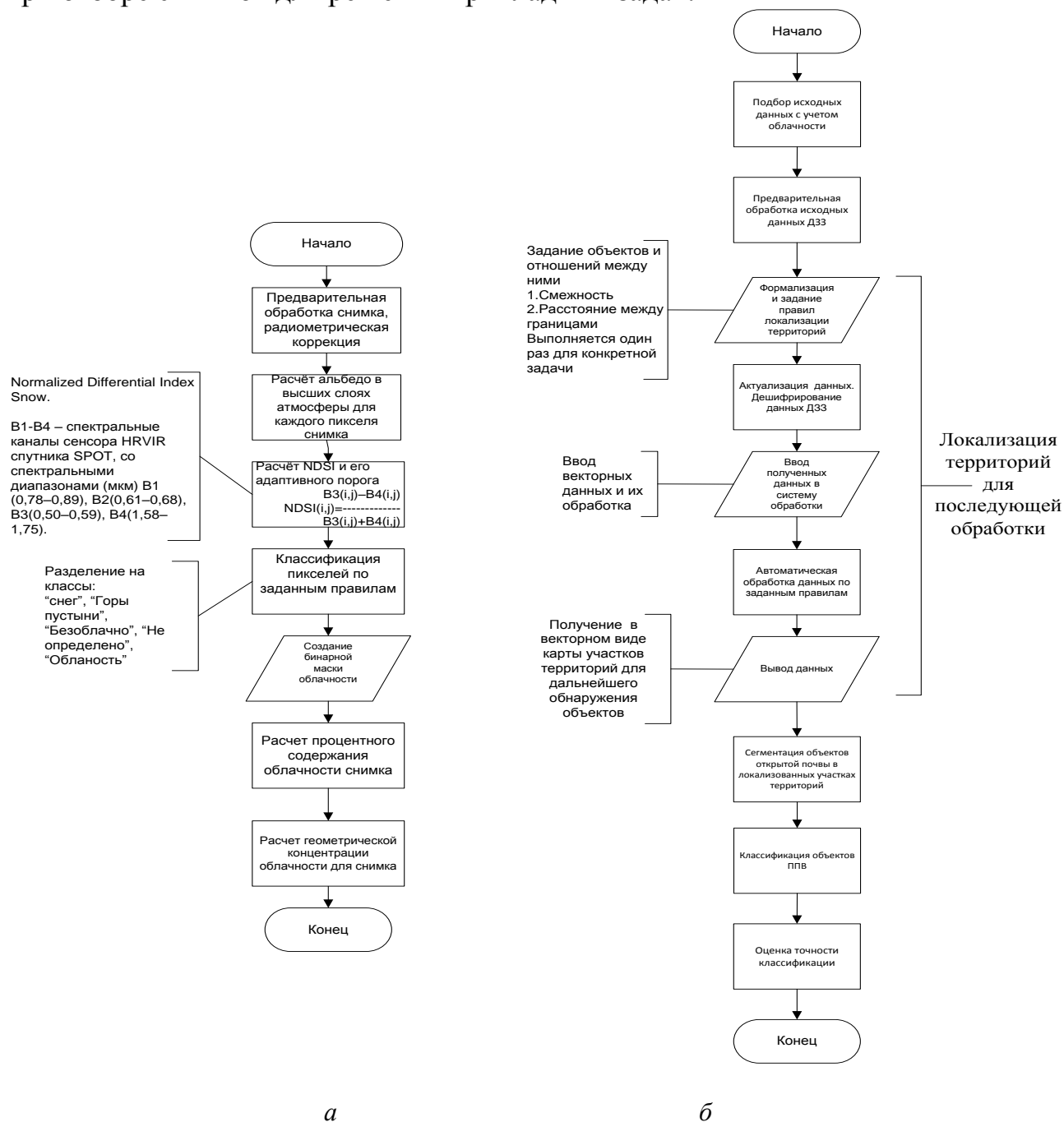


Рисунок 3 – Блок-схемы алгоритмов: *а* – Распознавание ППВ, *б* – Детектирование облачности для КА SPOT

