МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

на правах рукописи

Трошко Ксения Анатольевна

Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования

25.00.33 – картография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель	–	*Балдина Елена Александровна – кандидат географических наук, доцент*
Официальные оппоненты	–	*Верещака Тамара Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой картографии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)*
		Барталев Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов спутникового мониторинга наземных экосистем Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
		Тикунов Владимир Сергеевич – доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией комплексного картографирования географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «17» мая 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП–1, Ленинские горы, д. 1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: malyn2006@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/99088926/

Автореферат разослан «6» апреля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Радиолокационное (РЛ) зондирование Земли и методы обработки получаемых данных активно развиваются в течение нескольких последних десятилетий. Материалы радиолокационной съёмки имеют ряд особенностей, отличающих их от снимков в оптическом диапазоне: активный метод съёмки позволяет получать данные независимо от условий освещения, используемые диапазоны длин волн обусловливают независимость съёмки от облачности и большую проникающую способность, интенсивность рассеиваемого поверхностью сигнала зависит от шероховатости и диэлектрических свойств этой поверхности. Несмотря на такие существенные преимущества, как круглосуточность, относительная всепогодность съёмки и возможность получения новых характеристик земной поверхности, радиолокационные данные в гораздо меньшей степени используются при тематическом картографировании, чем снимки в оптическом диапазоне. Во многом это обусловлено сложностью восприятия и специфичностью обработки материалов РЛ съёмки, их меньшей до недавнего времени доступностью для широкого круга пользователей. Появление в открытом доступе современных (с 2014 г.) радиолокационных данных со спутников Sentinel-1 на любой участок суши Земли при высокой повторяемости съёмок, распространение программных средств их обработки открывают новые возможности для географических исследований, делают актуальной разработку методик использования радиолокационных данных для создания тематических карт.

Цель диссертационной работы заключается в разработке методики использования спутниковых радиолокационных данных для географического дешифрирования и тематического картографирования.

Достижение сформулированной цели предусматривает выполнение следующих **этапов работы**:

1. Обзор мирового опыта применения радиолокационных данных в географических исследованиях и при создании карт;
2. Выбор районов картографирования, репрезентативных с точки зрения демонстрации преимуществ материалов радиолокационной съёмки; формирование наборов радиолокационных данных для их исследования;
3. Исследование особенностей изображения географических объектов и их свойств на космических радиолокационных снимках;
4. Разработка методики обработки радиолокационных данных с целью их подготовки для дешифрирования;
5. Обоснование необходимости привлечения дополнительных источников для дешифрирования радиолокационных снимков, определение состава этих источников для тестовых районов;

6. Дешифрирование объектов по преобразованным радиолокационным снимкам с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволн с зондируемой поверхностью и дополнительные источники;

7. Составление тематических карт на основе преобразованных радиолокационных изображений и дополнительных источников.

Методологическая основа исследования и исходные материалы. В основе работы лежат научно-методические принципы картографирования, разработанные К.А. Салищевым, И.П. Заруцкой, А.И. Спиридоновым, Е.М. Николаевской; Т.Г. Сватковой, С.А. Сладкопевцевым, А.М. Берлянтом; аэрокосмические методы географических исследований и методы географического дешифрирования снимков для создания карт, разработанные Л.Е. Смирновым, Л.А. Богомоловым, Т.В. Верещакой, Б.В. Виноградовым, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной, Е.А. Балдиной; методы радиолокационного зондирования и обработки радиолокационных данных, разработанные Л.Б. Неронским, Л.А. Школьным, А.И. Захаровым, Т.Н. Чимитдоржиевым; J.-S. Lee, E. Pottier, J.J. van Zyl; методы статистического анализа данных.

В основе диссертационной работы лежат исследования автора, проводимые с 2011 года в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ и в Научном центре оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» (НЦ ОМЗ), в том числе полевые экспедиции в Камызякском и Приволжском районе Астраханской области на базе Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого овощеводства и бахчеводства (ВНИИОБ). Основные исходные материалы в работе – радиолокационные данные, полученные со спутников Radarsat-2, Sentinel-1A и -1B, TerraSAR- и TanDEM-X, ALOS/PALSAR, космические снимки в оптическом диапазоне, полученные со спутников Landsat, общедоступные снимки сверхвысокого пространственного разрешения с Интернет-порталов.

Объектом исследования являются данные космических радиолокационных съёмок, **предметом** исследования – методы их применения для тематического картографирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Материалы радиолокационных съёмок возможно использовать как самостоятельный источник данных для тематического картографирования в тех случаях, когда съёмка в оптическом диапазоне невозможна или не даёт возможности извлечения требуемых характеристик местности.

2. Использование радиолокационных данных для создания карт требует их предварительной обработки, результатом которой являются производные изображения. Предлагаемые подходы к формированию многовременных и

многополяризационных изображений позволяют проводить их визуальное и автоматизированное дешифрирование.

3. Автоматизированное дешифрирование производных изображений на основе комплексных поляриметрических радиолокационных данных обеспечивает выявление участков неиспользуемых сельскохозяйственных угодий в аридной зоне, подверженных опустыниванию и зарастанию древесно-кустарниковой растительностью.

4. Автоматизированное и визуальное дешифрирование производных изображений на основе амплитудных разносезонных радиолокационных снимков обеспечивает выделение границ природно-территориальных комплексов арктических районов, географическая интерпретация которых выполняется с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностью и дополнительные источники.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана методика создания производных радиолокационных изображений, пригодных для географического дешифрирования и создания тематических карт на их основе.

2. На основе разработанного подхода созданы оригинальные карты природно-территориальных комплексов острова Котельный и сельскохозяйственных земель в дельте Волги, при этом впервые в качестве дешифровочных признаков объектов использованы многополяризационные и многовременные образы интенсивности обратного радиосигнала.

Практическая значимость работы и внедрение. Материалы диссертации использованы в работах по проекту «Применение данных Radarsat-2 для сельскохозяйственного мониторинга в дельте Волги и мониторинга смещений в г. Волгоград» (программа Канадского космического агентства SOAR-EI – Science and Operational Applications Research Education International Initiative, проект №5137). Результаты диссертационного исследования включены в «Электронный атлас Каспийского моря», учебно-методическое пособие «Радиолокационные данные в географических исследованиях и картографировании» (зарегистрировано в ФГУП НТЦ «Информрегистр», регистрационное свидетельство обязательного федерального экземпляра электронного издания №51762 от 2 ноября 2017 г.), которое используется в учебных курсах кафедры картографии и геоинформатики «Дешифрирование аэрокосмических снимков» и «Компьютерная обработка снимков нового типа».