В главе 2 также приводится описание разработанного алгоритма для задачи распознавания объектов противопожарной вспашки (рисунок 3б). Алгоритм включает в себя вышеописанные этапы задачи распознавания противопожарной вспашки. Предварительная обработка данных включает дешифрирование и актуализацию сельскохозяйственных угодий. Предлагается эти действия выполнять для существующей карты сельскохозяйственных полей с использованием данных ДЗЗ КА SPOT и КА Landsat и методов контролируемой классификации с обучающей выборкой, расчетом признаков NDVI и PVI и с привлечением эксперта. После

обработки всего изображения получаем векторную карту локализованных участков территорий, подлежащих проверке на наличие вспашки (рисунок 4).

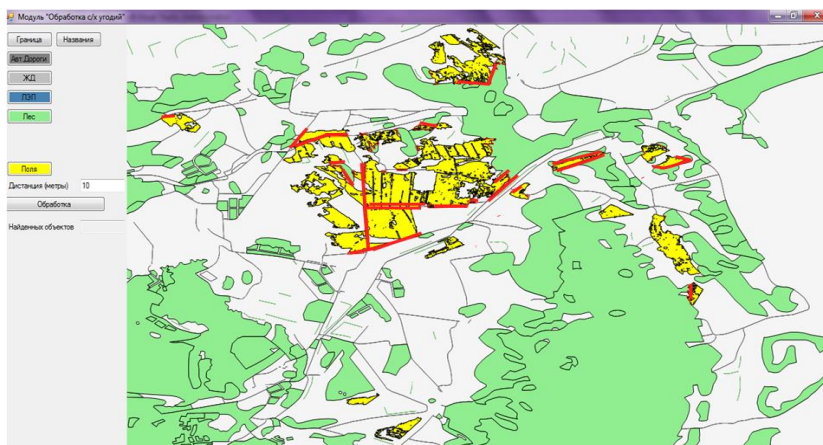


Рисунок 4 – Обработанное изображение с найденными участками территории, подлежащими проверке на наличие вспашки (выделены красным); лесные массивы выделены зеленым; автомобильные дороги выделены черным

Дешифрирование объектов открытой почвы выполняется в локализованных участках территорий (рисунок 5) с использованием предиката (6). Решающим правилом наличия или отсутствия вспашки являются метрические, топологические и другие признаки полученных сегментов открытой почвы (выражение 7).

Разработанный алгоритм распознавания ППВ [8] позволяет детектировать такого рода объекты на снимках ДЗЗ. Разработанный алгоритм детектирования облачности позволяет отбирать исходные данные с учетом влияния облачности. Этап локализации территорий на основе анализа границ сельскохозяйственных полей и прилегающих к ним объектов позволяет получить карту участков, требующих контроля над наличием/отсутствием вспашки.

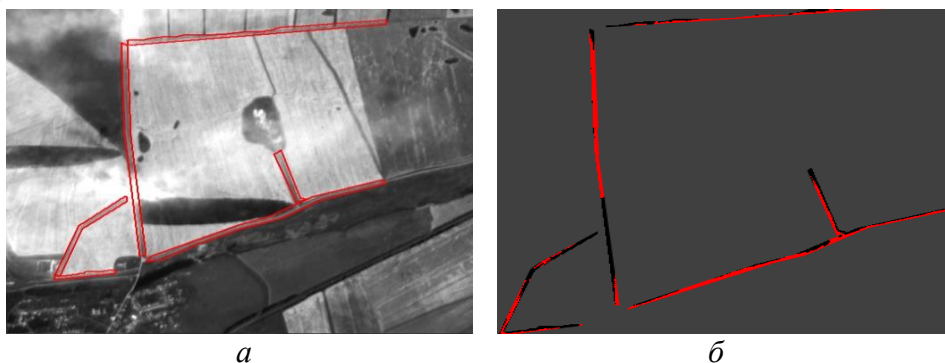


Рисунок 5 – Дешифрирование объектов противопожарной вспашки: *a* – снимок КА SPOT с локализованными участками территорий (выделены красным); *б* – классифицированные объекты ППВ – красный, черный – отсутствие вспашки, фон – серый.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям разработанных алгоритмов.

В рамках диссертационной работы создано следующее программное обеспечение: база данных и интерфейс доступа каталога спутниковых снимков регионального центра ДЗЗ; программная реализация алгоритма детектирования облачности для настольного комплекса ENVI и для

кластерной аппаратной платформы с использованием пакета MatLabTM; программный модуль обнаружения объектов с линейной геометрической структурой по данным ДЗЗ.

При экспериментальных исследованиях алгоритма распознавания объектов ППВ проводился подбор требуемых ДЗЗ (КА SPOT 6) на территории Красноярского края со значениями облачности менее 10 % (рисунок 9а). Для этого использовался разработанный каталог регионального центра ДЗЗ, доступный в среде Internet по адресу <http://digitalatlas.ru/> [9,10]. Осуществлялось дешифрирование экспертом с привязкой по наземным GPS-данным дополнительных объектов следующих типов: лесные массивы; автомобильные дороги; железные дороги; ЛЭП; сельскохозяйственные поля. Векторные данные были получены в масштабе 1:10 000, соответственно метрическая ошибка геопривязки составляла 4 м. После дешифрирования вспомогательных объектов была проведена локализация участков территорий для поиска на них объектов вспашки. Для этого векторные слои были загружены в разработанный модуль локализации объектов противопожарной вспашки, после проведения обработки были выделены участки территорий для дальнейшего дешифрирования (рисунок 9б).

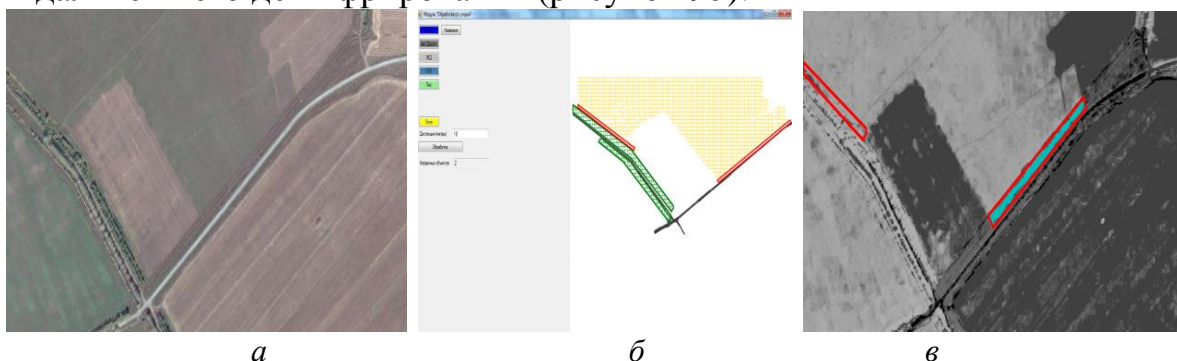


Рисунок 9 – а – фрагмент снимка КА SPOT6 (6 м) участка территории Красноярского края, сентябрь 2014 г.; б – Работа модуля локализации объектов ППВ с выделенными участками территорий; в – Изображения рассчитанного по космическим снимкам NDVI с локализованной областью для дешифрирования (выделено красным цветом) и классифицированный объект ППВ (выделено голубым цветом)

Далее производилось дешифрирование локализованных участков территорий и классификация объектов ППВ. Для этого был рассчитан NDVI для каждого снимка и по нему классифицированы объекты ППВ пороговым методом по значениям, указанным в модели (рисунок 9в). Обработка более 100 участков территорий с целью детектирования противопожарной вспашки в земельной части Красноярского края с использованием вышеописанного алгоритма, показала точность распознавания 93%.