Результаты исследования целесообразно применять при картографировании и мониторинге труднодоступных приполярных территорий; при выявлении неиспользуемых сельскохозяйственных угодий и оценке их агроэкологического состояния; при обучении специалистов-географов основам работы с материалами

космического радиолокационного зондирования Земли.

Апробация. Результаты проведенных исследований были доложены на XII, XIII, XV открытых всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014, 2015, 2017); на 5-ой международной конференции GEOBIA (Салоники, 2014); на Региональной конференции Международного географического союза (IGU-Moscow-2015) (Москва, 2015); II Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли" (Красноярск, 2015); III заседании рабочей группы IV/2 ISPRS “Global Geospatial Information and High Resolution Global Land Cover/Land Use Mapping” (Новосибирск, 2016); на симпозиуме Европейского космического агентства Living Planet (Прага, 2016); всероссийской научной конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время» (Москва, 2016); научной конференции «Ломоносовские чтения-2017» (Москва, 2017).

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (168 наименований), содержит 158 страниц текста, 12 таблиц, 49 рисунков, 3 приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в подготовке диссертации своему научному руководителю к.г.н. Е.А. Балдиной, рецензентам д.г.н. В.И. Кравцовой, к.г.н. Е.Р. Чаловой, к.г.н. С.В. Чистову, к.г.н. Н.И. Тульской, всему коллективу кафедры картографии и геоинформатики, в особенности, заведующей кафедрой, д.г.н. И.К. Лурье; за ценные консультации к.г.н. И.А. Лабутиной, к.г.н. Ф.А. Романенко, к.г.-м.н. Е.И. Пижанковой, П.В. Денисову; за помощь в организации и проведении полевых работ д.с-х.н. М.Ю. Пучкову, М.А. Лысакову, А.С. Мартьянову; за помощь в подборе и обработке материалов Н.Р. Николаеву; за предоставление радиолокационных данных Научному центру оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Канадскому космическому агентству и компании MDA, за предоставление данных и пробных версий программного обеспечения компании «Совзонд».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Мировой опыт применения материалов радиолокационного зондирования в науках о Земле

Материалы РЛ съёмки, которые сейчас получают радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), существенно отличаются от наиболее часто

используемых для тематического картографирования снимков в оптическом диапазоне, что обусловлено технологией съёмки (активным методом зондирования, используемыми диапазонами длин волн, геометрией визирования и др.) и спецификой взаимодействия радиоволн с зондируемой поверхностью (интенсивность обратного сигнала зависит, прежде всего, от шероховатости и диэлектрических свойств поверхности). Это обеспечивает возможность получения новой информации о земной поверхности, которая может быть использована в географических исследованиях и тематическом картографировании.

Мировой фонд данных, получаемых космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой, начал формироваться с 1978 года, когда на орбиту был выведен спутник с РСА Seasat. С тех пор наблюдался общий рост количества космических РЛ систем (в т.ч. отечественные «Космос-1870», «Алмаз-1А»), усовершенствование их технических характеристик (повышение пространственного разрешения, увеличение количества съёмочных режимов, в т.ч. в разных поляризациях и др.). Наиболее динамично космическая РЛ съёмка начала развиваться с середины первого десятилетия 2000-х гг., а в настоящее время мировая группировка спутников дистанционного зондирования Земли представлена пятнадцатью космическими аппаратами радиолокационного наблюдения. Особо значимым этапом в развитии радиолокационного зондирования Земли стал запуск в 2014 и 2016 гг. европейских спутников Sentinel-1A и -1B, оснащённых РСА С-диапазона, поскольку впервые регулярно получаемые зарубежные материалы радиолокационных съёмок начали распространяться на некоммерческой основе, что обеспечивает доступ к ним широкому кругу пользователей, в том числе для проведения географических исследований.

Наличие нескольких составляющих радиосигнала (амплитуда, поляризация, фаза) способствовало развитию разнообразных методов их обработки (обработка амплитудной составляющей, радиолокационная интерферометрия, основанная на преобразовании фазовой компоненты, поляриметрия и др.), позволяющих извлекать различные характеристики местности. Материалы космических радиолокационных съёмок используются во многих областях наук о Земле [Ouchi, 2013], однако тематическое картографирование с использованием этого вида данных развито недостаточно. Одним из наиболее ранних приложений радиолокационных снимков стало картографирование влажных тропических лесов, районы распространения которых особенно часто закрыты облаками [Silva, 1998; Rosenqvist et al., 2000]. Впоследствии данные этого вида получили широкое применение при картографировании запасов фитомассы древесной растительности, в частности, в рамках международных проектов SIBERIA, Forest Dragon и др. В настоящее время особо проработанным направлением является создание оперативных карт ледовой обстановки, наводнений и плёночных

загрязнений акваторий [Комплексный спутниковый ..., 2011]. В последние годы активно развивается тематическое картографирование с опорой на методы радиолокационной интерферометрии, позволяющие получать значения высот поверхности и их изменений, применяемые для изучения вулканов [Михайлюкова, Тутубалина, 2016], ледников [Sharov, Nikolskiy, 2013], просадок поверхности на месторождениях полезных ископаемых [Захаров, Захарова, 2006] и т.д. Невысокая степень проработки вопроса использования радиолокационных данных, особенно разновременных, в других областях тематического картографирования, возможность получения новой информации о земной поверхности обусловливают необходимость разработки соответствующих методик их обработки, позволяющей использовать материалы радиолокационной съёмки для создания тематических карт.

Глава 2. Методика обработки радиолокационных данных для картографирования

Районы и материалы исследования. Методические вопросы обработки радиолокационных данных исследованы на примере двух районов, существенно различающихся по степени изученности и своим свойствам, которые должны продемонстрировать преимущества РЛ данных для географического дешифрирования и тематического картографирования.

Один из районов, дельта Волги, хорошо обеспечен литературными источниками, картами и материалами полевых обследований. Основное направление использования радиолокационных данных для этой территории – оценка и картографирование состояния неиспользуемых сельскохозяйственных земель (залежей), что позволит продемонстрировать высокую чувствительность радиоволнового излучения к характеристикам почвенно-растительного покрова. Для решения этой задачи выполнен заказ четырёхкратных поляриметрических радиолокационных съёмок со спутника Radarsat-2 в летний период 2014 г.

Другой район, остров Котельный, относится к северным приполярным территориям, картографирование и мониторинг состояния которых представляет одно из наиболее актуальных направлений использования данных радиолокационной съёмки ввиду ее полной независимости от условий освещённости и относительной – от облачности. Этот регион характеризуется весьма малой изученностью и намного слабее обеспечен безоблачными снимками в оптическом диапазоне. Острову Котельный свойственно достаточно большое для высоких широт ландшафтное разнообразие, что позволит продемонстрировать возможности радиолокационных снимков для картографирования арктических территорий в целом. Для картографирования природно-территориальных комплексов острова из открытого архива отобраны разновременные амплитудные двухполяризационные радиолокационные снимки,

полученные со спутника Sentinel-1A в период с декабря 2014 г. по ноябрь 2016 г.

Для обеих территорий подобраны дополнительные источники информации о местности, необходимые для: 1) выявления свойств местности, влияющих на интенсивность обратного рассеяния радиоволн, 2) выбора эталонов для классификации, 3) оценки достоверности результатов применения разных методов обработки, 4) создания географической основы карт. Для обеих территорий такими источниками являлись топографические карты, снимки в оптическом диапазоне, данные о погоде в момент съёмки. На участке дельты Волги одновременно с повторными космическими съёмками при участии автора выполнялись наземные обследования местности. Для труднодоступного и недостаточно изученного, в том числе дистанционными методами, острова Котельный большую роль играли литературные источники, тематические карты и схемы (геологическая, геоморфологическая, геоботаническая и др.).

Создание производных радиолокационных изображений как подготовительный этап для дешифрирования и картографирования. Исходные материалы космических радиолокационных съёмок затруднительно напрямую использовать для дешифрирования и картографирования ввиду нескольких причин. Во-первых, на них находит отображение непривычное для восприятия человека отражённое радиоволновое излучение. Во-вторых, определённые трудности при визуальном и автоматизированном дешифрировании РЛ снимков вызывает спекл-шум, специфические геометрические и яркостные искажения. Это обусловливает необходимость предварительной обработки материалов радиолокационной съёмки. Этапы предварительной обработки различаются в зависимости от вида исходных данных и решаемой задачи. На основе проведённых экспериментов предложено создавать два вида производных изображений со сниженным уровнем спекл-шума – пригодных для 1) визуального и 2) автоматизированного дешифрирования (рис. 1). К первым относятся изображения с улучшенными изобразительными свойствами – цветные синтезированные многополяризационные или многовременные снимки, ко вторым – изображения, прошедшие радиометрическую калибровку, пригодные для измерения значений коэффициента обратного рассеяния и последующей классификации на их основе. Последние могут быть как одноканальными, так и многоканальными (многополяризационными или многовременными), к ним также относятся результаты поляриметрических декомпозиций – производные изображения, характеризующие выраженность того или иного механизма рассеяния радиоволн поверхностью.

Анализ свойств местности, влияющих на интенсивность обратного рассеяния радиосигнала (значения удельной эффективной поверхности рассеяния, УЭПР). Для дешифрирования созданных производных изображений необходимо

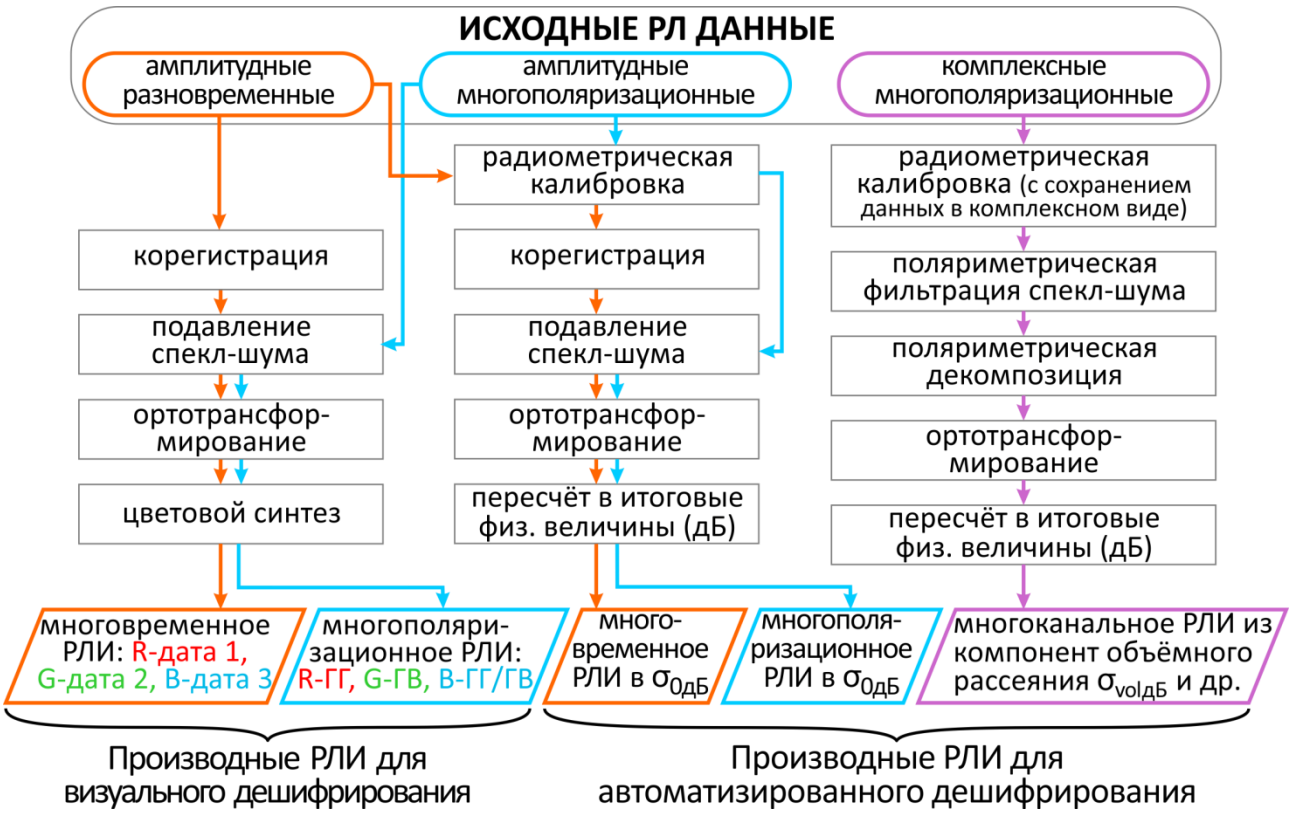

Рис. 1. Сводная блок-схема создания производных радиолокационных изображений (РЛИ) для дешифрирования

установить основные свойства местности, определяющие характер её отображения на многополяризационных и разновременных радиолокационных снимках. Они выявлены на основании пространственно-координированного сопоставления производных изображений с дополнительными источниками информации.