Экспериментальные исследования алгоритма детектирования облачности выполнялись в автоматическом режиме. Реализованный алгоритм в виде модуля запускался и работал в цикле предобработки спутниковых данных в региональном центре ДЗЗ на высокопроизводительном вычислительном кластере. Обработка базы данных спутниковых снимков велась в параллельном режиме. Для каждого снимка КА SPOT, хранящегося в каталоге, разработанный модуль построил маску, рассчитал процентное содержание облачности и геометрическую

концентрацию. На рисунке 10 представлен пример работы алгоритма, исходные спутниковые данные КА *SPOT* слева и найденные битовые маски облачности справа. Полученные результаты работы алгоритма детектирования облачности, после обработки 100 случайно подобранных спутниковых снимков районов Красноярского края, показали точность 90%.

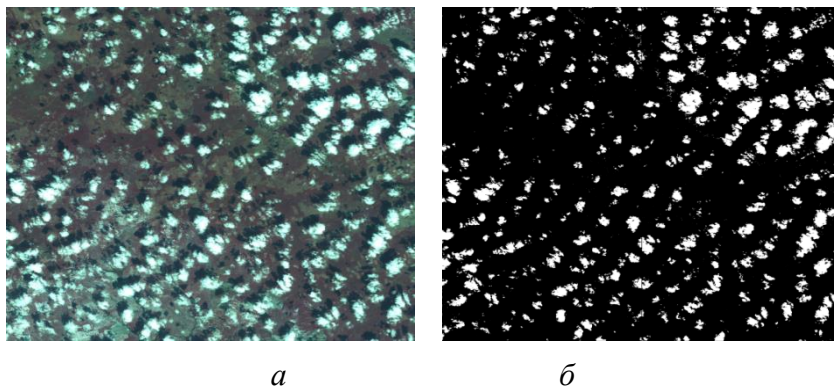


Рисунок 10 – Пример работы алгоритма оценки облачности. Процент облачности 11,6 %. Дата снимка 2 июня 2009 г. *а* – оригинальное изображение; *б* - маска облачности.

В заключении диссертационной работы приведены выводы и сформулированы основные результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ существующих методов и алгоритмов детектирования пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой. На примере задачи выделения противопожарной вспашки показана необходимость разработки новых алгоритмов и моделей, обеспечивающих одновременную обработку данных из различных источников.

2. Разработана информационная модель пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой (противопожарная вспашка), отличающаяся от существующих моделей многоаспектностью. Модель позволяет учесть как топологические, метрические и пространственные признаки исследуемого объекта, так и его спектральные характеристики.

3. На основе разработанной модели пространственного объекта сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой (противопожарная вспашка) создан алгоритм распознавания такого рода объектов по данным ДЗЗ с учетом влияния облачности, который, в отличие от существующих алгоритмов, позволяет сократить количество анализируемых участков территорий за счёт использования разнородных признаков исследуемого объекта;

4. Разработана система получения космических снимков, свободных от влияния облачности, и каталог спутниковых данных регионального центра ДЗЗ с соответствующим интерфейсом доступа с учётом технических особенностей центра.

5. Разработан алгоритм оценки облачности для спутниковых данных космической программы *SPOT*, позволяющий проводить оценку облачности спутниковых снимков, рассчитывать процентное содержание облачности и в отличие от существующих алгоритмов оценивать её геометрическую концентрацию.

6. Выполнены экспериментальные работы разработанных методов и алгоритмов на территории Красноярского края по снимкам КА *SPOT 4*, *SPOT6* за 2013–2014 гг., которые подтвердили возможность получения необходимой точности и эффективность предложенных алгоритмов.