Анализ значений УЭПР на многополяризационных снимках в пределах участков сельскохозяйственных земель в дельте Волги в летний период показал, что они, как правило, возрастают при увеличении комковатости почвы, высоты и густоты растительности. Внутрисезонные различия в состоянии поверхности залежей на разновременных снимках выражены незначительно, что позволяет дифференцировать их от существенно меняющихся в течение вегетационного периода возделываемых земель.

Обратное рассеяние от поверхности острова Котельный определяется большим количеством факторов: видом расчленения рельефа (эрозионное или термокарстовое) и его степенью, характером рыхлых отложений и растительного покрова и др. Существенны сезонные различия УЭПР: как правило, более низкие значения свойственны зимнему периоду, а более высокие – летнему, что объясняется в основном сменой диэлектрических свойств зондируемой поверхности (низкая диэлектрическая проницаемость зимой и более высокая – летом из-за промерзания и оттаивания сезонно-талого слоя соответственно).

Дешифрирование производных радиолокационных изображений. Применение

стандартных методов классификации к многополяризационным и многовременным производным изображениям обеспечивает объективное выделение однородных участков по значениям интенсивности обратного рассеяния.

Для оценки состояния залежей на участке в дельте Волги использовались изображения, наиболее чувствительные к характеристикам растительного покрова: снимок в перекрёстной поляризации и изображение компоненты объемного рассеяния, полученное в результате поляриметрической декомпозиции. Сравнение различных вариантов предварительной обработки этих изображений (фильтрации спекл-шума с использованием разных алгоритмов и размеров скользящего окна, декомпозиций с использованием разных алгоритмов) осуществлялось путем сопоставления полученных результатов классификации и оценки их достоверности на основе материалов наземных обследований и снимков сверхвысокого пространственного разрешения в видимом диапазоне. Установлено, что использование изображения компоненты объёмного рассеяния позволяет получить более высокую достоверность по сравнению с изображением в перекрёстной поляризации. Наиболее достоверный результат автоматизированного дешифрирования получен при использовании следующих параметров обработки набора разновременных комплексных поляриметрических данных: применение фильтра BoxCar с размером скользящего окна 5x5 пикселов; выполнение поляриметрической декомпозиции Freeman-Durden; классификация изображений, характеризующих интенсивность объёмного рассеяния, значения пикселов которых выражены в децибелах, по методу минимального расстояния на 3 класса (рис. 2).

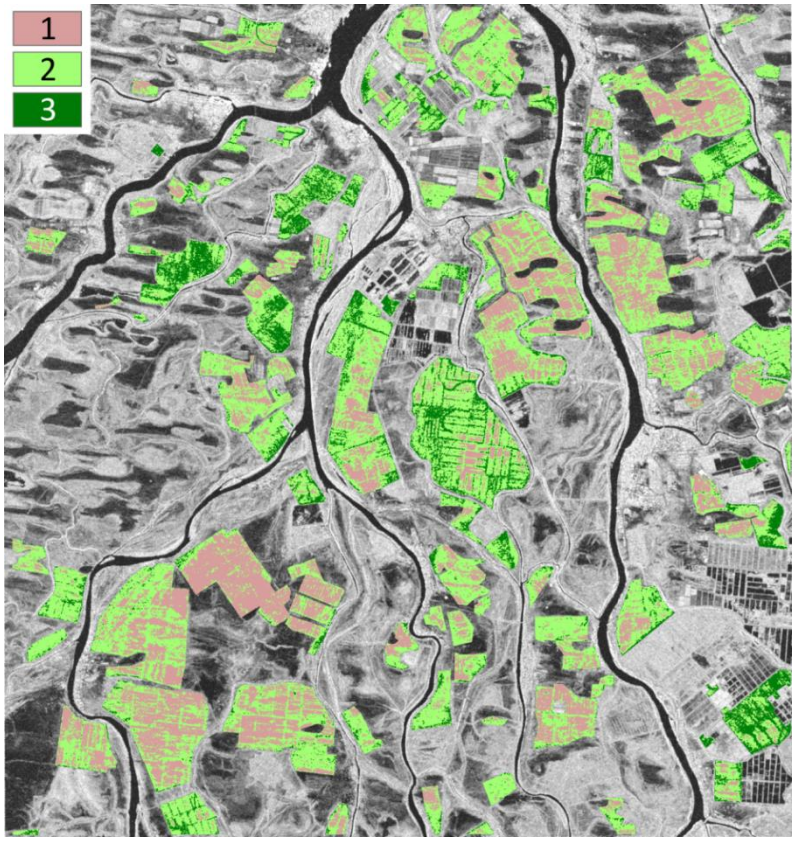

Рис. 2. Результат контролируемой классификации залежей:
1 – практически открытая почва с высохшими эфемерами,
2 – вегетирующая травянистая растительность,
3 – древесно-кустарниковая растительность

Проведённые эксперименты по автоматизированному дешифрированию изображений Sentinel-1A на территорию острова Котельный выявили целесообразность использования многовременного радиолокационного снимка, составленного из нескольких разносезонных изображений в согласованной ГГ-поляризации. На рисунке 3 приведены результаты неконтролируемой классификации многовременного производного изображения Sentinel-1A и соответствующие им графики временных образов кластеров. При задании двух классов уверенно разделяются лишь нерасчленённые песчаные поверхности, практически лишённые растительного покрова (красный), и остальные участки с различной степенью эрозионного и термокарстового расчленения, местами покрытые растительностью (зелёный). При увеличении количества классов до 5 в западной и восточной частях острова разделяются классы, соответствующие заболоченным долинам рек и термокарстовым котловинам (синий), равнинным участкам с различным характером и степенью расчленения (жёлтый), возвышенным участкам плато (голубой), в центральной – нерасчленённой песчаной равнине (красный) и участкам распространения прочных дочетвертичных пород с преобладанием эрозионного расчленения (зелёный).

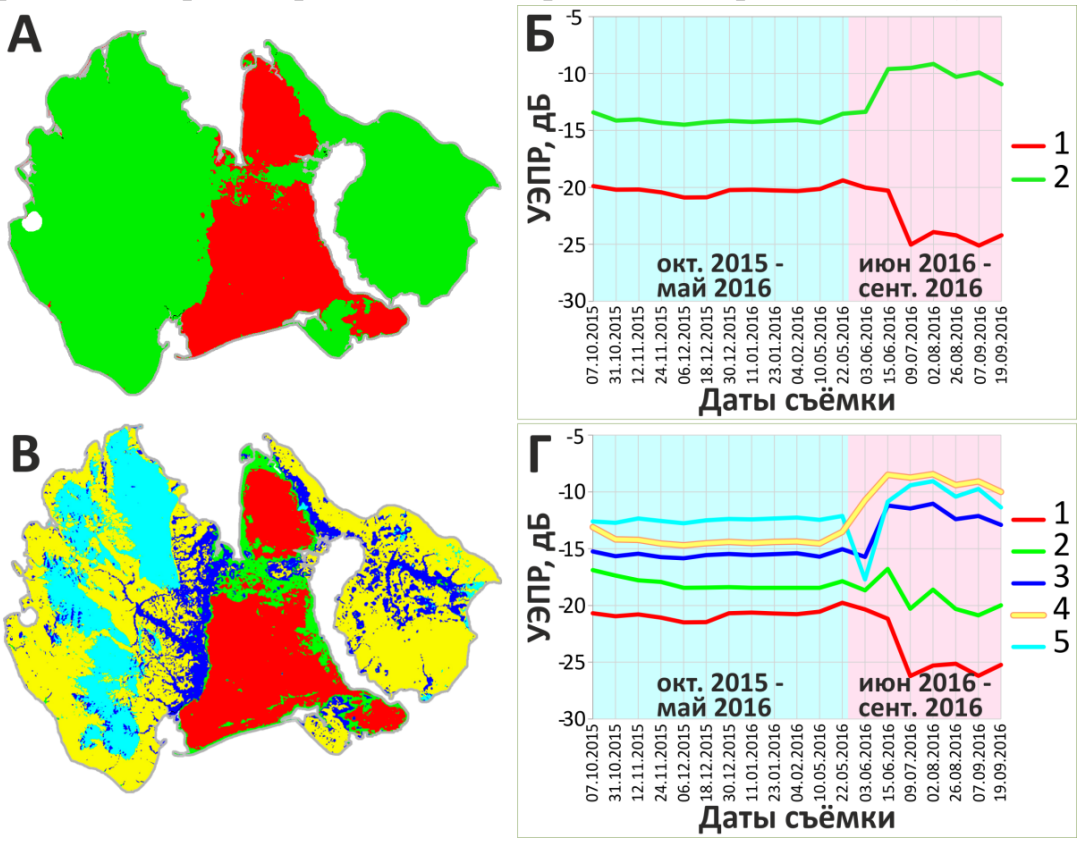

Рис. 3. Результаты неконтролируемой классификации многовременного производного РЛ изображения Sentinel-1A, составленного из 19 снимков в ГГ-поляризации (07.10.2015-19.09.2016): а – 2 класса, в – 5 классов, б и г – графики временных образов кластеров

В отличие от классификации изображения участка дельты Волги, выбор одного варианта классификации снимка острова Котельный затруднителен.

Анализ результатов классификации многовременного производного изображения с различными параметрами позволил сделать вывод, что оптимальным вариантом для картографирования природно-территориальных комплексов острова Котельный является сочетание различных приёмов дешифрирования – автоматизированного и визуального. Первый позволяет оперативно выделить границы объектов в соответствии с характерным для них годовым ходом значений УЭПР (при этом в зависимости от требуемого уровня детализации создаваемой карты могут использоваться несколько вариантов кластеризации), второй – отредактировать их с учётом границ, различимых при визуальном анализе изображения, но не выделяемых компьютером.

Таким образом, эффективность автоматизированного дешифрирования радиолокационных изображений во многом зависит от числа поддающихся учёту факторов, определяющих интенсивность обратного сигнала. При малом количестве факторов, что характерно для большей части залежей на участке дельты Волги, для картографирования их состояния возможно использование только методов автоматизированного дешифрирования, в то время как в более сложных случаях (таких, как остров Котельный) требуется сочетание методов автоматизированного и визуального дешифрирования.

Глава 3. Тематическое картографирование на основе производных радиолокационных изображений

Обобщив проведённые эксперименты, методику использования радиолокационных данных для тематического картографирования можно представить в виде блок-схемы, приведённой на рисунке 4.

Рис. 4. Принципиальная схема использования радиолокационных данных для тематического картографирования

Собственно составление тематических карт основывается на совместном применении производных радиолокационных изображений (результатов их автоматизированного и визуального дешифрирования) и дополнительных источников информации о местности.

Карта сельскохозяйственных земель дельты Волги масштаба 1:100 000 (рис. 5) составлена на основе многовременных и многополяризационных производных радиолокационных изображений 2011 и 2014 гг., разновременных (практически ежегодных в период 1984-2014 гг.) снимков в оптическом диапазоне Landsat и топографических карт (1970-1980 гг.). На карте представлены три характеристики земель дельты: 1) виды их современного (в 2014 г.) использования, 2) динамика выведения пахотных земель из оборота и 3) современное состояние неиспользуемых земель. Для получения первых двух характеристик сельскохозяйственных угодий использовались все источники, однако, основная роль в определении длительности периода неиспользования земель была отведена многолетней серии снимков Landsat. Отметим, что при наличии долговременного архива радиолокационных снимков (аналогичного архиву снимков Landsat) они могли бы полностью заменить снимки в оптическом диапазоне при решении этой задачи. Информация о современном состоянии залежей полностью получена на основе радиолокационных данных Radarsat-2 2014 года.

При создании карты природно-территориальных комплексов острова Котельный основная часть границ была выделена по производному многовременному радиолокационному изображению (по результатам его кластеризации с разными параметрами с последующим редактированием границ кластеров). Однако при интерпретации выделов существенную роль играл обширный комплект пространственно-координированных дополнительных источников, поскольку согласование различий в изменениях интенсивности сигнала только с известными закономерностями взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностями, имеющими разную шероховатость и диэлектрические свойства, недостаточно: на обратный сигнал от различных участков острова влияет целый комплекс характеристик местности (а именно, её рельефа, растительного покрова, степени увлажнения поверхности и т.д.). Дополнительные картографические источники позволили установить соответствие областей, выделенных по многовременному радиолокационному снимку, объектам местности, представленным на уже созданных картах, а снимки в оптическом диапазоне позволили оценить вклад в обратный сигнал таких характеристик местности, как обилие растительности, степень эрозионного и термокарстового расчленения территории и др. Составленная карта масштаба 1:750 000 (рис. 6) даёт представление о современных природно-территориальных комплексах острова Котельный, различающихся по характеру сезонной изменчивости

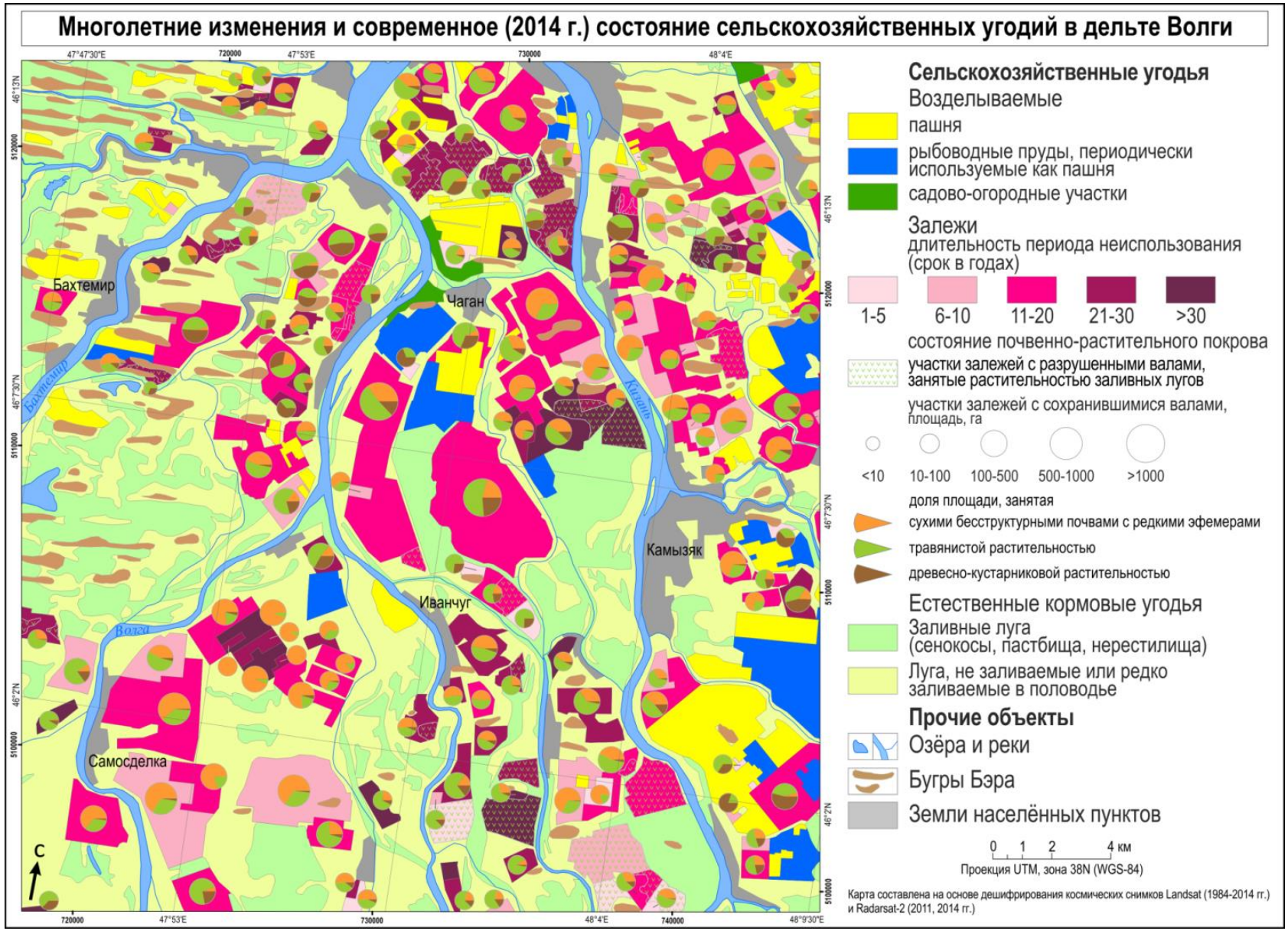

Рис. 5 Фрагмент карты сельскохозяйственных угодий на участке дельты Волги

Рис. 6. Карта природно-территориальных комплексов острова Котельный

УЭПР, который обусловлен уникальным сочетанием рельефа, растительного покрова и грунтов. Материалы зимних радиолокационных съёмок двух лет позволили также выявить различия в характере промерзания озёр в пределах

острова. Благодаря наличию разновременных радиолокационных данных итоговая карта характеризуется значительно большей детальностью и более крупным масштабом по сравнению с использованными тематическими источниками.

Проведённые эксперименты показали, что как самостоятельный источник информации для создания карт данные радиолокационной съёмки можно использовать при априорном знании особенностей картографируемой территории (например, в случае залежей в аридной зоне заранее известно, что преобладающий вклад в интенсивность обратного рассеяния будут вносить однократное рассеяние от почвы и объемное рассеяние от растительности, а увеличение запасов фитомассы будет в целом приводить к возрастанию УЭПР). В других случаях (при слабом знакомстве с местностью, комплексности взаимодействия радиоволнового излучения с зондируемой поверхностью) картографирование по радиолокационным данным во многом должно опираться на другие источники информации при сохранении особой роли разновременных РЛ данных.

Глава 4. Основы географо-картографического применения радиолокационных данных в учебно-методическом пособии

Проведенные автором эксперименты по некоторым видам тематического картографирования на основе радиолокационных данных позволяют обобщить их результаты и сформулировать методические основы применения материалов радиолокационных съёмок при географических исследованиях и картографировании, что особенно актуально в связи с появлением общедоступных данных этого вида и возможностью получения новой информации на их основе. Учитывая мировой и российский опыт распространения знаний по использованию данных дистанционного зондирования, целесообразно представить их в виде учебно-методического пособия, систематизирующего информацию, необходимую географам, предполагающим использовать радиолокационные снимки: сведения о современных космических радиолокационных системах и предоставляемых ими данных, методах их обработки и примерах практического использования при решении конкретных географических задач. Анализ существующих образовательных материалов по радиолокационному зондированию показал, что большая их часть представлена на иностранных языках и зачастую перегружена специальной терминологией и техническими деталями, что усложняет их восприятие исследователями, не работавшими ранее с данными космических съёмок в радиоволновом диапазоне. Это во многом обусловило необходимость разработки методических наглядных материалов, адаптированных для географов.

Потенциальные пользователи пособия (студенты и специалисты-географы)

в большинстве своём знакомы со снимками в оптическом диапазоне, от которых радиолокационные данные существенно отличаются. Для их ознакомления с материалами радиолокационной съёмки в структуре пособия (рис. 7) выделен теоретический раздел, в котором последовательно изложены вопросы, относящиеся к отличительным особенностям съёмочной аппаратуры, свойствам местности, влияющим на формирование обратного сигнала, и характеристикам самих материалов съёмки. Такая последовательность позволяет подчеркнуть отличия радиолокационных данных от снимков в оптическом диапазоне, возникающие на разных этапах формирования этих данных. В разделе обособлены вопросы обработки радиолокационных данных, приведения их в вид, пригодный для выполнения географического дешифрирования. Их выделение необходимо в связи с тем, что существенная часть операций, применяемых к материалам радиолокационной съёмки, не используется для снимков в оптическом диапазоне. Завершает первый раздел обзор современных космических радиолокационных систем, их характеристик и областей применения данных, знакомя читателей со спектром задач, успешно решаемых с применением материалов радиолокационных съёмок. Первый раздел составлен преимущественно на основе литературных источников, текстовый материал в нём насыщен иллюстрациями, среди которых – специально разработанные схемы и подобранные пары снимков в оптическом и радиоволновом диапазоне, наглядно демонстрирующие свойства последних. Второй раздел пособия основан на результатах работ, проведённых автором с использованием радиолокационных данных, полученных разными съёмочными системами, охватывающих разные

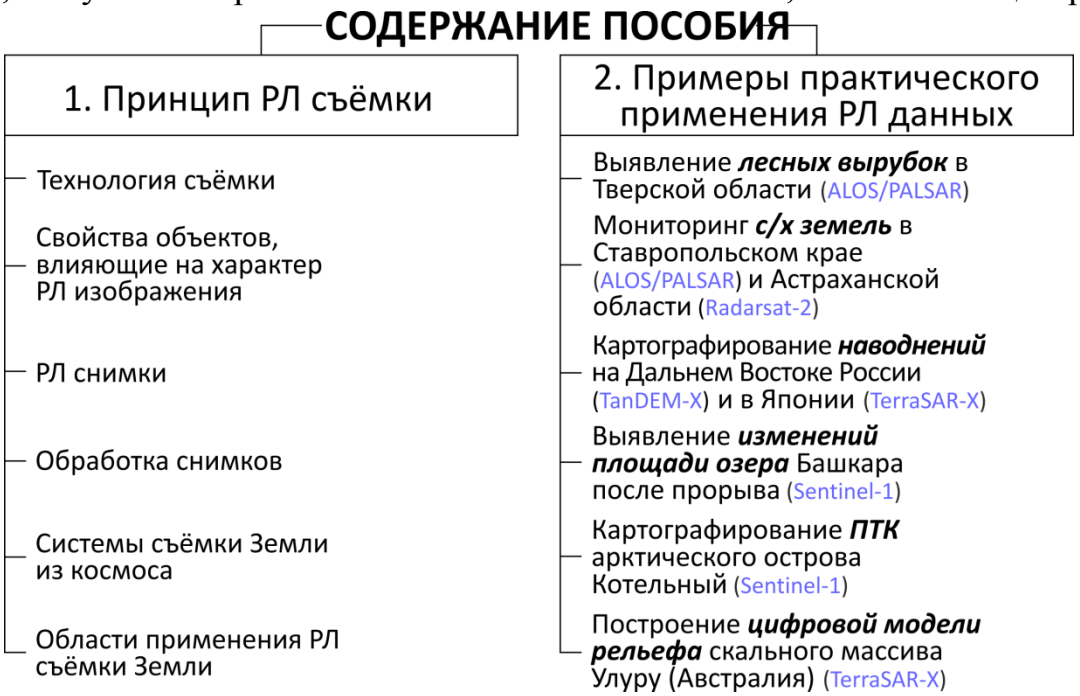

Рис. 7. Содержание учебно-методического наглядного пособия «Радиолокационные данные в географических исследованиях и картографировании»

регионы Земли и предназначенных для решения разных задач (сельского и лесного хозяйства, создания цифровых моделей рельефа и др.). В нём представлены различные подходы к преобразованию амплитудных, поляриметрических и интерферометрических радиолокационных данных, показаны также возможности комплексирования радиолокационных изображений со снимками в оптическом диапазоне. Для правильного понимания и интерпретации читателем радиолокационных снимков и производных из них изображений приведены схемы дешифрирования и составленные на их основе карты.

Пособие представлено в двух формах: бумажной (комплект листов формата А3) и электронной (набор страниц, написанных на языке гипертекстовой разметки HTML, переход между которыми осуществляется посредством гиперссылок). Электронный вариант пособия размещён на сайте кафедры картографии и геоинформатики (http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/radiolocation/) и, наряду с бумажным, используется в учебных курсах и в исследовательских работах.

Заключение

Проведенная работа позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Космическое радиолокационное зондирование Земли – динамично развивающееся на протяжении нескольких последних десятилетий направление. Материалы космических радиолокационных съёмок используются во многих областях наук о Земле, однако тематическое картографирование с опорой на этот вид данных развито недостаточно. Наиболее проработанными направлениями являются создание оперативных карт ледовой обстановки, наводнений и плёночных загрязнений акваторий, картографирование лесной растительности, высот поверхности и их изменений. Вопрос использования радиолокационных данных в других областях тематического картографировании проработан слабее.

2. Разработанная методика использования радиолокационных данных для тематического картографирования варьирует в зависимости от конкретной территории и географической задачи, но в целом включает такие основные этапы, как выбор радиолокационных данных и дополнительных источников; предварительную обработку радиолокационных данных, нацеленную на формирование производных изображений, пригодных для дешифрирования; компьютерную классификацию производных изображений при разных параметрах с последующим выбором оптимального варианта; создание векторной карты на основе результата классификации с последующим редактированием контуров на основе изображений, пригодных для визуального дешифрирования и дополнительных источников. Важным этапом, отличающим разработанную

методику от других, применяемых для тематического картографирования по космическим снимкам, является формирование производных изображений со сниженным уровнем спекл-шума, предназначенных для автоматизированного (одноканальные, многоканальные многополяризационные или многовременные изображения после радиометрической калибровки) и визуального дешифрирования (цветные синтезированные многополяризационные и многовременные изображения).

3. На обратный радиосигнал влияют различные свойства местности в зависимости от географических особенностей исследуемой территории. На исследуемом участке дельты Волги основными факторами, определяющими интенсивность обратного рассеяния радиосигнала в летний период, являются комковатость почв, высота и густота растительности. Обратное рассеяние от поверхности острова Котельный зависит от большего количества факторов: состояния сезонно-талого слоя, характера и степени расчленения рельефа, особенностей растительного покрова, степени увлажнения поверхности, характера рыхлых отложений. Степень «сложности» картографируемой территории с точки зрения свойств местности, одновременно влияющих на УЭПР, во многом определяет возможность применения автоматизированного дешифрирования производных радиолокационных изображений. При относительной «простоте» территории (т.е. ограниченном числе характеристик местности, формирующих обратный сигнал) для ее картографирования возможно использовать только методы компьютерной классификации, в более сложных случаях требуется сочетание принципов автоматизированного и визуального дешифрирования.

4. Тематическое картографирование на основе производных радиолокационных изображений наиболее эффективно при их использовании совместно с дополнительными источниками. Роль радиолокационных данных в тематическом картографировании может быть различной в зависимости от исследуемой территории и тематики картографирования. Как самостоятельный источник для создания карт этот вид данных можно использовать при уверенном знании особенностей картографируемой территории и относительной «простоте» картографируемого объекта. В остальных же случаях существенно возрастает роль сторонних источников информации.

5. Опыт работы с радиолокационными изображениями обобщен в виде учебно-методического наглядного пособия, в котором систематизированы особенности выполнения съемок при разных режимах работы систем, виды получаемых изображений, возможности их преобразования и дешифрирования. На наиболее типичных примерах проиллюстрированы особенности радиолокационных снимков и возможности их применения для географических

исследований и создания карт.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в базы Scopus, WoS и RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Трошко К.А.** Применение радиолокационных данных в географических исследованиях и картографировании: разработка наглядного пособия // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 3. – С. 72-79.

2. Балдина Е.А., Николаев Н.Р., **Трошко К.А.** Радиолокационные данные Sentinel-1 и возможности их обработки для дешифрирования форм рельефа острова Котельный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016.– № 3.– С. 78-85.

3. Балдина Е.А., **Трошко К.А.** Картографирование современного состояния и многолетних изменений в использовании сельскохозяйственных земель в дельте Волги // Геодезия и картография. – 2016. – №11. – С. 39-46.

Публикации в журналах из перечня ВАК:

4. Мартьянов А.С., Балдина Е.А., Денисов П.В., **Трошко К.А.** Космический радиолокационный мониторинг для сельского хозяйства // Нелинейный мир. – 2017. – № 2. – С. 42-44.

Иные публикации:

5. Baldina E.A., **Troshko K.A.** The use of RADARSAT-2 data for abandoned agricultural lands classification // South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics. – 2014.– Vol. 3, no. 2S. – P. 455-459.

6. Балдина Е.А., **Трошко К.А.** Опыт обработки радиолокационных данных в интересах географического картографирования // ИнтерКарто 20. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Материалы международной конференции, Белгород, 23-24 июля 2014. – Белгород: изд. «Константа». – 2014.– С. 80-84.

7. Балдина Е.А., Денисов П.В., Лысаков М.А., Мартьянов А.С., Пучков М.Ю., **Трошко К.А.** Применение спутниковых радиолокационных данных для оценки состояния сельскохозяйственных угодий дельты Волги // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II Междунар. науч. конференция, 22–25 сентября 2015, г. Красноярск. – Красноярск: СФУ. – 2015. – С. 37-41.

8. Baldina E.A., **Troshko K.A.** Agricultural lands use dynamics in the Volga river delta from multitemporal remote sensing data // IGU 2015 Book of Abstracts. – Moscow. – P. 654

9. Baldina Elena A., **Troshko Ksenia A.** Mapping of the current state and long-term changes of agricultural lands in the Volga delta // Proceedings of ISPRS WG IV/2 workshop, 21 Apr. 2016. – Novosibirsk: SSUGT. – 2016. – P. 93-101.
10. Denisov Pavel, Martyanov Alexander, Baldina Elena, **Troshko Ksenia**. The Volga Delta Agricultural Lands Abandonment and Current State Mapping Using Multi-Temporal And Multi-Sensor Remote Sensing Data // The 2016 European Space Agency Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lps16.esa.int/page_session187.php#1409p.
11. Балдина Е.А., Денисов П.В., Мартьянов А.С., **Трошко К.А.** Радиолокационное зондирование для решения задач сельского хозяйства // Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Муром: Полиграфический центр МИ ВлГУ. – 2016. – С. 162-172.
12. **Трошко К.А.**, Балдина Е.А., Николаев Н.Р. Возможности картографирования по радиолокационным данным Sentinel-1 (на примере острова Котельный) // Сборник тезисов Всероссийской научной конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время» (Москва, 25-28 октября 2016 г.). – М.: Географический факультет МГУ. – С. 275-276
13. Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., **Трошко К.А.** Исследование возможностей применения радиолокационных данных для тематического картографирования // Вопросы географии. Сб. 144: Картография в цифровую эпоху. – 2017. – С. 342-357