7. Основная часть результатов работы была получена при выполнении следующих государственных контрактов: «Внедрение системы космического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края»; «Развитие регионального центра получения, архивации, обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли»; «Создание автоматизированной геоинформационной системы учета и актуализации данных о состоянии залежных земель Манского района Красноярского края, позволяющей выработать рекомендации по вовлечению их в хозяйственный оборот»; «Мониторинг состояния окружающей среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Мальцев, Е. А.** Разработка информационной модели объекта «противопожарная вспашка» для автоматизированной обработки спутниковых данных / Е. А. Мальцев, Ю. А. Маглинец // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы междунар. науч. конф. – 2014. – Красноярск, Сиб. федер. ун-т. – С. 326–329.

2. **Мальцев, Е. А.** Инфраструктура центра приема спутниковой информации Сибирского федерального университета / Е. А. Мальцев, Ю. А. Маглинец // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Т. 7. № 2. Москва. 2010 г. С.182–189.

3. Маглинец, Ю. А. Multipurpose Geoinformation Management System of Territories Along the Yenisei Meridian / Ю. А. Маглинец, Г. М. Цибульский, **Е. А. Мальцев** // **Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)**. – 2011. – Т. 21. – No 2. – С. 297–299.

4. Perfil'ev, S. E. Intelligent geoinformation technology for agroecological mapping / S. E. Perfil'ev, Y. A. Maglinets, G. M. Tsibul'skii, **Е. А. Mal'tsev**, A. A. Latyntsev, K. V. Shatrova // **Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)**. 2013. Vol. 23 No 4. P. 528–535.

5. Brezhnev, R. V. An ontological spatial monitoring system for agricultural land monitoring/ R. V. Brezhnev, **Е. А. Maltsev** // **Pattern Recognition and**

Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2015, Vol. 25, №. 2, P. 201–208.

6. **Мальцев, Е. А.** Измерение облачности на снимках, полученных со спутника SPOT-4 / Е. А. Мальцев, Д. А. Перфильев, Э. Е. Сиротин, Г. М. Цибульский // **Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии**. 2012. Т. 5. С. 229-242.

7. **Мальцев, Е. А.** Extracting a Cluster of Clouds in the SPOT 4 Satellite Images/ Е. А. Мальцев, Д. А. Перфильев, Э. Е. Сиротин, Г. М. Цибульский // **Pattern Recognition and Image Analysis(Advances in Mathematical Theory and Applications)**. 2011. Т. 21, № 2, P. 522–525.

8. **Мальцев, Е. А.** Разработка технологии обнаружения объектов противопожарной вспашки по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли. // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Международной науч. конф. Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2016 г. С.167–169.

9. **Мальцев, Е. А.** Архитектура системы хранения и web-доступа к космоснимкам Сибирского федерального университета / Е. А. Мальцев, Р. В. Брежнев, Ю. А. Маглинец, Г. М. Цибульский // «Земля из космоса — наиболее эффективные решения», шестая международная конференция 2013 г. / Материалы конференции. – 391 с.

10. **Мальцев, Е. А.** The Technology of Dynamic Extension of Attribute Set for the Search of Satellite Images in a Database / Е. А. Мальцев, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, В. Ю. Курносов, А. С. Соснин // **Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)**. – 2011. – Т. 21. – No 1. – С. 35–40.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1 Система управления базой космоснимков / **Е. А. Мальцев**, А. С. Соснин, В. Ю. Курносов, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, Г. М. Цибульский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619135; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.11.2011.

2 Геоинформационная система залежных земель Манского района Красноярского края / **Е. А. Мальцев**, А. С. Соснин, В. Ю. Курносов, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, Г. М. Цибульский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619136; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.11.2011.

Подписано в печать __. __. 2017 г. Печать плоская. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Отпечатано в Библиотечно-издательском комплексе

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>; E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru;