

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Трошко

Трошко Ксения Анатольевна

**Разработка методики использования радиолокационных данных
для тематического картографирования**

25.00.33 – картография

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
к.г.н., в.н.с. Балдина Елена Александровна

Москва – 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ	10
1.1. Принципы радиолокационного зондирования Земли	10
1.2. Характеристика систем радиолокационного зондирования Земли	14
1.3. Применение радиолокационных данных для получения информации о земной поверхности и её картографирования.....	22
1.3.1. Методы обработки радиолокационных данных	22
1.3.2. Опыт применения радиолокационных данных в географических исследованиях и картографировании	24
1.4. Выводы.....	34
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ.....	36
2.1. Выбор участков и объектов картографирования.....	36
2.1.1. Особенности ведения сельского хозяйства в дельте Волги	37
2.1.2. Краткая характеристика острова Котельный.....	39
2.2. Выбор радиолокационных данных в зависимости от задачи исследования	40
2.2.1. Данные Radarsat-2 и дополнительные источники для картографирования сельскохозяйственных земель в дельте Волги.....	44
2.2.2. Данные Sentinel-1 и дополнительные источники для картографирования природно-территориальных комплексов острова Котельный	49
2.3. Создание производных радиолокационных изображений как подготовительный этап к дешифрированию и картографированию.....	53
2.3.1. Стандартные этапы обработки амплитудных и поляриметрических радиолокационных данных	54
2.3.2. Методика создания производных радиолокационных изображений	60
2.4. Анализ свойств местности, влияющих на интенсивность обратного рассеяния радиосигнала (УЭПР)	65

2.4.1. УЭПР объектов в дельте Волги на радиолокационных изображениях Radarsat-2	65
2.4.2. УЭПР объектов острова Котельный на радиолокационных изображениях Sentinel-1A	71
2.5. Визуальное и автоматизированное дешифрирование для выделения контуров	84
2.5.1. Оценка применимости автоматизированной классификации производных радиолокационных изображений для оценки состояния неиспользуемых сельскохозяйственных земель	85
2.5.2. Исследование возможностей дешифрирования производных радиолокационных изображений для выделения природно-территориальных комплексов острова Котельный	91
2.5. Выводы	99
ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	102
3.1. Картографирование сельскохозяйственных угодий в дельте Волги как результат комплексного использования производных радиолокационных изображений Radarsat-2, снимков в оптическом диапазоне и топографических карт	104
3.2. Картографирование природно-территориальных комплексов острова Котельный на основе производных радиолокационных изображений Sentinel-1A и дополнительных источников	111
3.3. Особенности использования и роль радиолокационных данных в тематическом картографировании	115
3.4. Выводы	120
ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ГЕОГРАФО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОМ ПОСОБИИ	122
4.1. Обзор методических пособий по дистанционному зондированию Земли .	122

4.2. Разработка структуры, содержания и формы методического наглядного пособия	127
4.3. Выводы	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
Список литературы.....	139
Приложения.....	156

ВВЕДЕНИЕ

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 обуславливают независимость съёмки от облачности и большую проникающую способность, интенсивность рассеиваемого поверхностью сигнала зависит от её шероховатости и диэлектрических свойств. Радиолокационные данные содержат в себе несколько компонент зондирующего сигнала – его амплитуду (являющуюся аналогом яркости на снимках в оптическом диапазоне) и фазу (величину, которая при определённой обработке позволяет получать сведения о высотах поверхности), в т.ч. в нескольких поляризационных каналах. Таким образом, РЛ данные позволяют получать новую информацию о земной поверхности, не предоставляемую съёмочными системами других видов, которая может быть использована в целях картографирования объектов и их свойств.

Несмотря на такие существенные преимущества, как круглосуточность, относительная всепогодность съёмки и возможность получения новых характеристик земной поверхности, радиолокационные данные в гораздо меньшей степени используются для тематического картографирования, 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, связанной с высокой стоимостью. Однако появление в последние годы общедоступных радиолокационных данных, распространение программных средств их обработки открывают новые возможности для географических исследований, делают актуальной разработку методик преобразования радиолокационных данных для создания тематических карт.

Для оценки возможностей создания тематических карт на основе радиолокационных данных выбраны два района, существенно различающихся по своим свойствам и степени изученности. Один из них – дельта Волги – территория, хорошо обеспеченная литературными источниками, картами и материалами полевых обследований. Одно из актуальных направлений исследования этой территории – выявление и определение состояния выведенных из оборота ранее орошаемых сельскохозяйственных угодий. Другой район – остров Котельный – относится к арктическим приполярным территориям, картографирование и мониторинг состояния которых представляет одно из наиболее актуальных направлений использования данных радиолокационной съёмки ввиду ее независимости от облачности и условий освещения. Этот район намного слабее обеспечен снимками в оптическом диапазоне, характеризуется значительной удалённостью и труднодоступностью. Наличие разновременных многополяризационных радиолокационных данных на эти два района и большого количества дополнительных источников позволяет разработать методику использования материалов съёмок в радиоволновом диапазоне для создания тематических карт.

Целью работы является разработка методики преобразования спутниковых радиолокационных данных, обеспечивающей возможность географического дешифрирования и создания тематических карт на их основе.

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.

В основе работы лежат научно-методические принципы тематического картографирования, разработанные К.А. Салищевым, А.И. Спиридоновым, Е.М. Николаевской, А.М. Берлянт, И.П. Заруцкой; аэрокосмические методы географических исследований и методы географического дешифрирования аэрокосмических снимков, разработанные Л.Е. Смирновым, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной; методы радиолокационного зондирования и обработки радиолокационных данных, разработанные Л.Б. Неронским, Л.А. Школьным, А.И. Захаровым, И.В. Елизаветиным, 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.

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.

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, номер государственной регистрации обязательного экземпляра электронного издания – 0321703969), 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 северных приполярных территорий; при выявлении неиспользуемых сельскохозяйственных угодий и оценке их агроэкологического состояния; при обучении специалистов-географов основам работы с материалами космического радиолокационного зондирования Земли.

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).

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».

ГЛАВА 1. МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

1.1. Принципы радиолокационного зондирования Земли

Радиолокационная (РЛ) съёмка – вид аэрокосмической съёмки, осуществляемой радиолокатором – активным микроволновым датчиком, способным излучать и принимать рассеянные земной поверхностью поляризованные радиоволны в определённых диапазонах длин волн (частот), выделенных Регламентом радиосвязи [Верба и др., 2010] (табл. 1.1). Обратный сигнал несёт в себе информацию о физических и геометрических свойствах зондируемой поверхности.

Таблица 1.1

**Диапазоны длин волн и частот для радиолокационного зондирования Земли
[Jensen, 2000]**

Буквенное обозначение	Диапазон длин волн, см	Диапазон частот, ГГц
Ka	0,75-1,18	40,0-26,5
K	1,19-1,67	26,5-18,0
Ku	1,67-2,4	18,0-12,5
X	2,4-3,8	12,5-8,0
C	3,9-7,5	8,0-4,0
S	7,5-15,0	4,0-2,0
L	15,0-30,0	2,0-1,0
P	30,0-100	1,0-0,3

Дистанционное зондирование Земли в радиоволновом диапазоне имеет ряд принципиальных отличий от других видов съёмки [Карвер и др., 1985; Кронберг, 1988; Jensen, 2000; Woodhouse, 2005; Campbell, Wynne, 2011; Radar Basics]:

- при радиолокационной съёмке используются волны гораздо большей длины, чем при съёмке в оптическом диапазоне. Эти волны почти не поглощаются и не рассеиваются облаками, что позволяет получать изображения земной поверхности и расположенных на ней объектов практически независимо от метеорологических условий;

- принцип активной съёмки позволяет получать радиолокационные снимки вне зависимости от солнечного освещения, т.е. радиолокатор является средством круглосуточного наблюдения. Особенно это свойство радиолокационной съёмки важно для получения информации о приполярных широтах, где значительную

часть года наблюдается явление полярной ночи;

- получаемые материалы съёмки несут информацию о таких компонентах сигнала, как амплитуда и фаза. Различия в амплитуде сигнала позволяют распознавать объекты или их свойства по радиолокационным снимкам. Фазовая же составляющая при особых видах съёмки и последующей обработке (радиолокационная интерферометрия) позволяет получать информацию о высотах поверхности или её смещениях, а также о скоростях движения объектов;

- при радиолокационной съёмке используется такое свойство волн, как поляризация, которая определяется направлением вектора напряжённости электрического поля в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Обычно в РЛ зондировании используют линейную поляризацию излучаемого сигнала (горизонтальную – Г или вертикальную – В). Приём обратного сигнала могут вести на согласованных поляризациях (в таком случае приняты сокращения ГГ и ВВ) или на перекрёстных (ГВ, ВГ). Радиолокационная съёмка может осуществляться с разным набором поляризационных каналов: с одним, двумя или четырьмя. В последнее время встречаются варианты съёмки в компактно- и гибридно-поляризационном режимах, когда при излучении используется линейная поляризация с углом ориентации 45° или круговая (правая или левая) поляризация соответственно, а принимается горизонтально и вертикально поляризованный сигнал [Синёва, 2014]. Разнополяризованные волны по-разному взаимодействуют с объектами местности преимущественно в зависимости от их ориентации относительно падающей волны и внутренней структуры. Отмечается, что обратный сигнал в согласованных поляризациях обычно выше, чем в перекрёстных, а при отсутствии искажающих факторов комбинации ВГ и ГВ одинаковы [Верба и др., 2010]. Пример изображений, полученных одновременно в разных поляризациях, приведён на рисунке 1.1.

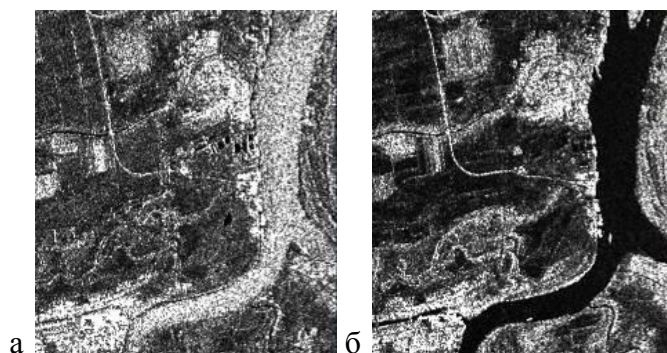


Рис. 1.1. Радиолокационные изображения Radarsat-2 в разных поляризациях: а – ВВ, б – ВГ

- на характер радиолокационных изображений влияют свойства зондируемых объектов, которые не проявляются на снимках, полученных в других диапазонах электромагнитного спектра: шероховатость поверхности и её диэлектрические свойства. Как правило, величина обратного сигнала (и, соответственно, яркость на РЛ изображении) возрастает при увеличении размеров неровностей поверхности и относительной диэлектрической проницаемости;

- в некоторых случаях на радиолокационных снимках проявляются подповерхностные объекты. Как правило, проникающая способность сигнала возрастает при увеличении длины волны [Campbell, Wynne, 2011];

- на отображение объектов на радиолокационных снимках влияет их ориентация относительно направления излучения, внутренняя структура этих объектов, которые в совокупности приводят к формированию разных механизмов рассеяния волн. При однократном рассеянии волны отражаются зеркально в сторону от радиолокатора. При объёмном рассеянии происходит многократное переотражение радиоволн от частей объектов, вследствие чего в сторону радиолокатора возвращается некоторая часть излучения. Двукратное рассеяние образуется в случае, когда волна отражается дважды: от вертикально и горизонтально ориентированных объектов, в результате чего значительная часть излучения возвращается в сторону радиолокатора. Как правило, наименьшую яркость на радиолокационных снимках имеют объекты, характеризующиеся однократным рассеянием, а наибольшую – двукратным (рис. 1.2);

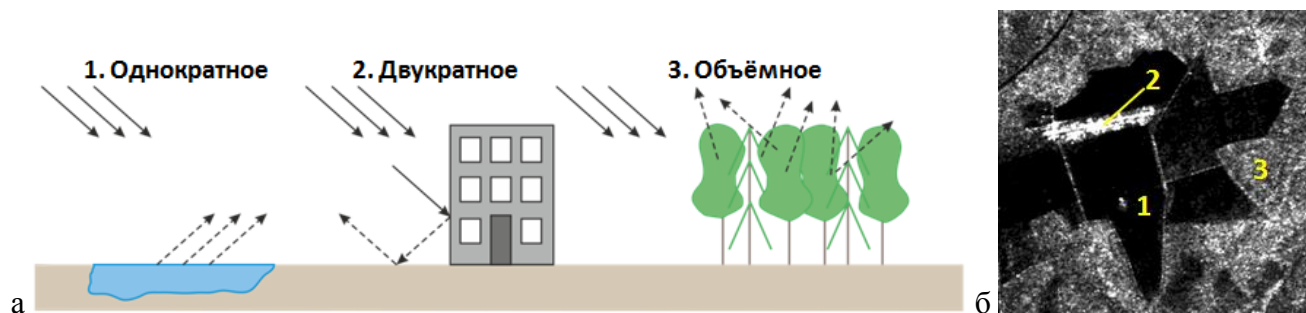


Рис. 1.2. Основные механизмы рассеяния радиоволн: а – принципиальная схема, б – отображение на радиолокационном снимке

– радиолокационным изображениям присущи специфические радиометрические (яркостные) и геометрические особенности. Излучение, генерируемое радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА; в настоящее время космическая радиолокационная съёмка осуществляется аппаратурой именно этого вида), – когерентное. После отражения от земной поверхности когерентные волны интерферируют, что приводит к ослаблению или усилению амплитуды принимаемого сигнала, что проявляется на изображении как зернистость, называемая спекл-шумом (рис. 1.3);

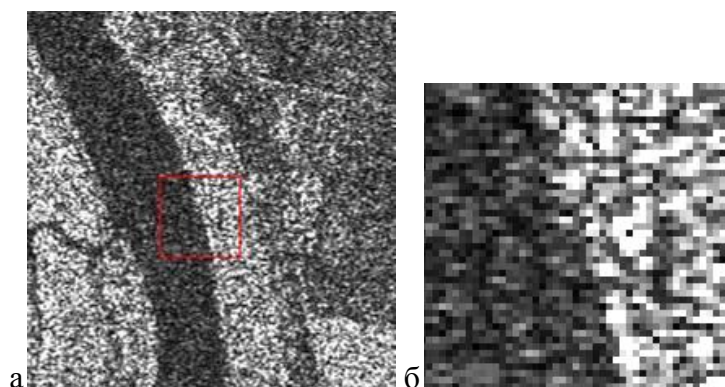


Рис. 1.3. Спекл-шум на РЛ изображении: а – оригинальный масштаб изображения на экране, б – четырёхкратное увеличение фрагмента, выделенного красной рамкой

– тот факт, что радиолокационная съёмка проводится исключительно при боковом обзоре (не в надир), обуславливает наличие геометрических искажений, сочетающихся одновременно с яркостными (эти искажения наблюдаются на участках с расчленённым рельефом, при наличии и высоких вертикальных объектов, например, многоэтажных зданий): растяжение и сжатие изображения склонов, сопровождающееся повышением яркости склонов, обращённых в сторону радиолокатора, и её понижением у противоположных (принятое в англоязычной литературе название – foreshortening), переналожение (layover) и

радиолокационная тень (radar shadow). Схемы возникновения искажений, примеры радиолокационных изображений, иллюстрирующие эти виды искажений, и соответствующие выбранным участкам снимки в оптическом диапазоне приведены на рисунке 1.4.

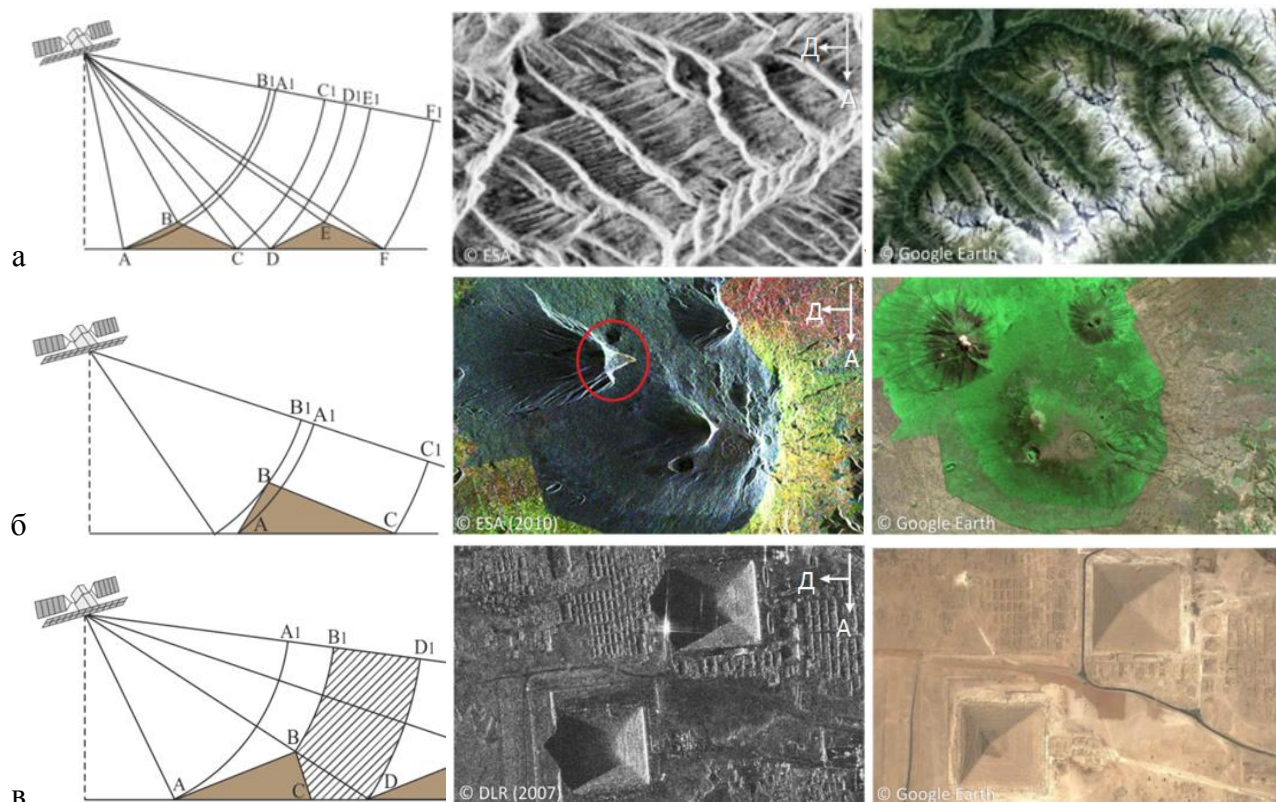


Рис. 1.4. Основные виды геометрических и яркостных искажений на РЛ снимках: а – растяжение и сжатие изображения склонов, б – переналожение, в – радиолокационная тень. Слева приведены схемы формирования искажений, в центре – фрагменты РЛ снимков, справа – фрагменты снимков в видимом диапазоне

С одной стороны, разнообразие параметров сигнала, фиксируемых радиолокатором, большое количество свойств местности, влияющих на обратный сигнал, специфика самих изображений вызывают некоторые сложности использования и восприятия радиолокационных данных. С другой стороны, данные этого вида могут предоставлять новую информацию о местности, недоступную при использовании снимков в световом диапазоне, что открывает новые возможности для географических исследований и картографирования.

1.2. Характеристика систем радиолокационного зондирования Земли

В своём развитии радиолокационная съёмка Земли прошла несколько этапов. Первые системы радиолокационного наблюдения размещались на

самолётах и по типу обзора поверхности относились к панорамным. Они характеризовались низким пространственным разрешением по азимуту¹ (сотни метров) и использовались для обнаружения и сопровождения точечных объектов, для целей навигации и др.

На смену им пришли самолётные радиолокаторы бокового обзора (РБО). Съёмка осуществлялась вдольфюзеляжными антеннами длиной 5-6 м, при этом пространственное разрешение по азимуту достигало 30-50 м. Материалы такой съёмки использовались для наблюдения ледовой обстановки (например, РБО «Торос» в начале 1970-х гг. [Исследование ледяного..., 1983]), геологической разведки и различных научных исследований [Применение радиолокационной..., 1981; Неронский и др., 1999; Вербa, 2010].

Первые космические РБО использовались для целей морской разведки: в период с 1971 по 1988 гг. было запущено 28 космических аппаратов УС-АМ, оснащенных комплексами всепогодной радиолокационной разведки «Чайка», осуществлявшими наблюдение обстановки в море. Расширение функций космических РБО было достигнуто в рамках программы «Океан»: в 1983 г. был запущен первый космический аппарат (КА) «Космос-1500», материалы съёмки с которого использовались для исследования Мирового океана, морских льдов и др. [Дешифрирование морского..., 1991]. Всего в рамках программы «Океан» существовало 7 КА, каждый из которых был оснащён радиолокационной системой бокового обзора, а последний аппарат прекратил своё существование в 2000 году.

В настоящее время космическая съёмка Земли в радиоволновом диапазоне осуществляется с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), основным отличием которых от РБО является возможность достижения высокого пространственного разрешения путём когерентной обработки сигналов, принятых в процессе движения космического аппарата. История съёмки Земли из космоса РСА началась с запуска американского спутника Seasat в 1978 г. Согласно [Вербa и др., 2010], весь период существования космических РСА

¹ Азимутom принято называть направление движения носителя съёмочной аппаратуры, дальностью – направление визирования

можно разделить на четыре этапа:

1) 1978-1992 гг. – РСА первого поколения, осуществлявшие съёмки в одном режиме и в одной поляризации: Seasat, SIR-A, SIR-B, Космос-1870/Меч-К, Алмаз-1А/Меч-КУ, данные которых использовались для оценки потенциала космических РСА при решении задач изучения природных ресурсов, мониторинга поверхности океана, ведения сельского и лесного хозяйства и др.;

2) 1992-2000 – РСА второго поколения на спутниках ERS-1, ERS-2, JERS-1, Radarsat-1. Все РСА проводили съёмку в одной поляризации и одном режиме (кроме радиолокатора на спутнике Radarsat-1, функционировавшего в 7 съёмочных режимах), однако основным их отличием от систем первого поколения являлось обеспечение развитой наземной инфраструктурой обработки и распространения данных. Уникальным можно назвать функционировавший в этот же период трёхчастотный (X, C, L диапазоны) поляриметрический радиолокационный комплекс SIR-C/X-SAR, который размещался на борту многоразового космического корабля Space Shuttle;

3) 2000-2007 гг. – РСА третьего поколения. Начало этого этапа ознаменовалось реализацией миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), в ходе которой за 11 суток была осуществлена съёмка 80% суши в диапазонах C и X в интерферометрическом режиме. В результате обработки этих данных была создана широко известная цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM. К этому же периоду относятся поляриметрические РСА C-диапазона, размещённые на КА Envisat/ASAR и Radarsat-2, а также РСА L-диапазона на КА ALOS/PALSAR.

4) 2007 – 2010 – РСА четвёртого поколения TerraSAR-X и TanDEM-X, Cosmo-SkyMED и др., осуществляющие съёмку в том числе и сверхвысокого разрешения (<1 м).

С момента издания монографии [Верба и др., 2010] по настоящее время на орбиту были выведены и другие спутники с РСА. Именно с середины 2000-х гг. начался особенно бурный рост количества космических РСА (рис. 1.5), в связи с чем в работе [Moreira et al., 2013] отмечается, что наступил «золотой век» космической радиолокации.

История создания и существования космических РСА наглядно показана на рисунке 1.5, а развития их характеристик – в таблице 1.2 [Satellite Missions...]. Отметим, что помимо приведенных в них космических систем с РСА разными странами эксплуатировались в прошлом и в настоящее время системы военного назначения (Lacrosse (США), SAR-Lupe (Германия), TecSAR (Израиль) и др.), однако ввиду того, что сведения об этих системах ограничены, а получаемые ими данные недоступны рядовым пользователям, останавливаться подробно на них не будем.

Таблица 1.2

Космические аппараты (КА) с РСА

Космический аппарат/съёмочная система	Страны	Срок функционирования, гг.	Диапазон длин волн	Пространственное разрешение, м*	Ширина полосы съёмки, км*	Поляризация*
<i>Вышедшие из эксплуатации</i>						
Seasat	США	Июнь-октябрь 1978	L	25	100	ГГ
Shuttle Columbia/SIR-A	США	1981	L	40	50	ГГ
Shuttle Challenger/SIR-B	США	Октябрь 1984	L	(20-30)х(58-16) (аз.х дальн.)	20-40	ГГ
Космос-1870/Меч-К	СССР	1987-1989	S	25-30	20	ГГ
Алмаз-1А/Меч-КУ	СССР	Март 1991 – сентябрь 1992	S	10-15	35-55	ГГ
ERS-1, 2	ЕС	Июль 1991 – март 2000 апрель 1995 – июль 2011	C	25	10	ВВ
JERS	Япония	Февраль 1992 – октябрь 1998	L	18	75	ГГ
Shuttle Endeavour/SIR-C/X-SAR	США	9-20 апреля, 30 сентября-11 октября 1994	C, L/ X	30	15-90	Четыре/ ВВ
Radarsat-1	Канада	Ноябрь 1995 – май 2013	C	8-100	50-500	ГГ
Shuttle Endeavour/X-RADAR, C-RADAR (SRTM)	США	11-22 февраля 2000	X/ C	30	50/225	ВВ/две
Envisat/ASAR	ЕС	Март 2002 – май 2012	C	30-1000	100-400	Одна или две
ALOS/PALSAR	Япония	Январь 2006 – Май 2011	L	7-100	20-350	Одна, две или четыре

Космический аппарат/съёмочная система	Страны	Срок функционирования, гг.	Диапазон длин волн	Пространственное разрешение, м*	Ширина полосы съёмки, км*	Поляризация*
<i>Действующие</i>						
Radarsat-2	Канада	Декабрь 2007 – наст. вр. **	C	1,6-160	20-500	Одна, две или четыре
TerraSAR-X TanDEM-X	Германия	Июнь 2007, Июнь 2010 - наст. вр.	X	<1-40	4-270	Одна или две
COSMO-SkyMed-1-4	Италия	Июнь 2007, декабрь 2007, октябрь 2008, ноябрь 2010 - наст. вр.	X	1-100	10-200	Одна или две
Risat-1	Индия	Апрель 2012 - наст. вр.	C	1-30	10-240	Одна, две, четыре или гибридная
Kompsat-5	Республика Корея	Август 2013 - наст. вр.	X	1-20	5-100	Одна на выбор
Sentinel-1A Sentinel-1B	ЕС	Апрель 2014, апрель 2016 - наст. вр.	C	5-40	20-400	Одна или две
ALOS-2/PALSAR-2	Япония	Май 2014 – наст. вр.	L	1-100	25-350	Одна, две, четыре или компактная
Gaofen-3	Китай	Август 2016 – наст. вр.	C	1-500	10-650	Одна, две или четыре
ICEYE-X1	Финляндия	Январь 2018 – наст. вр.	X	10	40x80	Гибридная
ASNARO-2	Япония	Январь 2018 – наст. вр.	X	<1-16	10-50	Одна на выбор

* - параметры меняются в зависимости от режима съёмки

** - наст.вр. – начало февраля 2018 г.

Можно выделить следующие тенденции развития космических РСА в мире:

- общий рост количества КА, оснащённых РСА, постепенный в период 1978-2006 гг. и активный в период с 2007 г. по настоящее время (за первый 30-летний период было запущено приблизительно столько же аппаратов, сколько за последний 10-летний);

- появление группировок из нескольких однотипных спутников (TerraSAR-X и TanDEM-X, Cosmo-SkyMed 1-4, Sentinel-1A и -1B), позволяющих проводить съёмку с большей частотой, что способствует проведению мониторинговых исследований. Важно отметить также скоординированность орбит спутников в группировках, что обеспечивает возможность проведения интерферометрической съёмки и последующей обработки;

- появление с 2007 года съёмочных систем, осуществляющих съёмку со сверхвысоким пространственным разрешением (<1 м), что приблизило их к аналогичным системам оптического диапазона, первая из которых, IKONOS, появилась в 1999 году;

- реализация многополяризационной съёмки в большинстве РСА, начиная с функционирующей в 1994 г. съёмочной системы SIR-C/X-SAR.

Современные космические РСА, в отличие от первых, как правило обеспечивают съёмку в нескольких съёмочных режимах, различающихся такими параметрами, как пространственное разрешение, охват, поляризации, диапазон углов съёмки. Так, например, РСА на спутниках Sentinel-1 и Radarsat-2, данные которых используются в настоящей работе, функционируют в 4 и 20 режимах соответственно. Радиолокационные данные, полученные при разных комбинациях пространственного охвата и разрешения, позволяют проводить исследования процессов и явлений на различных масштабных уровнях: локальном, региональном и глобальном.

Необходимо отметить, что в связи с высокой стоимостью материалы радиолокационной съёмки долгое время оставались малодоступными широкому кругу пользователей, в том числе для научных исследований. С 2014 года в свободном доступе появились актуальные радиолокационные данные с европейского спутника Sentinel-1A, а с 2016 г. – с аналогичного спутника Sentinel-1B, которые открывают широкие возможности для географических исследований. Пример их использования для исследования северных приполярных территорий рассматривается во второй и третьей главах настоящей работы.

Нельзя не сказать о перспективах развития радиолокационного зондирования Земли. На ближайшие 5-10 лет разными странами запланированы запуски целого ряда КА с РСА [Satellite Missions...], которые будут осуществлять съёмку в разных диапазонах длин волн (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Перспективные КА с РСА

Космический аппарат/съёмочная система	Страны	Ожидаемый срок запуска, г.	Диапазон длин волн
PAZ	Испания	2018	X
Iceye (до 50 КА)*	Финляндия	с 2018	X
Radarsat Constellation Mission (3 КА)	Канада	2018	C
SAOCOM 1A, 1B, -CS**	Аргентина	2018	L
NOVASAR-S	Великобритания	2018	S
TerraSAR-X Next Generation	Германия	2018	X
COSMO-SkyMed Second Generation (2 КА)	Италия	2018, 2019	X
Кондор-ФКА (2 КА)	Россия	2019, 2020	S
OptiSAR***	Канада	2019, 2020	X, L
KOMPSAT-6	Республика Корея	2020	X
Biomass	ЕС	2021	P
NISAR	США, Индия	2021	S, L
GaoJing (Superview) (4 КА)****	Китай	До 2022	X
TanDEM-L	Германия	2022	L
Обзор-Р (3 КА)	Россия	2021, 2023, 2024	X

* – группировку малых КА РЛН Iceye планируют разворачивать в несколько этапов: 1) 3 КА - Proof-of-concept, 2) 6-8 КА - Arctic constellation, 3) 30-50 КА - Global fast response

** CS – Companion Satellite – КА с пассивным РСА, работающих только на приём сигнала

*** – наряду с КА РЛН группировка будет включать 8 КА оптического наблюдения

**** – группировка будет включать также 20 КА оптического наблюдения и несколько КА, осуществляющих гиперспектральную и видеосъёмку

В будущем планируется продолжение некоторых космических программ радиолокационного наблюдения Земли (Radarsat, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed), для чего разрабатываются РСА нового поколения, ожидается появление космических систем, работающих в частотных диапазонах, не использовавшихся ранее. Предполагается создание группировок однотипных КА с целью повышения периодичности съёмки, а также оптико-радиолокационных группировок. Отметим, что спустя практически 30-летний промежуток времени после функционирования спутника радиолокационного наблюдения Алмаз-1А космические РСА должны появиться и в России. Так, на 2019 и 2020 гг. запланирован запуск космической системы радиолокационного наблюдения

«Кондор-ФКА» в составе двух космических аппаратов, а на 2021, 2023 и 2024 гг. – системы «Обзор-Р» из трёх аппаратов [Роскосмос из-за недостатка...].

Накопленные за многие годы архивы разнообразных радиолокационных данных и перспективы развития радиолокационного зондирования Земли обуславливают необходимость разработки методик их использования для географических исследований.

1.3. Применение радиолокационных данных для получения информации о земной поверхности и её картографирования

1.3.1. Методы обработки радиолокационных данных

Наличие нескольких компонент радиосигнала способствовало развитию разнообразных методов их обработки, которые позволяют извлекать различные характеристики зондируемой поверхности [Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Захаров и др., 2014]:

- обработка амплитудной информации, позволяющая дифференцировать объекты на основе различий значений коэффициента обратного рассеяния σ_0 (или удельной эффективной поверхности рассеяния, УЭПР);

- радарграмметрия – обработка стереопар амплитудных изображений, позволяющая формировать цифровые модели рельефа;

- интерферометрическая обработка (InSAR – interferometric SAR), использующая наряду с амплитудной фазовую информацию и позволяющая получать сведения о высотах поверхности [Moreira et al., 2013];

- дифференциальная интерферометрическая обработка (DInSAR – differential interferometric SAR), как и InSAR, использует информацию о фазе сигнала, но результатом её являются величины смещений поверхности и их скоростей. В последнее время особое развитие получили разновидности этого метода PS (Persistent Scatterers - метод постоянных рассеивателей) и SBAS (Small Baseline Subset – метод малых базовых линий), использующие большие массивы данных (несколько десятков) и позволяющие определять смещения с точностью до миллиметров [Crosetto et al., 2016; Manzo et al., 2011];

- когерентный анализ, использующий в своей основе промежуточный результат интерферометрической обработки – изображение когерентности, позволяющее выявлять изменения местности;

- селекция движущихся целей – обработка результатов интерферометрических съёмок с ориентацией интерферометрической базы вдоль направления движения спутника, позволяющая вычислять скорости движущихся объектов;

- радиолокационная поляриметрия (PolSAR - Polarimetric SAR) – обработка разнополяризованных изображений, позволяющая получать сведения о механизмах рассеяния радиоволн различными объектами [Lee, Pottier, 2009];

- поляриметрическая интерферометрия (PolInSAR - Polarimetric-Interferometric SAR) – технология, сочетающая в себе поляриметрическую и интерферометрическую обработку, позволяющая извлекать информацию о структуре рассеивающего объекта благодаря съёмке одновременно в нескольких поляризационных каналах и о высотах за счёт разности фаз между каналами изображений;

- различные способы комплексирования (data fusion) радиолокационных данных со снимками в оптическом диапазоне позволяют изучать свойства местности, проявляющиеся одновременно на изображениях в разных спектральных диапазонах.

Методы обработки радиолокационных данных постоянно развиваются: происходит совершенствование старых и появление новых. Например, в последнее время активно развивается метод радиолокационной томографии, которая использует в своей основе результаты многократных съёмок местности с несколько отличающихся положений носителя на орбите и позволяет восстанавливать трёхмерное строение объектов, их внутреннюю структуру [Minh et al., 2016].

Важно отметить достаточно большое разнообразие программ для обработки радиолокационных данных. Большинство коммерческих программных комплексов, предназначенных для обработки материалов космических съёмок (ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine (Hexagon Geospatial) и др.), имеют специализированные модули для обработки радиолокационных данных (соответственно SARscape (sarmap SA), IMAGINE Radar Mapping Suite и др.). Развиваются программы, предназначенные для обработки только материалов

радиолокационных съёмок (SARPROZ (Daniele Perissin), GAMMA (Gamma remote sensing), Photomod Radar («Пакурс») и др.). Существуют и открытые программы для обработки этого вида информации, в частности, NEST, PolSARpro, Sentinel-1 Toolbox, SNAP (Sentinels Application Platform) (разработки Европейского космического агентства, ЕКА), обеспечивающие возможность обработки данных большинства современных космических РСА. Наибольший интерес для научных исследований представляет именно открытое программное обеспечение SNAP, включающее средства обработки амплитудных радиолокационных изображений, мощный инструментарий для поляриметрической обработки, оно же частично позволяет выполнять интерферометрическую обработку. Кроме того, этот программный комплекс включает средства обработки снимков, полученных оптическими съёмочными системами.

Таким образом, материалы радиолокационной съёмки и уже разработанные разнообразные методы их обработки позволяют извлекать разнородные характеристики местности, что позволяет использовать их для решения различных задач в науках о Земле.

1.3.2. Опыт применения радиолокационных данных в географических исследованиях и картографировании

Широкие информационные возможности радиолокационных данных и достаточно хорошо развитые методы их обработки обуславливают тот факт, что этот вид данных используется при решении большого перечня задач в разных областях: геологии, гидрологии, океанологии, сельском, лесном и городском хозяйстве, при мониторинге чрезвычайных ситуаций и археологических изысканиях [Ouchi, 2013; Land applications..., 2014]. При этом исследования проводятся на разных масштабных уровнях, часто – в пределах небольших ключевых участков, и в таких случаях картографирование обычно не является целью или этапом работы. В некоторых случаях картами называют то, что ими в общем-то не является: например, под «радиолокационными картами» Антарктиды [Антарктида из космоса...; Waterloo makes...] подразумевают бесшовные мозаики, составленные из радиолокационных снимков, а под «картой

когерентности» [Захаров, Захарова, 2006; Никольский, 2008] – промежуточный результат интерферометрической обработки двух наборов радиолокационных данных, отображающий значения их взаимной когерентности. Особый интерес в настоящей работе представляют именно те исследования, результатом которых является картографическое представление различных объектов и их характеристик с использованием радиолокационных данных.

Геологическое картографирование и картографирование рельефа. Чувствительность радиоволн к разномасштабным геометрическим характеристикам местности обусловила применение радиолокационных снимков в картографировании геологических структур, при этом одинаково успешно используются материалы, получаемые с авиационных [Применение радиолокационной..., 1981; Gibbins, Slaney, 1991; Цымбал и др., 2010] и космических носителей [Кронберг, 1988; Ford et al., 1980]. Высокая проникающая способность радиоволн, особенно длинноволновых диапазонов, позволяет картографировать подповерхностные структуры в пустынных районах [Abdelsalam, Stern, 1996].

Особую роль в картографировании рельефа земной поверхности и его изменений играют методы радиолокационной интерферометрии. Наиболее известный и широко используемый географами результат интерферометрической съёмки и обработки полученных данных – цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), охватывающая сушу в диапазоне широт 60° с.ш. – 54° ю.ш. Исходная информация для её создания была получена в ходе 11-дневной съёмки с борта космического шаттла Endeavour в феврале 2000 г. радиолокационными системами C-RADAR (длина волны 5,6 см) и X-RADAR (3,1 см) в режиме интерферометрии с «жёсткой» базой. В настоящее время ЦМР распространяется на безвозмездной основе и имеет следующие характеристики: пространственное разрешение 30 м (для моделей, полученных по данным обоих частотных диапазонов), относительная точность по высоте – не хуже 10 и 6 м для моделей, составленных по данным С и Х диапазонов соответственно, абсолютная – не хуже 16 м. Недостатками ЦМР, созданной по данным Х-диапазона, является

неполное покрытие суши в пределах указанного выше диапазона широт и большое количество шумов, особенно на поверхности водоёмов и водотоков. Проведённый разными специалистами анализ ЦМР SRTM показал, что при равнинном и холмистом рельефе местности эта модель может использоваться для построения горизонталей на топографических картах, начиная с масштабов 1:50 000 – 1:100 000 [Карионов, 2010; Сафьянов, Репкина, 2014].

Следующим шагом по созданию глобальной ЦМР методом радиолокационной интерферометрии стало осуществление повторных тандемных съёмок группировкой космических аппаратов TerraSAR-X и TanDEM-X в период с 2010 по 2014 гг. В результате этой съёмки была сформирована ЦМР WorldDEM, охватывающая поверхность всей суши Земли и обладающая уникальными в своём роде точностными характеристиками: пространственное разрешение – 12 м, абсолютная точность по высоте – 4 м, относительная – 2 м [Riegler et al., 2015]. В настоящее время эта ЦМР распространяется только на коммерческой основе и имеет очень высокую стоимость.

В последнее время весьма часто для целей картографирования используется метод дифференциальной интерферометрии, позволяющий получать информацию об изменениях высоты поверхности с высокой точностью [Zhou et al., 2009]. Перечень картографируемых с опорой на этот метод объектов достаточно широк, к ним относятся оползни [Bardi et al., 2014], вулканы [Михайлюкова, Тутубалина, 2016], участки местности в зонах землетрясений [Stramondo et al., 2014], добычи полезных ископаемых [Брыксин и др., 2012], протаивания и промерзания подземных льдов [Liu et al., 2010; Daout et al., 2017] и др.

Картографирование объектов гидросферы. В настоящее время материалы радиолокационных съёмок наиболее часто применяются для создания оперативных карт состояния морской поверхности: плёночных загрязнений [Иванов, 1997; Комплексный спутниковый..., 2011; Бакун и др., 2015], ледовой обстановки [Korosov, Park, 2016]. В обоих случаях главным преимуществом материалов съёмки в радиоволновом диапазоне перед другими является возможность их оперативного получения в любую погоду и в любое время суток.

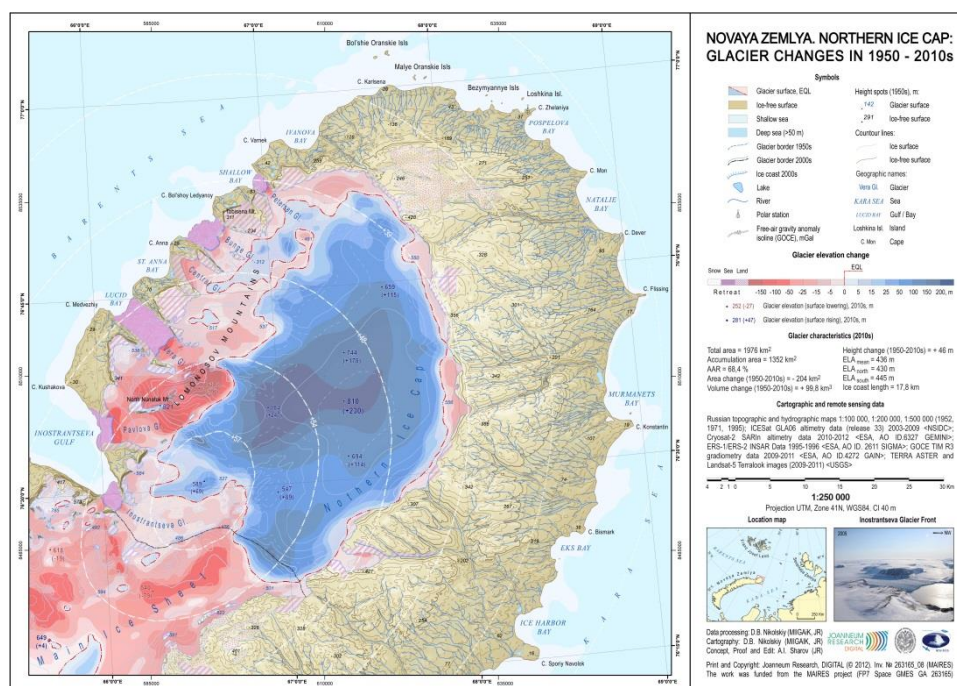
Картографирование пленочных загрязнений эффективно выполняется по радиолокационным снимкам благодаря их высокому контрасту со взволнованной водной поверхностью. При картографировании морского льда возможно не только нанесение его границ, но и определение различных характеристик, например, возраста [Дешифрирование морского..., 1991; Shuchman, Flett, 2003; Zakhvatkina et al., 2012; Moen et al., 2015]. К оперативным картам, формируемым на основе данных радиолокационной съёмки, можно отнести также карты волнения и скорости приводного ветра [Monaldo et al., 2005; Митник, Хазанова, 2015; La et al., 2016]. Отметим, что такие карты в некоторых случаях поставляются и операторами космических систем. Так, например, на основе данных Sentinel-1 формируются продукты уровня обработки 2 OCN (ocean), среди которых – изображения, характеризующие скорость приводного ветра на высоте 10 м над уровнем моря, и скорость морских течений [Sentinel Online...].

Не менее распространено картографирование водотоков, водоёмов, болот. В частности, благодаря возможности оперативного получения снимков в любую погоду радиолокационная съёмка часто используется для картографирования участков, подверженных затоплениям [Pulvirenti et al., 2011; List of Charter...]. Определённая специфика взаимодействия радиоволнового излучения со льдом термокарстовых озёр позволяет создавать их батиметрические карты [Kozlenko, Jeffries, 2000], карты степени их промерзания в холодный период [Bartsch et al., 2017], динамики оттаивания льда [Sobiech et al., 2012]. Известны примеры картографирования обводнённости болот [Widhalm et al., 2015; White, 2015].

Возможность дифференциации сухого и мокрого снега по радиолокационным снимкам обеспечивает их картографическое представление, создание карт длительности периода снеготаяния [Nagler et al., 2016; Zhou, Zheng, 2017].

Различия в диэлектрической проницаемости промёрзших и оттаявших грунтов способствуют применению радиолокационных данных для картографирования участков распространения многолетней мерзлоты, в частности, сроков наступления периода оттаивания сезонно-талого слоя [Park et al., 2010], глубины его протаивания [Елсаков, 2008].

Известно множество примеров картографирования скорости движения ледников с применением метода дифференциальной интерферометрии [Jezek, 2002; Strozzi et al., 2008; Rignot et al., 2011; Nagler et al., 2015]. Особо стоит отметить разработанную и реализованную в рамках проектов SMARAGD (Satellite Monitoring And Regional Analysis of Glacier Dynamics), MAIRES (Monitoring Arctic Land and Sea Ice from Russian and European Satellites) и др. методику, в основе которой лежит комбинирование результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных космических РСА с другими источниками (топографическими картами, космическими альтиметрическими данными и др.), с использованием которой были созданы комплексные карты многолетних изменений ледников на островах Евразийского сектора Арктики (рис. 1.6) [Sharov, Tyukavina, 2009; Sharov, Nikolskiy, 2013; MAIRES – Monitoring...; SMARAGD – Satellite...].



исследований, использующих ещё самолётную радиолокационную съёмку, можно назвать проект RADAm (Radar in the Amazon), целью которого было мелкомасштабное (1:1 000 000) картографирование лесов бассейна Амазонки. Аналогичные работы продолжались и в рамках проекта SIVAM (*norm.* Sistema de Vigilância da Amazônia – Система наблюдения Амазонии) [Silva, 1998; Балдина, Чеснокова, 2011]. Картографирование процессов обезлесения в тропической зоне продолжалось в 1990-х гг. в рамках проекта GRFM (Global Rain Forest Mapping Project – Картографирование влажных тропических лесов мира), для чего использовались материалы съёмки из космоса радиолокатором L-диапазона, установленным на японском космическом аппарате JERS [Rosenqvist et al., 2000]. Изучение и картографирование состояния лесных массивов на основе материалов космического радиолокационного зондирования активно развивалось и в последующие годы. Известны крупные международные проекты 1990-2000-х гг., в рамках которых выполнялось картографирование запасов фитомассы древесной растительности с использованием данных ENVISAT/ASAR, ERS-1 и JERS-1: SIBERIA-1, -2, BIOMASAR, Forest DRAGON-1, -2 (рис. 1.7) [SIBERIA; Siberia II...; BIOMASAR.org...; Forest Dragon]. Возможность определения запаса фитомассы по снимкам радиоволнового диапазона основывается на высокой корреляции с ней коэффициента обратного рассеяния радиосигнала, особенно в длинноволновых диапазонах. Во всех приведённых работах отмечается особое значение использования при этом данных наземных обследований, без которых вычисление количественных параметров древостоя было бы попросту невозможным. Картографирование лесов и сейчас является одной из областей, достаточно часто использующих материалы радиолокационных съёмок. При этом для оценки характеристик древесной растительности применяются и новые методы: в работе [Kumar, Khati, 2016] для расчёта высоты древостоя использовались технологии поляриметрической интерферометрии применительно к данным Radarsat-2. Для этих же целей в [Чимитдоржиев и др., 2014] использовались тандемные интерферометрические съёмки со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X. Для картографирования вырубок предлагается подход,

основанный на совместном использовании снимков в оптическом диапазоне и изображения когерентности, получаемого в процессе интерферометрической обработки радиолокационных данных [Бахтинова и др., 2012].

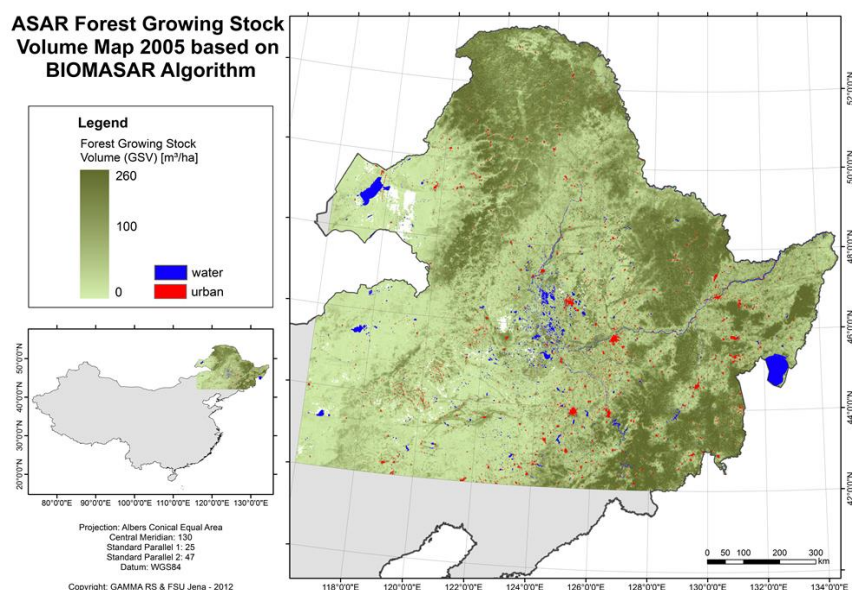


Рис. 1.7. Карта запасов фитомассы древесной растительности на северо-востоке Китая, составленная в рамках проекта Forest DRAGON-2 по данным радиолокатора ASAR [Forest Dragon]

Радиолокационные данные успешно применяются для картографирования различных характеристик сельскохозяйственных земель. При этом во всех работах отмечается, что исследования обрабатываемых сельскохозяйственных угодий по радиолокационным снимкам должны опираться на материалы тщательных наземных обследований. Также часто отмечаются трудности, возникающие при определении какого-либо одного параметра почвенно-растительного покрова, поскольку рассеянный радиосигнал несёт в себе информацию о целом комплексе характеристик растений (высота, размер листьев, диаметр стеблей, проективное покрытие, ориентация посевов и многие другие) и почв (влагосодержание, шероховатость). Одним из наиболее распространённых путей использования данных радиолокационной съёмки в области сельского хозяйства является автоматизированная классификация посевов сельскохозяйственных культур. Для этого, как правило, применяются разновременные амплитудные изображения [Мышляков, 2016; Самофал, Барталёв, 2016] или данные поляриметрических съёмок [Tan et al., 2011; Ramana

et al., 2014], а также результаты комплексирования радиолокационных снимков со снимками в оптическом диапазоне [McNairn et al., 2009; Kussul et al., 2014]. Данные многократных радиолокационных съёмок возможно использовать для определения фенологических стадий развития сельскохозяйственных культур [Lampropoulos et al., 2015] и картографирования сроков их наступления [Asia Rice...]. Чувствительность радиоволнового излучения к влагосодержанию растений, их высоте, проективному покрытию и другим характеристикам обеспечивает составление карт общего состояния посевов [McNairn, Brisco, 2004]. С использованием радиолокационных данных осуществляется моделирование урожайности культур, для чего необходимо систематическое проведение съёмок в течение вегетационного периода [Setiyono et al., 2014], с последующим составлением карт урожайности [Sentinel-1 speeds...]. Известны некоторые примеры использования РЛ данных для исследования неиспользуемых, деградированных сельскохозяйственных угодий. Так, в работе [Stefanski et al., 2014] совместная классификация радиолокационных снимков и снимков в оптическом диапазоне позволила создать карту динамики использования сельскохозяйственных земель на участке Западной Украины за отдельные ключевые сроки в период 1986-2010 гг. А в исследовании [Yusoff et al., 2016] использование серии разновременных радиолокационных снимков позволило выявить заброшенные участки в Малайзии, ранее использовавшиеся для выращивания риса, масличных пальм и каучуконосов.

Различия в диэлектрических свойствах влажных и сухих почв делает возможным использование радиолокационных данных как инструмента для определения их влагосодержания. Почвы различной влажности лучше различаются в длинноволновом диапазоне [Srivastava et al., 2006]. Известен опыт оценки этого параметра с использованием различных моделей (Oh, Dubois,), использующих данные, полученные в разных поляризациях [Khabazan et al., 2013]. При определении влажности почв отмечаются трудности, связанные с выделением именно этой компоненты, поскольку в значение обратного рассеяния сигнала определённый вклад вносят еще и шероховатость поверхности почвы, и

растительный покров [Ouchi, 2013]. Тем не менее, примеры картографирования этого параметра также известны [Paloscia et al., 2013; Chai et al., 2015]. Важно отметить, что обеспечение создания карт влажности почв является одной из задач перспективной аргентинской космической системы радиолокационного наблюдения в L-диапазоне SAOCOM [Comisión Nacional...].

Картографирование социально-экономических объектов.

Картографирование социально-экономических объектов по материалам радиолокационной съёмки развито в меньшей степени по сравнению с природными объектами.

В качестве одного из направлений можно назвать оперативное картографирование судовой обстановки [Margarit et al., 2009; Santamaria et al., 2017], которое возможно благодаря тому, что суда хорошо распознаются по радиолокационным снимкам на фоне поверхности воды (особенно в перекрёстных поляризациях или в согласованных поляризациях при отсутствии сильного волнения) за счёт обилия металлических конструкций, дающих мощный обратный сигнал.

Достаточно широкое применение нашло картографирование смещений зданий и объектов инфраструктуры с использованием разработанной в конце 1990-х гг. разновидности метода дифференциальной интерферометрии – метода постоянных рассеивателей PSInSAR (permanent/persistent scatterer interferometry) [Ferretti et al., 1999], который позволяет достигать очень высокой (миллиметровой) точности измерения. Этот метод использует в своей основе устойчиво рассеивающие радиосигнал участки местности – специально сооружённые уголкового отражатели или же подобные им объекты (например, отдельные участки крыш зданий). Для обработки этим методом требуются большие временные серии данных, полученных в интерферометрическом режиме съёмки. Так, разработчики программы SARscape рекомендуют использовать результаты не менее чем 30 таких съёмок. Этот метод часто используется для оценки стабильности зданий [ИФЗ РАН...; Crosetto et al., 2016], выявления смещений в результате подземного строительства [Perissin et al., 2012; Wang et al.,

2017] и т.д. Результаты обработки серий радиолокационных данных методом постоянных рассеивателей, как правило, представляют собой набор точек, для каждой из которых определены величины или скорости смещений за наблюдаемый период. Наглядным примером, позволяющим визуализировать результаты обработки данных (преимущественно со спутников ERS) методом PS на разные участки земного шара, является тематический геопортал TREmapsTM, разработанный компанией TRE ALTAMIRA [TREmapsTM].

Картографирование внеземных объектов. Отдельно стоит отметить, что радиолокационная съёмка используется не только для исследования поверхности Земли, но и для изучения и картографирования других небесных тел, имеющих плотную атмосферу, которая ограничивает возможность применения съёмочных систем оптического диапазона. Одним из таких небесных тел является планета Венера, радиолокационная съёмка которой осуществлялась космическими аппаратами Pioneer Venus Orbiter (США, 1978-1992 гг.), «Венера-15, 16» (СССР, 1983-85 гг.), Magellan (США, 1989-1994 гг.). По результатам съёмки советскими аппаратами, например, был издан целый атлас, включающий гипсометрические, геоморфологические и другие карты [Атлас поверхности Венеры, 1989; Ржига, 1988]. Для спутника Сатурна Титан по материалам радиолокационной съёмки миссии Cassini–Huygens (США, ЕС и Италия, 1997-2017 гг.) были составлены карты высоты поверхности [Lorenz et al., 2013] и ряд тематических карт: тектоническая [Liu et al., 2016], геоморфологическая [Birch et al., 2016] и другие.

Проанализированный мировой опыт практического использования материалов радиолокационной съёмки позволяет сделать вывод о том, что тематическое картографирование с опорой на этот вид данных развито недостаточно. Несомненно, в ряде направлений космического картографирования РЛ данные используются давно и весьма успешно. Прежде всего это относится к тем областям, где не всегда из-за облачности или недостатка освещения возможно использование снимков в оптическом диапазоне – создание карт океанологических (плёночных загрязнений, ледовой обстановки и др.) и

гидрологических (паводков). Среди объектов суши, для картографирования которых разработаны и апробированы специальные методики, необходимо выделить прежде всего леса, для которых создаются карты запасов фитомассы. Особо значима для различных направлений картографирования (гипсометрического, геологического, гляциологического и др.) возможность получения на основе радиолокационных данных значений высот, величин и скоростей смещения поверхности и расположенных на ней объектов. Составление с использованием РЛ данных карт в остальных тематических областях в настоящее время носит некий экспериментальный характер, а некоторые направления, например, картографирование природных и антропогенных ландшафтов, не развито вовсе.

Можно также отметить, что большинство создаваемых с использованием РЛ данных карт по типу относятся к аналитическим, т.е. отображают один объект (затопленная территория, загрязнённый участок акватории) или одну его характеристику (запас фитомассы древесной растительности, скорость смещения поверхности и др.), а карты комплексные и синтетические практически не составляются.

Таким образом, одним из перспективных направлений применения спутниковых радиолокационных данных является комплексное или синтетическое картографирование природных и антропогенно изменённых ландшафтов. Именно на примере такой области тематического картографирования в настоящей работе рассмотрен подход к применению материалов радиолокационной съёмки. При этом из всего многообразия видов радиолокационных данных предпочтительным в первую очередь видится использование данных амплитудных и поляриметрических, полученных в том числе в разные сроки.

1.4. Выводы

Обзор литературных источников, посвящённых теме исследования, показал следующее:

1) получаемые при радиолокационной съёмке данные имеют значительные отличия от привычных зрению человека снимков в оптическом диапазоне. Они позволяют получать принципиально новую информацию об объектах земной поверхности (диэлектрические свойства, шероховатость и др.), которая может быть использована в целях картографирования объектов и их свойств;

2) космическая съёмка радиолокаторами с синтезированной апертурой начала своё развитие с запуска космического аппарата SEASAT в 1978 году. С тех пор были накоплены внушительные архивы радиолокационных данных, однако долгое время их использование в географических исследованиях оставалось ограниченным ввиду высокой стоимости. Ситуация изменилась в 2014 году с появлением спутников Sentinel-1, информация с которых предоставляется на безвозмездной основе. В ближайшем будущем ожидается появление большого числа космических систем радиолокационного наблюдения Земли, в том числе и в России, что не оставляет сомнений в необходимости разработки методик использования материалов этого вида съёмок для тематического картографирования;

3) перечень методов преобразования радиолокационных данных и географических задач, для которых используются получаемые результаты, достаточно широк, однако тематическое картографирование с опорой на этот вид информации развито недостаточно по сравнению со снимками в оптическом диапазоне. К наиболее проработанным направлениям можно отнести следующие: создание оперативных карт состояния морской поверхности и паводковой обстановки; картографирование высот, величин и скоростей смещения поверхности и расположенных на ней объектов; инвентаризационное картографирование лесной растительности, в том числе запасов фитомассы. Составление карт других тематик в настоящее время носит экспериментальный характер. Анализ выполненных в мире работ позволил выделить в качестве перспективных, практически не развитых направлений комплексное и синтетическое картографирование природных и антропогенных ландшафтов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

2.1. Выбор участков и объектов картографирования

Методические вопросы обработки радиолокационных данных рассмотрены 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. На этой территории интенсивного земледелия за последние несколько десятилетий было выведено из оборота большое количество орошаемых полей, которые в настоящее время претерпевают существенные изменения (опустынивание, засоление почв, зарастание древесно-кустарниковой растительностью). В [Агроэкологическое..., 2008] отмечается важность инвентаризации неиспользуемых сельскохозяйственных земель, оценки их агроэкологического состояния, чему могут способствовать и материалы космических радиолокационных съёмок в силу высокой чувствительности радиоволнового излучения к состоянию почвенно-растительного покрова.

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. Необходимость развития методов использования данных космической радиолокационной съёмки для исследования и картографирования Арктики подтверждает и «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», ставящая задачу формирования системы наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе с использованием средств наблюдения космического базирования. Остров Котельный характеризуется значительной удалённостью, труднодоступностью и связи с этим – гораздо

меньшей изученностью по сравнению с первым районом. Намного слабее он обеспечен безоблачными космическими снимками в оптическом диапазоне. Этой территории свойственно достаточно большое для высоких широт ландшафтное разнообразие, что позволит продемонстрировать возможности радиолокационных снимков для картографирования природных ландшафтов северных приполярных территорий в целом.

2.1.1. Особенности ведения сельского хозяйства в дельте Волги

После стремительного расширения площади пахотных земель в СССР в конце 1950-х гг. в период с 1965 по 1987 гг. в целом по стране поддерживались стабильные площади обрабатываемой пашни – в РСФСР на эту категорию приходилось 133–134 млн га. В результате аграрной реформы 1990-х гг. существенная часть этих земель оказалась выведенной из оборота и была переведена в залежь. В ходе Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 г. установлено, что площадь заброшенных пахотных земель в России составила около 30–40 млн га [Агроэкологическое..., 2008].

Необходимо отметить, что существует несколько определений понятия «залежь», в этой работе использован геоботанический подход, в соответствии с которым «залежь – природная экосистема, которая более года назад использовалась для возделывания сельскохозяйственных культур, но с тех пор выведена из оборота, и сейчас на ней происходит восстановление природных экосистем посредством естественных сукцессионных процессов или в результате искусственной рекультивации» [Люри и др., 2010].

В настоящее время эти земли трансформируются под воздействием различных природных и антропогенных факторов. В некоторых случаях прекращение обработки земель приводит к улучшению состояния экосистем и восстановлению биоразнообразия за счёт возобновления естественной растительности, плодородия почв и их экологических функций. Известен, например, процесс лесовосстановления на необрабатываемых землях в нечерноземной зоне России [Люри и др., 2010]. Однако на значительной части выбывших из сельскохозяйственного использования земель аридной зоны

развиваются процессы деградации различного вида: опустынивание, засоление почв, зарастание кустарниками, в том числе галофитами, что особенно проявляется на ранее орошаемых участках [Агроэкологическое..., 2008; Голуб и др., 2012]. Одним из примеров такой территории является дельта Волги.

Дельта Волги – особый регион, представляющий собой естественный «оазис» в аридной зоне благодаря водам реки, имеющей огромную площадь водосбора преимущественно в умеренном, достаточно увлажненном поясе. Для территории характерны высокие летние температуры и малое количество осадков, что в целом неблагоприятно для сельскохозяйственного производства. Успешность сельского хозяйства на этой территории сильно зависит от эффективного использования водных ресурсов.

Этот регион издавна известен развитым рыболовством и сельским хозяйством, где еще в начале XX в. применялось поливное земледелие на незаливаемых землях с механическим подъемом воды [Природа и сельское..., 1962].

В последние десятилетия территория дельты Волги претерпела существенные изменения, обусловленные как природными, так и социально-экономическими факторами. С 1950-х гг. началась массовая распашка островов дельты с одновременным созданием оросительных систем. К середине 1970-х гг. большая часть пахотных земель была обвалована, т.е. защищена от вод весеннего половодья путем сооружения валов и рвов [Бармин и др., 2006], а орошение посевов велось с использованием насосных станций. В этот период территорию дельты Волги называли «всесоюзным огородом», где с помощью орошения выращивались бахчевые культуры, овощи и рис.

Среди природных факторов наибольшее значение имел резкий подъем уровня Каспийского моря (на 2,5 м между 1977 и 1996 гг.) и его последующая стабилизация на новой, более высокой, чем прежде, отметке. Следствием был подъем уровня грунтовых вод, что привело к постепенному отказу от обработки полей в нижней зоне дельты.

Экономические реформы 1990-х гг. и прекращение субсидирования сельского хозяйства вызвали изменения в хозяйственном использовании земель дельты и прекращение обработки большей части обвалованных полей. При отсутствии орошения большая часть пахотных земель, защищенных от поступления вод половодья, оказалась подверженной процессам опустынивания: иссушению почв и разным видам деградации, в частности закустариванию и засолению. В настоящее время заброшенные поля, ставшие залежами, различаются по состоянию в зависимости от природных условий, в первую очередь от поступления вод половодья в местах разрушения защитных валов [Бармин и др., 2006; Голуб и др., 2012], а также от длительности периода неиспользования [Люри и др., 2010].

Предполагается, что космические снимки в радиоволновом и оптическом диапазонах позволят определить виды современного использования сельскохозяйственных земель в дельте Волги, выявить динамику выведения пахотных земель из оборота и определить современное состояние залежей.

2.1.2. Краткая характеристика острова Котельный

Остров Котельный входит в состав архипелага Новосибирские острова и расположен между 74-76° с.ш. и 137-145° в.д. Он состоит из трёх частей, существенно различающихся геологическим строением и рельефом, исторически получивших названия о. Котельный, Земля Бунге и о. Фаддеевский. Западная часть острова – наиболее возвышенная, нижний гипсометрический уровень представлен прибрежной равниной со средними высотами 20-40 м, около половины площади занимают плато со средними высотами 80-120 м, а на юге некоторые отдельные вершины достигают высот более 200 м (максимальная – 361 м). Большая часть Земли Бунге представляет собой ровную нерасчленённую песчаную пустыню с высотами 6-10 м. В её центре расположена возвышенность Евсекю-Булгуннях с высотами более 10 м, сложенная прочными дочетвертичными породами с признаками эрозионного расчленения, а на юго-востоке – возвышенность Земли Бунге высотой до 12-14 м с преимущественно термокарстовым расчленением. Восточная часть – о. Фаддеевский – представляет

собой расчленённую низменную равнину со средними высотами 20-30 м, до 65 м на самом севере. Весь остров расположен в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, в связи с чем его поверхность осложняют разнообразные микроформы криогенного рельефа.

Для этого района характерен арктический климат с низкими температурами и малым количеством осадков (130-140 мм), которые неравномерно распределены в течение года (максимум – в июле и августе). Снежный покров держится не менее 9 месяцев, снегопады случаются и в летний период.

Для островов Котельный и Фаддеевский характерна хорошо развитая речная сеть, здесь же распространены озёра. Плоские понижения в пределах низменностей заболочены. Песчаная пустыня Земли Бунге лишена постоянных водотоков, однако в летний период здесь образуются ложбины стока талых вод.

Растительный покров острова достаточно скудный, высота растений не превышает 10-15 см, вегетационный период длится не более двух месяцев. Основными жизненными формами являются кустарнички, многолетние травы, мхи и лишайники. Густота растительности во многом зависит от снежного покрова: в местах, лишенных снега, растительность разрежена или полностью отсутствует. Наиболее богата флора в защищенных речных долинах и аласах.

Примечательно то, что в 2013 г. на территории острова Котельный началось восстановление военной базы; здесь же, наряду с другими островами архипелага, планируется создание государственного природного заказника «Новосибирские острова» [Материалы комплексного..., 2015].

Предполагается, что использование материалов космических радиолокационных съёмок, получение которых на арктические районы возможно вне зависимости от облачности и освещённости в любое время года и с высокой периодичностью, обеспечит возможность картографирования современных природно-территориальных комплексов острова Котельный.

2.2. Выбор радиолокационных данных в зависимости от задачи исследования

Выбор спутниковых радиолокационных данных для решения той или иной географической задачи имеет большое значение, поскольку различающиеся

параметры съёмки и уровни начальной обработки данных определяют возможность применения тех или иных методов их последующей обработки и во многом влияют на качество решения задачи. Кратко рассмотрим параметры, оказывающие существенное влияние на информационные свойства радиолокационных данных.

Режимы съёмки космических РСА и их параметры

Современные спутниковые радиолокационные системы, как правило, функционируют в нескольких съёмочных режимах (выделяют три основных – прожекторный, маршрутный и скансар (широкозахватный)), которые можно охарактеризовать набором следующих параметров: пространственным охватом, пространственным разрешением, поляризацией, диапазоном углов визирования. Обычно самым высоким разрешением характеризуются изображения, имеющие небольшой пространственный охват, и наоборот. Выбор того или иного режима съёмки во многом зависит от размера исследуемой территории, размеров картографируемых объектов. В целом, прожекторный, маршрутный и обзорный режимы съёмки позволяют осуществлять картографирование соответственно в крупном, среднем и мелком масштабах. От углов визирования зависит интенсивность обратного рассеяния от разных объектов, характер геометрических искажений в областях с членистым рельефом, с высотными сооружениями. От поляризации также зависит характер обратного рассеяния, для решения разных задач желательно использовать ту или иную поляризацию или их комбинацию [Захаров и др., 2012].

Известно, что на формирование обратного рассеяния влияет очень большое количество факторов, связанных как с параметрами съёмочной системы, так и с текущим состоянием местности. Информация об объектах местности, содержащаяся на одномоментном снимке, представляет собой единовременный срез состояния местности и подвержена влиянию большого числа факторов, в том числе «случайных» (например, выпадение дождя или снега). Использование нескольких радиолокационных снимков в значительной степени позволяет избавиться от влияния случайных факторов. При использовании данных

повторных съёмок, даже полученных в одинаковых съёмочных режимах, существенное влияние на получаемый обратный сигнал оказывают направление, с которого осуществлялась съёмка, и углы визирования. Для исключения влияния факторов, связанных с параметрами съёмки, а не с изменениями местности, целесообразно использовать радиолокационные данные, полученные при одинаковой геометрии съёмки. Различные космические системы радиолокационного наблюдения обеспечивают возможность такой съёмки с разным временным интервалом (например, используемые в работе данные Radarsat-2 возможно получить при одинаковой геометрии визирования через 24 дня, Sentinel-1A – через 12 дней).

Уровни начальной обработки спутниковых радиолокационных данных

При выборе материалов радиолокационной съёмки большое значение имеет уровень начальной обработки данных, выполняемой их поставщиком. От уровня начальной обработки данных во многом зависит то, какие методы последующей обработки могут быть применены к данным и какие задачи могут быть решены с их использованием. Обычно выделяют пять уровней начальной обработки [Никольский, 2008]:

1) *Радиоголограмма* представляет собой «сырые», несфокусированные данные. Она не является изображением местности, поэтому не может использоваться для дешифрирования. Данные этого уровня начальной обработки требуют проведения операции фокусировки (другое её название – синтез радиоголограммы), требующей особого математического аппарата, как правило, отсутствующего в распространенных программных комплексах обработки;

2) Чаще всего операторы космических радиолокационных систем предоставляют информацию, начиная с уровня обработки *комплексные данные*. Эти данные представлены в проекции наклонной дальности (им свойственны некоторые искажения, связанные с боковым обзором), содержат действительную и мнимую компоненты, которые при выполнении определённых математических операций могут быть преобразованы в амплитудную и фазовую составляющие сигнала. Именно из амплитудной составляющей формируется радиолокационное

изображение местности, однако в случае комплексных данных оно представлено в проекции наклонной дальности и может иметь сильно различающийся размер пиксела по азимуту и дальности, что затрудняет его использования для дешифрирования без дополнительной обработки. Фазовая компонента не является изображением, но именно этот параметр сигнала используется в методах радиолокационной интерферометрии, которые позволяют формировать цифровые модели рельефа и выявлять смещения поверхности. Также комплексные данные используются в методах поляриметрии при наличии данных в разных поляризационных каналах;

3) *Геореференцированные изображения* – амплитудные изображения в проекции наземной дальности с одинаковым размером пиксела по азимуту и дальности. Данные этого уровня обработки могут использоваться для дешифрирования, однако для картографирования на их основе требуется их координатная привязка;

4) *Геокодированные изображения* – амплитудные изображения, трансформированные в ту или иную картографическую проекцию;

5) *Ортотрансформированные изображения* – амплитудные изображения, трансформированные в картографическую проекцию с устранением путём использования ЦМР геометрических искажений, обусловленных рельефом местности. Изображения двух последних уровней обработки могут напрямую использоваться для дешифрирования и создания карт.

Поскольку материалы радиолокационных съёмок могут быть представлены в разном виде (с пятью разными уровнями начальной обработки), условимся в дальнейшем использовать термины «радиолокационные данные» для материалов съёмки, представленных в комплексном виде, то есть содержащих и амплитудную, и фазовую составляющие сигнала, а «радиолокационный снимок» или «радиолокационное изображение» – для амплитудной составляющей.

Рассмотрим особенности выбора материалов радиолокационных съёмок на примере двух исследуемых территорий.

2.2.1. Данные Radarsat-2 и дополнительные источники для картографирования сельскохозяйственных земель в дельте Волги

Планирование и заказ радиолокационной съёмки Radarsat-2 для картографирования состояния сельскохозяйственных земель

В период с 2013 по 2016 гг. коллектив сотрудников и учащихся (включая автора) географического факультета МГУ совместно со специалистами НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» принимал участие в международной образовательной программе Канадского космического агентства SOAR-EI (Science and Operational Applications Research - Education International Initiative), в рамках которой на конкурсной основе предоставлялись радиолокационные данные со спутника Radarsat-2. Участникам проекта была предоставлена возможность самостоятельного планирования съёмок с использованием программы Radarsat-2 Acquisition Planning Tool, для чего было необходимо выбрать участок и сроки съёмки, а также параметры съёмочных режимов (диапазон углов визирования, набор поляризаций и др.) (рис. 2.1).

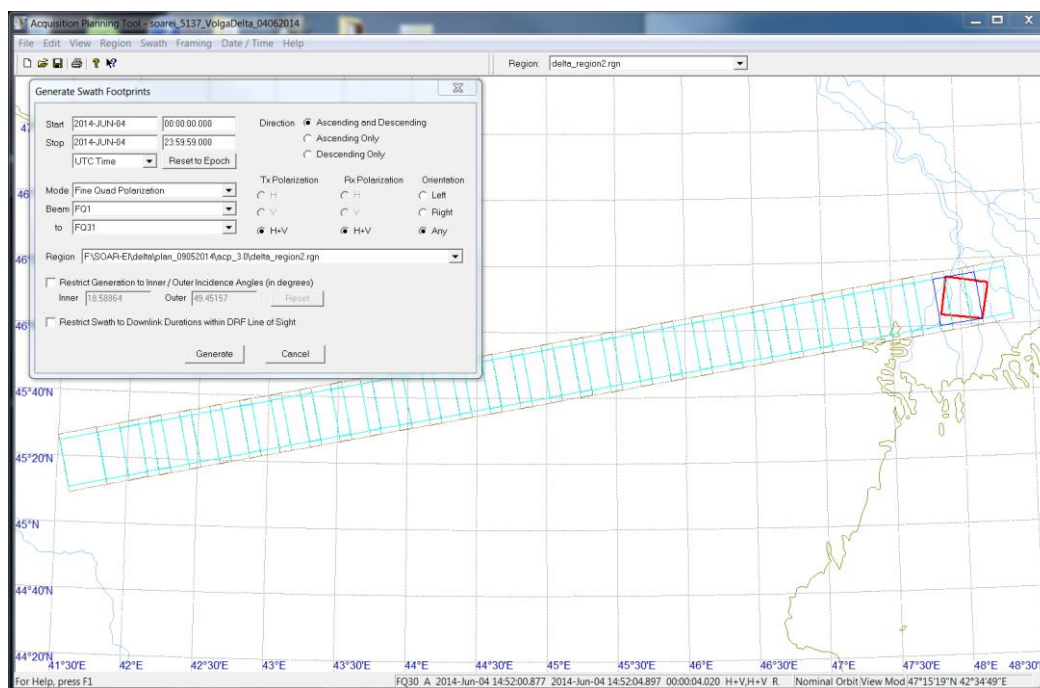


Рис. 2.1. Интерфейс программы планирования съёмки со спутника Radarsat-2 Acquisition Planning Tool

Радиолокатор С-диапазона, установленный на борту космического аппарата Radarsat-2, функционирует в 20 съёмочных режимах, различающихся шириной

полосы захвата, пространственным разрешением, набором поляризационных каналов и диапазонами углов съёмки [Radarsat-2 product..., 2016]. Важной особенностью этого радиолокатора является возможность съёмки в полнополяризметрическом режиме, т.е. одновременно в четырёх поляризациях. Именно этот съёмочный режим представляет особый интерес в работе, поскольку применение поляриметрических радиолокационных данных при изучении почвенно-растительного покрова неоднократно показывало большую эффективность, нежели однополяризационные изображения. Наличие поляриметрических данных в комплексном виде позволяет проводить их обработку специальными методами поляриметрической декомпозиции, предназначенными для извлечения информации о различных механизмах рассеяния радиоволн.

Поскольку поляриметрический режим съёмки характеризуется небольшим размером кадра (охватываемая снимком площадь – около 600 км²), а дельта Волги занимает куда большую территорию (около 9 тыс. км²), особое внимание уделялось выбору снимаемого участка. Предпочтение отдавалось территориям, на которых присутствуют разнообразные сельскохозяйственные угодья: пахотные земли, заливные поля (чеки), залежи разного возраста, рыбоводные пруды, заливные и незаливные луга, в том числе используемые как сенокосы и пастбища. Так как заранее предусматривалось проведение наземных обследований, немаловажным условием являлась транспортная доступность территории. В результате изучения местности по космическим снимкам разного пространственного разрешения, полученным в разные годы, для радиолокационной съёмки были выбраны окрестности г. Камызяк. На территории города находится Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого овощеводства и бахчеводства (ВНИИОБ), на базе которого и проводились наземные обследования. Для проведения съёмки выбран период с июня по август, когда в регионе наблюдается наиболее активная сельскохозяйственная деятельность. Съёмка проводилась с интервалом в 24 дня с идентичными параметрами (в интерферометрическом режиме) для исключения

влияния на результаты дистанционных измерений различных факторов, не связанных с изменениями местности (углов съёмки, направления визирования и др.). Характеристика радиолокационных данных, охватывающих участок дельты Волги, приведена в таблице 2.1, положение снимков показано на рисунке 2.2.

Таблица 2.1

Характеристика данных Radarsat-2 на участок дельты Волги

Космический аппарат/съёмочная система	Radarsat-2/РСА С-диапазона
Даты и время съёмки	04.06.2014, 28.06.2014, 22.07.2014, 15.08.2014 14:52 UTC
Режим съёмки	FQ30 (Fine QuadPol)
Поляризации	ГГ+ГВ+ВГ+ВВ
Угол падения излучения, °	47,6-48,7
Размер пиксела (аз. х дальн.), м	5,1х6,4
Пространственный охват, км	29х27
Виток орбиты	Восходящий
Уровень начальной обработки	SLC – single look complex



Рис. 2.2. Участок съёмки Radarsat-2 (жёлтая рамка) на фоне снимка в видимом диапазоне (источник – Google Earth)

Дополнительные источники для картографирования дельты Волги

Принципиальные отличия данных радиолокационной съёмки от снимков в оптическом диапазоне обуславливают необходимость привлечения дополнительных источников информации, выполняющих три основные функции: 1) выявление зависимости коэффициента обратного рассеяния (или удельной эффективной площади рассеяния, УЭПР) от свойств местности, 2) выбор эталонов для контролируемой классификации, 3) оценка результатов дешифрирования.

Подспутниковые наблюдения в дельте Волги. В сроки, совпадающие и близкие к срокам проведения съёмки со спутника Radarsat-2, проводились наземные обследования в дельте Волги на базе ВНИИОБ. В ходе работы

обследовались, главным образом, залежи разного возраста и степени нарушенности. Участки для обследования выбирались на основе анализа снимков в оптическом диапазоне очень высокого пространственного разрешения с учётом рекомендаций сотрудников ВНИИОБ и транспортной доступности. Для определения координат обследуемых участков использовался GPS-приёмник Garmin eTrex 20 и полевой микрокомпьютер Panasonic Toughbook CF-U1, работающий совместно с GPS-приемником BT-821. Установленное на микрокомпьютере программное обеспечение ArcPad (продукт серии ArcGIS) позволило непосредственно в полевых условиях наносить точки наблюдений и контуры на заранее загруженные снимки и карты, а также заполнять атрибутивные таблицы. Кроме записи координат обследуемых участков (рис. 2.3), наземные работы включали сбор следующей информации: вид сельскохозяйственного угодья (залежь, пашня, сенокос и т.д.), характеристики растительности (вид, проективное покрытие, высота и т.д.), характер почвенного покрова (размер неровностей, проявления пастбищной дигрессии), положение в рельефе, фотографии каждой обследованной площадки. Материалы полевых обследований совместно со снимками в оптическом диапазоне очень высокого пространственного разрешения, полученными летом 2014 г. (источник – сервис Google Earth), использовались для выбора эталонов при выполнении контролируемой классификации и для оценки достоверности полученных результатов.

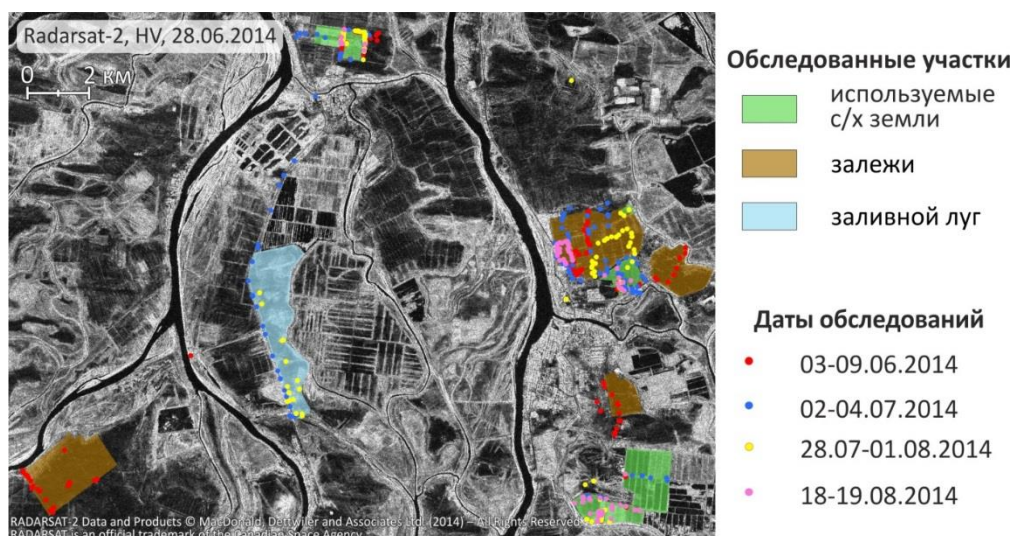


Рис. 2.3. Схема проведения наземных обследований в дельте Волги

Погодные условия на момент съёмки Radarsat-2. Несмотря на такое известное свойство радиолокационной съёмки, как всепогодность, некоторые метеорологические явления в момент съёмки, например, осадки, могут привести к существенным изменениям значений УЭПР, что, в свою очередь, может привести к неверной интерпретации изображений. Согласно архиву погоды на метеостанции аэропорта г. Астрахани [Погода в 243...], в момент проведения всех съёмок со спутника Radarsat-2, а также в течение предыдущих суток наблюдалась жаркая погода без осадков. Таким образом, при работе с разновременными радиолокационными изображениями на участок дельты Волги можно считать, что наблюдаемые на них изменения УЭПР связаны только с изменениями самих объектов, а не с внешними факторами.

Снимки в оптическом диапазоне Landsat и топографические карты. Для выявления характера современного использования сельскохозяйственных угодий в дельте Волги и определения возрастной структуры залежных земель с целью включения этих сведений в итоговую карту использовались топографические карты Генерального штаба СССР масштаба 1:100 000, созданные в 1970-80 гг., и разновременные снимки, полученные со спутников Landsat, размещённые в архиве Геологической службы США - USGS [EarthExplorer]. Первые снимки, полученные в рамках программы Landsat, охватывающие дельту Волги и имеющиеся в архиве, относятся к 1975 г. Эти снимки получены многозональной системой MSS и имеют пространственное разрешение 80 м. Проведение многозональной съёмки со спутников Landsat с более высоким разрешением (30 м) начато в 1982 г. (Landsat-4/TM и последующие). В связи с тем, что значительная часть сельскохозяйственных угодий дельты Волги имеет небольшой размер и неоднозначно интерпретируется при разрешении 80 м, снимки, полученные до 1982 г., в работе не использовались. Из имеющихся в архиве данных за период с 1982 по 2014 гг. отбиралось как минимум 3 безоблачных снимка для каждого года, полученных в течение вегетационного периода (весна-осень), поскольку именно разносезонные снимки позволяют дифференцировать

отличия в землепользовании. Изображения, полученные в период максимального половодья (май-июнь), позволяют отделить обвалованные поля от заливаемых непахотных участков дельты. Снимки, полученные в июле (период, в течение которого сельскохозяйственные культуры находятся на разных стадиях вегетации) и августе-сентябре (уборка урожая) обеспечивают уверенную дифференциацию возделываемых участков и залежей. Список снимков Landsat, использованных в работе, приведён в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Использованные снимки Landsat на территорию дельты Волги

Год	Число, месяц
1984	12.04, 24.06, 01.07, 10.07, 03.09
1986	20.05, 21.06, 23.07, 24.08, 09.09
1987	17.06, 26.07, 27.08
1988	10.05, 27.06, 29.07
1989	05.06, 07.07, 24.08
1993	16.05, 08.06, 04.08
1998	30.05, 06.06, 15.06, 18.08, 19.09
2002	22.04, 25.06, 20.07, 12.08, 29.09
2007	14.05, 30.05, 15.06, 17.07, 02.08
2008	25.05, 10.06, 17.06, 12.07, 05.09
2009	04.06, 20.06, 06.07, 07.08
2010	31.05, 09.07, 18.07, 10.08, 04.09
2011	25.05, 26.06, 12.07, 28.07, 13.08
2013	30.05, 15.06, 01.07, 17.07, 02.08
2014	01.05, 17.05, 02.06, 04.07, 20.07

2.2.2. Данные Sentinel-1 и дополнительные источники для картографирования природно-территориальных комплексов острова Котельный

Выбор радиолокационных данных Sentinel-1 из архива Sentinel Data Hub

Радиолокационные данные съёмочной системы Sentinel-1 распространяются на бесплатной основе через веб-портал Sentinel Data Hub [Scientific Data...]. Возможность съёмки с этих спутников на заказ отсутствует; пользователям доступны данные, получаемые в соответствии с заранее определёнными Европейским космическим агентством программами (observation scenario). В соответствии с этими программами съёмка острова Котельный проводится на регулярной основе; в архиве на эту территорию доступны данные, полученные в двух съёмочных режимах: сверхширокозахватном (Extra-Wide Swath, EW) и

интерферометрическом широкозахватном (Interferometric Wide Swath, IW). Режим EW обеспечивает съёмку в пределах полосы шириной 400 км, т.е. одновременный охват всей территории острова, с пространственным разрешением 40x20 м, а режим IW характеризуется шириной полосы захвата 250 км и разрешением 20x5 м, при этом снимки покрывают только отдельные части острова. Съёмка о. Котельный в режиме EW с октября 2014 г. проводится практически на постоянной основе, в то время как в режиме IW постоянной она стала только с июля 2016 г., а до этого носила разовый характер. В настоящей работе наибольший интерес представляет длинный временной ряд данных, охватывающий весь остров с хорошей повторяемостью (т.е. изображения в режиме EW). Из всего архива отобрано 49 снимков, полученных преимущественно с интервалом в 12 суток (таблица 2.3, рис. 2.4) при одинаковой геометрии съёмки, что позволяет связывать изменения характера рассеяния на разновременных снимках именно с изменениями объектов местности, а не с изменением съёмочных параметров (главным образом, углов визирования).

Таблица 2.3

Характеристика данных Sentinel-1 на остров Котельный

Спутник/съёмочная система	Sentinel-1A/C-band SAR
Режим съёмки	EW – Extra-Wide Swath - сверхширокозахватный
Уровень обработки	GRDM – ground range detected medium resolution - изображение в проекции наклонной дальности со средним уровнем детальности
Пространственный охват, км	400x400
Размер пиксела, м	40x40
Поляризация	ГГ, ГВ
Даты съёмки, дд.мм.гггг	29.11.2014 – 30.11.2016
Время съёмки, UTC	21:37
Угол падения излучения, °	19,2-46,5 (собственно остров Котельный – в пределах 28,6-42,9)
Номер витка	105
Направление орбиты	Нисходящая

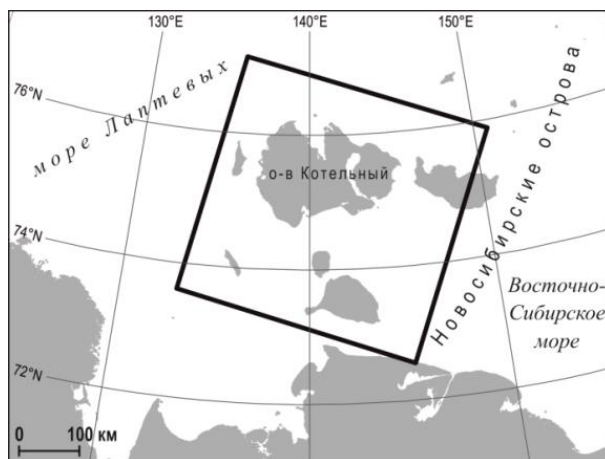


Рис. 2.4. Участок съёмки Sentinel-1A (выделен чёрной рамкой)

Дополнительные источники для картографирования острова Котельный

Общие закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностью в зависимости от её диэлектрических характеристик и шероховатости известны. Однако поскольку на формирование радиолокационных изображений одновременно оказывают влияние не только эти свойства местности, но и параметры съёмки (длина волны, поляризация, угол визирования и др.), однозначная их интерпретация представляется весьма затруднительной, особенно в случае малоизученных арктических территорий. Для уверенной интерпретации снимков Sentinel-1, в т.ч. разносезонных, привлекалось большое количество дополнительных материалов о местности: литературных, картографических, снимков в оптическом диапазоне, данных о погоде, наземных фотографий.

Литературные источники. Физико-географическая характеристика исследуемой территории подробно изложена в монографиях и сборниках статей [Новосибирские острова, 1963; Новосибирские острова, 1967; Советская Арктика..., 1970], основанных на материалах комплексных арктических экспедиций XX века. Большое количество актуальной на сегодняшний день информации о Новосибирском архипелаге собрано в материалах, обосновывающих создание на этой территории природного заказника [Материалы комплексного..., 2015].

Картографические источники. Картографические материалы наилучшим образом иллюстрируют и дополняют сведения, приведённые в литературных

источниках. Наиболее точную и детальную информацию о высотах рельефа острова содержат листы топографической карты Генерального штаба СССР масштаба 1:200 000, отображающие состояние местности на 1973 и 1981 гг. Рисунок горизонталей на топографической карте позволяет оценивать степень эрозионного расчленения поверхности, крутизну и ориентацию склонов, что является важным дополнением при анализе радиолокационных изображений. Топографическая карта подробно отображает гидрографическую сеть территории, позволяет выявлять заозёрные и заболоченные участки, области, сложенные песчаными отложениями.

Листы геологической карты масштаба 1:200 000, изданные в начале 1980-х гг., дают наглядное представление о геологическом строении территории: о возрасте и породах, слагающих различные геологические структуры, о составе и генетических типах четвертичных отложений. Карта четвертичных образований масштаба 1:1 000 000 даёт информацию об их возрасте, генезисе и вещественном составе.

Мелкомасштабная геоморфологическая схема, составленная И.В. Семеновым [Новосибирские острова, 1967], и схема, входящая в комплект Государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 [Государственная геологическая..., 1999], передают комплекс характеристик рельефа исследуемой территории, включая морфологию и генезис рельефа, рельефообразующие процессы и состав рыхлых отложений.

Полезным источником о распространении разных типов растительности послужила мелкомасштабная схема геоботанического районирования, составленная Р.К. Сиско [Советская Арктика..., 1970].

Снимки в оптическом диапазоне. Несмотря на то, что остров Котельный часто закрыт облаками, в открытом доступе можно найти безоблачные или частично безоблачные снимки в оптическом диапазоне, полученные в сроки, близкие к срокам радиолокационной съёмки, а в некоторых случаях и в совпадающие. Их использование во многом упрощает интерпретацию радиолокационных изображений. Перечень используемых в работе снимков в

оптическом диапазоне приведён в таблице 2.4. Наличие снимков, полученных в красном (Кр) и ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах спектра, позволяет рассчитывать вегетационный индекс $NDVI = (БИК - Кр) / (БИК + Кр)$, который в свою очередь может быть использован для оценки вклада растительного покрова в обратное рассеяние радиосигнала.

Таблица 2.4

Использованные снимки в оптическом диапазоне на территорию острова Котельный

Спутник/съёмочная система	Landsat-8/OLI
Пространственный охват, км	170x183
Пространственное разрешение, м	30
Спектральные диапазоны, мкм (использованные)	0,45-0,51 0,53-0,59 0,64-0,67 0,85-0,88
Даты съёмки	2016 г.: 01.06, 03.06, 08.06, 19.07, 06.08, 29.08, 31.08, 02.09, 03.09, 05.09, 07.09

Все картографические источники и космические снимки были трансформированы в одну картографическую проекцию и собраны в единый ГИС-проект с радиолокационными изображениями, что позволило осуществить их совместный анализ.

Фотографии местности. Для знакомства с особенностями ландшафтов острова использовались фотографии из доступных источников, в частности Google Earth. Каждая из опубликованных на портале фотографий имеет координатную привязку, что позволяет повысить достоверность интерпретации отдельных участков радиолокационных изображений.

Данные о погоде. Как и в случае дельты Волги, для острова Котельный также были отобраны сведения о погоде на момент проведения съёмки со спутника Sentinel-1A [Погода в 243...].

2.3. Создание производных радиолокационных изображений как подготовительный этап к дешифрированию и картографированию

Исходные материалы космических радиолокационных съёмки затруднительно напрямую использовать для дешифрирования и картографирования. Визуальное дешифрирование радиолокационных снимков затруднено, прежде всего, из-за того, отражённое поверхностью радиоволновое

излучения непривычно для человеческого глаза; дополнительные трудности при визуальном анализе РЛ снимков вызывает спекл-шум и специфические геометрические и яркостные искажения. Автоматизированное дешифрирование также во многом осложнено наличием спекл-шума, геометрическими и радиометрическими искажениями, присутствующими на снимках. В связи с этим необходимо проведение предварительной обработки радиолокационных данных, нацеленной на создание преобразованных изображений, которые возможно использовать для дешифрирования.

Необходимость создания преобразованных изображений, пригодных для решения разнообразных отраслевых задач (например, в сельском и лесном хозяйстве и др.), уже отмечалась в работах [Гусев и др., 2013; Дмитриев и др., 2014]. Этими авторами предложено комбинировать изображения из разных каналов многочастотного, многополяризационного или многовременного радиолокационного снимка, в результате чего формируются так называемые «базовые продукты», на которых наиболее отчетливо выделяются разные группы объектов. При этом не указаны конкретные операции, которые необходимо выполнить применительно к исходным РЛ данным для получения того или иного «базового продукта», а предложенные комбинации каналов (например, $\arctg(\text{ГВ}/\text{ГГ})$) не всегда поддаются простой интерпретации.

2.3.1. Стандартные этапы обработки амплитудных и поляриметрических радиолокационных данных

Рассмотрим основные этапы, которые обычно применяются для предварительной обработки амплитудных и поляриметрических радиолокационных данных.

Радиометрическая калибровка. Из законов радиолокации известно, что мощность принимаемого радиолокатором обратного сигнала определяется величиной эффективной площади рассеяния (ЭПР) σ объекта, которая выражается следующей формулой: $\sigma = 4\pi P_s / W$ [м²], где P_s , [Вт] – мощность сигнала, рассеянного объектом в направлении радиолокатора, W [Вт/м²] – плотность потока мощности сигнала, облучающего объект. ЭПР соответствует площади

некоторой идеальной поверхности, расположенной по нормали к распространяющейся электромагнитной волне и дающей эквивалентное реальному объекту местности отражение. ЭПР зависит от размеров объекта, длины волны радиолокатора, углов наблюдения, поляризации. При радиолокационной съёмке отражающую способность зондируемой поверхности характеризуют безразмерным коэффициентом обратного рассеяния, который представляет собой удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) σ_0 , т.е. ЭПР элемента разрешения изображения, отнесённую к площади этого элемента: $\sigma_0 = \sigma / (\rho_x \rho_y)$, где ρ_x и ρ_y – разрешение элемента изображения по азимуту и дальности соответственно. Обычно УЭПР выражают в децибелах $\sigma_{0dB} = 10 \lg \sigma_0$ [Верба и др., 2010].

Для обеспечения возможности количественного сравнения значений обратного рассеяния от разных участков поверхности или их временных изменений необходимо проведение радиометрической калибровки данных, позволяющей перейти от «сырых» значений пикселей (DN, digital number) к значениям УЭПР. Современные программы для обработки радиолокационных данных, как правило, включают возможность калибровки данных большинства космических РСА в соответствии с формулами пересчёта, приведёнными в технической документации к каждой космической системе [Radiometric calibration..., 2015; Radarsat-2 product..., 2016], считывая всю необходимую информацию из сопроводительных файлов (для используемых в работе данных Radarsat-2 – файл lutSigma.xml, Sentinel-1A - calibration.xml).

Автоматическая корегистрация разновременных снимков. При работе с разновременными снимками (в частности, при многовременной фильтрации, разновременном цветовом синтезе, формировании графиков временных образов объектов и т.д.) требуется их точное геометрическое согласование. Современные программы, предназначенные для обработки данных радиолокационного зондирования, предусматривают возможность проведения автоматического геометрического согласования радиолокационных снимков с точностью до долей пиксела, называемого корегистрацией. Она выполняется в несколько этапов:

вначале на основе орбитальных данных выполняется приблизительная оценка сдвига одного изображения относительно другого с точностью до десятков пикселей, для более точного совмещения применяются методы кросс-корреляции в скользящих окнах [Киселёва и др., 2015]. Результатом корегистрации является серия изображений, в которой все вспомогательные изображения (slave) трансформированы в геометрию опорного (master).

Подавление спекл-шума. Спекл-шум является неотъемлемым свойством снимков, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой, и образуется из-за когерентного наложения откликов от нескольких объектов в элементе разрешения изображения [Mascarenhas, 1996]. Его присутствие затрудняет визуальное восприятие изображений и их автоматизированную обработку (прежде всего, классификацию, приводя к излишне дробному её результату (рис. 2.5)). Для снижения уровня спекл-шума на амплитудных изображениях в программных комплексах предусмотрено несколько способов: межэлементное некогерентное накопление и различные виды фильтрации.

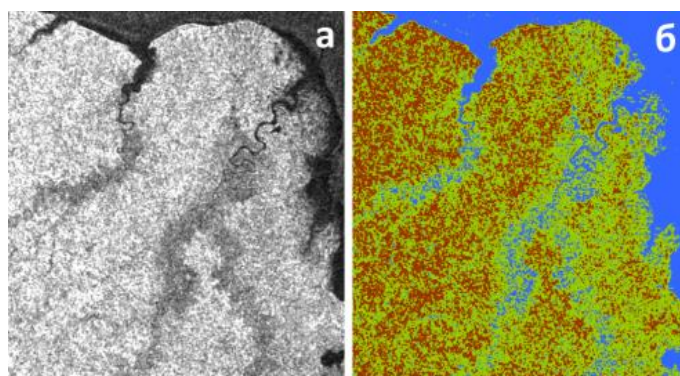


Рис. 2.5. Влияние спекл-шума на результат кластеризации: а – фрагмент необработанного РЛ снимка Sentinel-1A; б – результат кластеризации с выделением трёх классов. Синим цветом выделены объекты гидрографии; зелёным и коричневым – суша, причём из-за чрезмерной зернистости соотнесение с конкретными объектами практически невозможно

Под некогерентным накоплением (*англ.* multilooking) подразумевается усреднение изображения в окне размером $N \times M$ пикселей с последующим укрупнением элементов изображения (рис. 2.6). При этом уровень спекл-шума уменьшается, но уменьшается и размер изображения в пикселах, падает детальность изображения в целом. При использовании для картографирования радиолокационного изображения, прошедшего процедуру некогерентного

накопления, важно иметь в виду то, что уменьшается возможный масштаб картографирования и увеличивается размер минимального картографируемого объекта.

	N						
M	9	4	3	1	б	4	2
	2	1	1	2			
	4	6	3	9		5	8
	5	5	8	12			
a							

Рис. 2.6. Принцип работы межэлементного некогерентного накопления: а – исходное изображение, б – преобразованное изображение. $N=M=2$ пиксела, цифры в каждом пикселе соответствуют яркости изображения

Различные фильтры работают преимущественно в пределах скользящего окна, последовательно перемещающегося на один пиксел по всему снимку. При использовании фильтрации количество пикселей в результирующем изображении остается таким же, как и в исходном. Однако существенное влияние на детальность снимка после фильтрации оказывает размер скользящего окна: окно большого размера хоть и способствует подавлению зернистости, но при этом приводит к сильному размытию границ между объектами, а некоторые объекты и вовсе перестают быть различимыми как, например, мелкие озёра на рисунке 2.7.

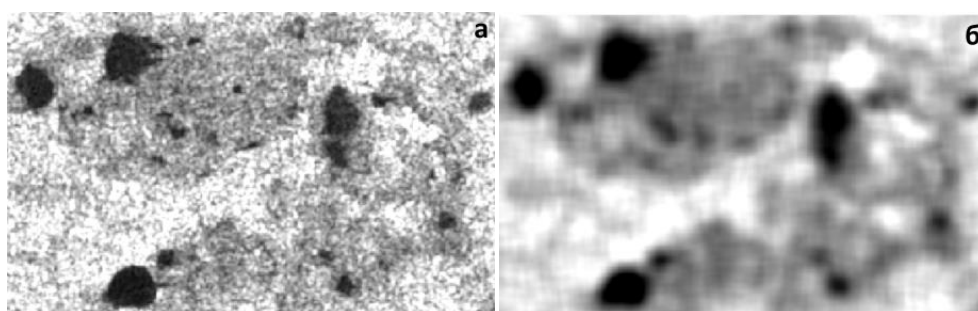


Рис. 2.7. Пример избыточной фильтрации спекл-шума: а – исходный РЛ снимок Sentinel-1A; б – результат применения фильтра Mean со скользящим окном 13x13 пикселей

В целом, все фильтры амплитудных радиолокационных снимков можно поделить на несколько групп: неадаптивные (Mean, Median и др.) и адаптивные (Lee, Frost, Gamma MAP и др.) фильтры одиночных изображений и фильтры многовременных изображений. Наиболее просты в вычислительном плане алгоритмы неадаптивной фильтрации. Фильтр Mean, например, вычисляет среднее арифметическое в скользящем окне и присваивает это значение

центральному пикселу окна. Адаптивные фильтры более сложны, подавление шума в них опирается на характер распределения значений пикселей в пределах скользящего окна. Так, фильтр Lee на основе коэффициента вариации значений пикселей в рамках скользящего окна осуществляет баланс между усреднением (для однородных участков) и пропуском значения без изменений (в случае точечных объектов или границ между объектами) [Маркин, 2008]. Многовременные фильтры используют серию геометрически согласованных радиолокационных снимков одной и той же территории. При этом проводится не просто усреднение изображений, а на основе всех снимков вычисляется оптимальное весовое выражение для каждого в отдельности. В результате многовременной фильтрации количество выходных изображений совпадает с количеством исходных.

Различные способы подавления спекл-шума на амплитудных радиолокационных изображениях подробно представлены во многих работах [Lee et al., 1994; Вербя и др., 2010; Argenti et al., 2013; Land applications..., 2014]. [Woodhouse, 2005] обращает внимание на то, что для проведения этой операции необходимо использовать изображения, значения пикселей которых выражены не в децибелах. Для решаемых нами задач особое значение имеет тот факт, что выбор способа подавления спекл-шума индивидуален при решении конкретной тематической задачи [Лукьяненко, 2000]. В зависимости от объекта и масштаба картографирования необходимо находить компромисс между сглаживанием спекл-шума и сохранением деталей изображения, границ между объектами.

Существуют разные способы оценки качества фильтрации спекл-шума: она может проводиться как визуально, так и с расчётом некоторых показателей [Argenti et al., 2013]. В нашей работе будем оценивать качество фильтрации исходя из достоверности результатов последующей классификации изображения и их дробности (рис. 2.8), что важно для выделения контуров при последующем создании карт: на схеме дешифрирования, полученной в результате кластеризации изображений после фильтрации, различаются участки, которые можно однозначно соотнести с отдельными формами рельефа, в частности,

долинами (зелёный) и междуречными пространствами (коричневый), причём результат кластеризации снимка после фильтрации с большим размером скользящего окна даёт более чёткие границы.

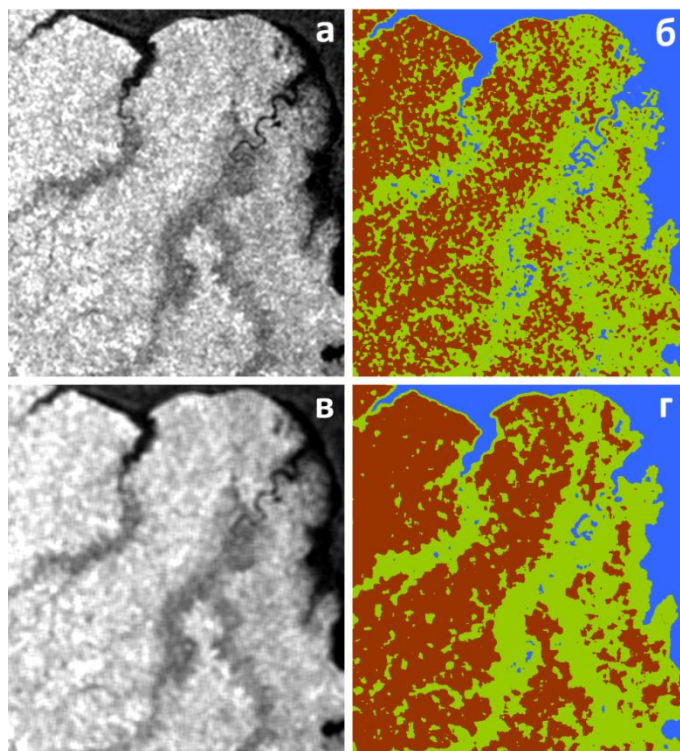


Рис. 2.8. Влияние фильтрации спекл-шума на дробность контуров при кластеризации: а, в – фрагмент РЛ снимка после применения фильтра Mean со скользящим окном 5x5 и 9x9 пикселей соответственно; б, г – соответствующие им результаты кластеризации (участок совпадает с участком на рис. 2.5)

Геокодирование и ортотрансформирование. Под геокодированием и ортотрансформированием подразумевается выполнение координатной привязки изображений. Последняя требует наличия цифровой модели рельефа и особенно востребована для участков с расчленённым рельефом. Как правило, современные программы осуществляют привязку автоматически (достаточно указать проекцию и размер пиксела выходного изображения, для ортотрансформирования – путь для доступа к ЦМР), используя при этом множество параметров (положение космического аппарата в момент съёмки, параметры его движения, движения зондируемого участка, обусловленного вращением Земли и др.), записанных в сопроводительных файлах. В случаях существенных ошибок в геометрическом положении элементов изображения может потребоваться дополнительная привязка вручную путём набора опорных точек относительно некоторой основы,

имеющей высокую точность привязки. Также для радиолокационных данных с ряда спутников спустя некоторое время после съёмки поставляются файлы, содержащие уточнённую информацию о движении космического аппарата, использование которых может привести к достижению более высокой точности привязки снимка [Nonaka et al., 2008].

Поляриметрическая декомпозиция. Обработка материалов съёмки многополяризационными радиолокаторами выполняется методами радиолокационной поляриметрии (декомпозиция, классификация, расчёт поляризационных сигнатур). В настоящей работе наибольший интерес представляет метод поляриметрической декомпозиции, которая подразумевает разложение комплексного поляриметрического отклика (матрицы рассеяния) объекта, описывающего обратный сигнал в четырёх поляризационных каналах (ГГ, ГВ, ВГ, ВВ), на более легко интерпретируемые (по сравнению со снимками в отдельных поляризациях) составляющие, описывающие выраженность того или иного механизма рассеяния сигнала поверхностью: однократного, двукратного, объёмного и др. Разработано множество алгоритмов поляриметрических декомпозиций, получивших названия преимущественно по своим авторам (Pauli, Krogager, Freeman, и др.), они основаны на работе с матрицами и подробно рассмотрены в [Lee, Pottier, 2009; van Zyl, Kim, 2011; Polarimetry Tutorial...].

2.3.2. Методика создания производных радиолокационных изображений

Все описанные выше процедуры (калибровка, фильтрация спекл-шума и др.) являются стандартными для обработки исходных данных радиолокационного зондирования. Однако в зависимости от вида исходных данных (амплитудные разновременные, амплитудные многополяризационные, комплексные многополяризационные), особенностей исследуемой территории и решаемой задачи, предполагаемого метода анализа снимков (визуального или автоматизированного) требуются различные подходы к комбинированию этих этапов. Результаты обработки исходных радиолокационных данных в соответствии с определённой последовательностью будем называть производными радиолокационными изображениями. При этом важно отметить,

что перечень производных изображений может быть намного шире, чем представленный в настоящей работе. Нами рассмотрены те из них, которые применимы для использованных в работе данных и наиболее информативны с точки зрения решаемых задач.

Создание производных изображений на основе амплитудных радиолокационных снимков. Предлагаются технологические схемы создания производных радиолокационных изображений двух видов: пригодных для автоматизированного и визуального дешифрирования.

К изображениям для автоматизированного дешифрирования отнесем радиолокационные изображения, прошедшие этап радиометрической калибровки, то есть те, которые можно использовать для измерения значений коэффициента обратного рассеяния (УЭПР) и компьютерной классификации объектов на основе этих значений. В нашем случае в их число входят двух- и четырёхполяризационные изображения (для снимков Sentinel-1A и Radarsat-2 соответственно), а также многовременные изображения (многоканальное изображение, составленное из серии разновременных). Отметим, что изображения, предназначенные для автоматизированного дешифрирования, могут состоять из большего числа каналов, чем изображения для визуального дешифрирования (например, в случае RGB-синтеза используется только три канала). Разработанные блок-схемы создания производных амплитудных РЛ изображений, предназначенных для автоматизированного дешифрирования приведены на рисунке 2.9-а, б.

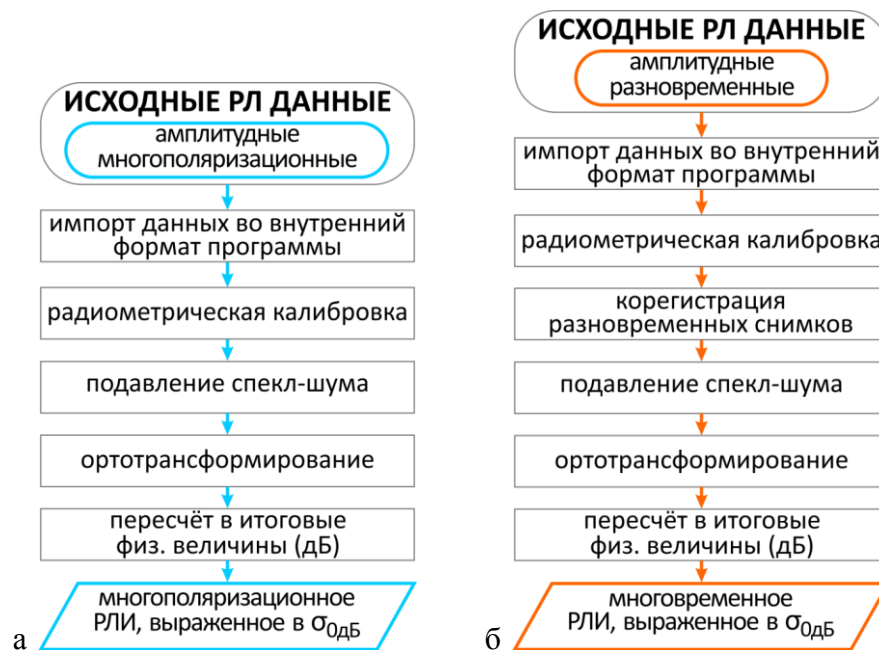


Рис. 2.9. Блок-схемы формирования производных РЛ изображений, пригодных для автоматизированного дешифрирования, полученных на основе многополяризационных (а) и разновременных (б) амплитудных снимков

Что касается визуального дешифрирования РЛ снимков, то одноканальные снимки зачастую малоинформативны для этого вида анализа, поскольку одинаковая интенсивность обратного рассеяния может наблюдаться для участков, существенно различающихся по своей природе. Сложности распознавания объектов на радиолокационных снимках могут компенсироваться использованием изображений, полученных одновременно в нескольких частотных диапазонах, поляризационных каналах или же в разные сроки [Дмитриев и др., 2014].

Как и в случае создания производных изображений для автоматизированного дешифрирования, мы предлагаем формировать изображения для визуального дешифрирования как из разновременных, так и из многополяризационных снимков для получения наиболее информативных изображений, наилучшим образом отображающих различные особенности местности. Для разновременных снимков эффективен RGB-синтез изображений, при котором красный, зелёный и синий цвета присваиваются снимкам, полученным в разные сроки. Для многополяризационных снимков могут быть предложены следующие варианты RGB-синтеза: 1) при наличии четырёх поляризационных каналов (в нашем случае – для данных Radarsat-2) – R - ГГ, G - ГВ, B - ВВ (известно, что изображения, полученные в поляризациях

ГВ и ВГ, практически совпадают [Верба и др., 2010], поэтому использование их обоих при цветовом синтезе нецелесообразно); 2) при наличии двух поляризационных каналов (для данных Sentinel-1A) – R - ГГ, G - ГВ, В – ГГ/ГВ. Изображение в синем канале позволяет подчеркнуть различия уровней обратного рассеяния в согласованной и перекрёстной поляризациях. Блок-схемы создания производных амплитудных РЛ изображений, пригодных для визуального дешифрирования приведены на рисунке 2.10 а, б.

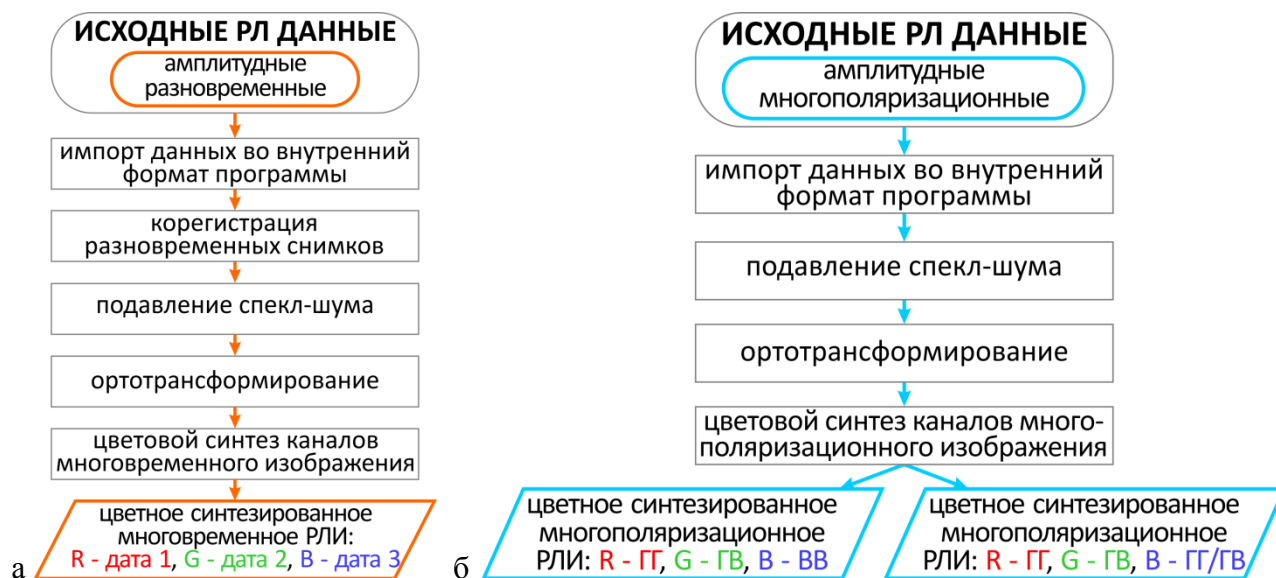


Рис. 2.10. Блок-схемы формирования производных РЛ изображений, пригодных для визуального дешифрирования, полученных на основе разновременных (а) и многополяризационных (б) амплитудных снимков

Создание производных изображений на основе комплексных поляриметрических радиолокационных данных. Как было сказано выше, среди различных способов преобразования комплексных поляриметрических радиолокационных данных предпочтительным в нашем случае является метод поляриметрической декомпозиции. Несомненно, результаты декомпозиций могут использоваться и для визуального дешифрирования, однако в настоящей работе особый интерес представляет возможность количественного сравнения интенсивности того или иного механизма рассеяния сигнала. В связи с этим рассмотрим схему создания производных изображений для автоматизированного дешифрирования. Исходной информацией для выполнения поляриметрических декомпозиций являются комплексные (содержащие амплитудную и фазовую составляющие) радиолокационные данные, полученные одновременно в

нескольких поляризационных каналах (двух или четырёх). Как и в случае преобразования амплитудных снимков, нацеленного на их дальнейшее использование для автоматизированного дешифрирования, первым этапом преобразования становится радиометрическая калибровка, однако в этом случае важно сохранение данных в комплексном виде. Следующим шагом является фильтрация спекл-шума. Для поляриметрических радиолокационных данных, как и для амплитудных, также предусмотрены специальные алгоритмы фильтрации [Farage et al., 2006; Polarimetry Tutorial...]. Результатом поляриметрической декомпозиции является многоканальное производное изображение, компоненты которого характеризуют вклад того или иного механизма рассеяния в общий обратный сигнал (количество компонент может различаться в зависимости от выбранного алгоритма декомпозиции). Схема обработки поляриметрических радиолокационных данных приведена на рисунке 2.11. Разнообразие способов декомпозиции усложняет выбор единственной, наиболее подходящей. Пригодность результатов декомпозиций в работе будем оценивать, опираясь на достоверность их последующей классификации (см. параграф 2.5.1).

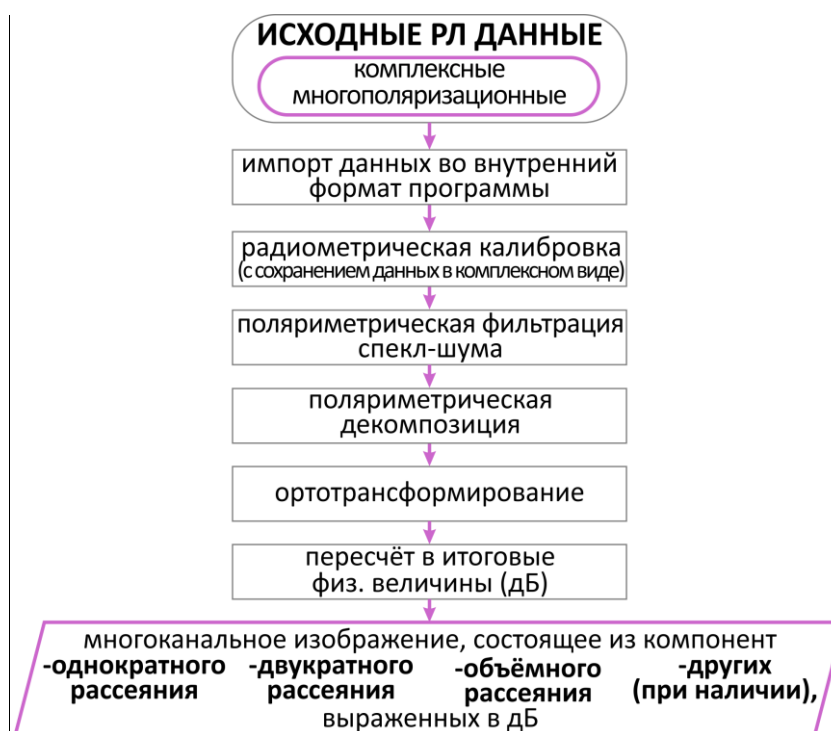


Рис. 2.11. Блок-схема предварительной обработки комплексных поляриметрических радиолокационных данных для создания производных изображений, пригодных для автоматизированного дешифрирования

2.4. Анализ свойств местности, влияющих на интенсивность обратного рассеяния радиосигнала (УЭПР)

Прежде чем переходить к вопросу картографирования на основе радиолокационных снимков, проанализируем, какие объекты местности или их свойства отображаются на этих снимках, и что могло бы лечь в основу тематического содержания создаваемых карт.

Известно, что на интенсивность обратного рассеяния радиосигнала в совокупности влияют как параметры съёмки, так и свойства местности (рис. 2.12).

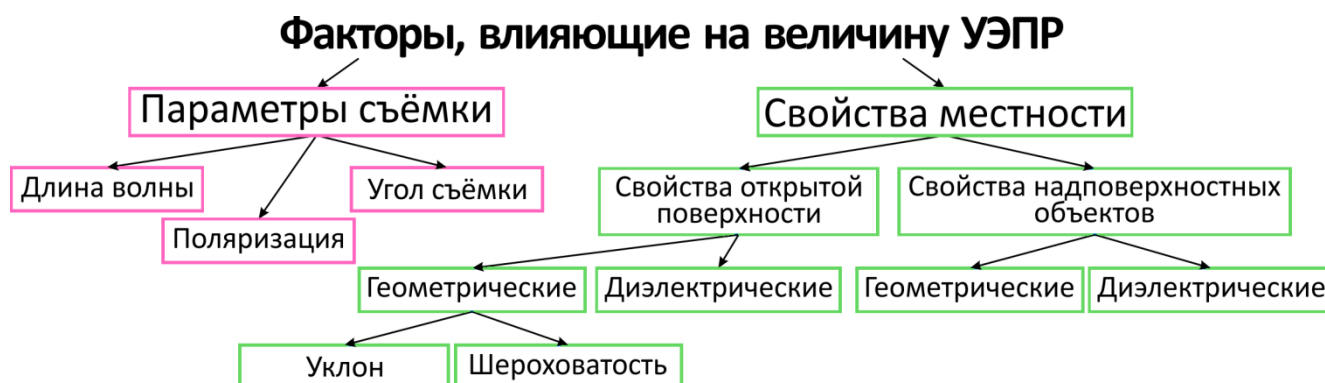


Рис. 2.12. Факторы, влияющие на величину удельной эффективной площади рассеяния (по [Front | SAR-EDU])

Рассмотрим значения УЭПР различных участков, наблюдаемые на использованных в работе радиолокационных изображениях, и проанализируем влияющие на них факторы. В качестве основы для анализа будем использовать производные РЛИ, пригодные для автоматизированного дешифрирования, в частности многополяризационные и многовременные амплитудные изображения, схемы получения которых приведены на рис. 2.9-а, б.

2.4.1. УЭПР объектов в дельте Волги на радиолокационных изображениях Radarsat-2

Рассмотрим отдельно объекты, характеризующиеся значительными и незначительными изменениями между съёмками. К первым на выбранном участке относятся, прежде всего, обрабатываемые сельскохозяйственные угодья (пашни и заливные поля – чеки) и заливные луга, ко вторым – населённые пункты, объекты гидрографии, бугры Бэра, неиспользуемые сельскохозяйственные земли и рыбоводные пруды. Поскольку основным объектом картографирования являются

неиспользуемые сельскохозяйственные земли, в частности, их современное состояние, обратим внимание на различные участки в их пределах.

На рис. 2.13 приведены фрагменты РЛИ, временные образы УЭПР и наземные фотографии значительно меняющихся между съёмками объектов.

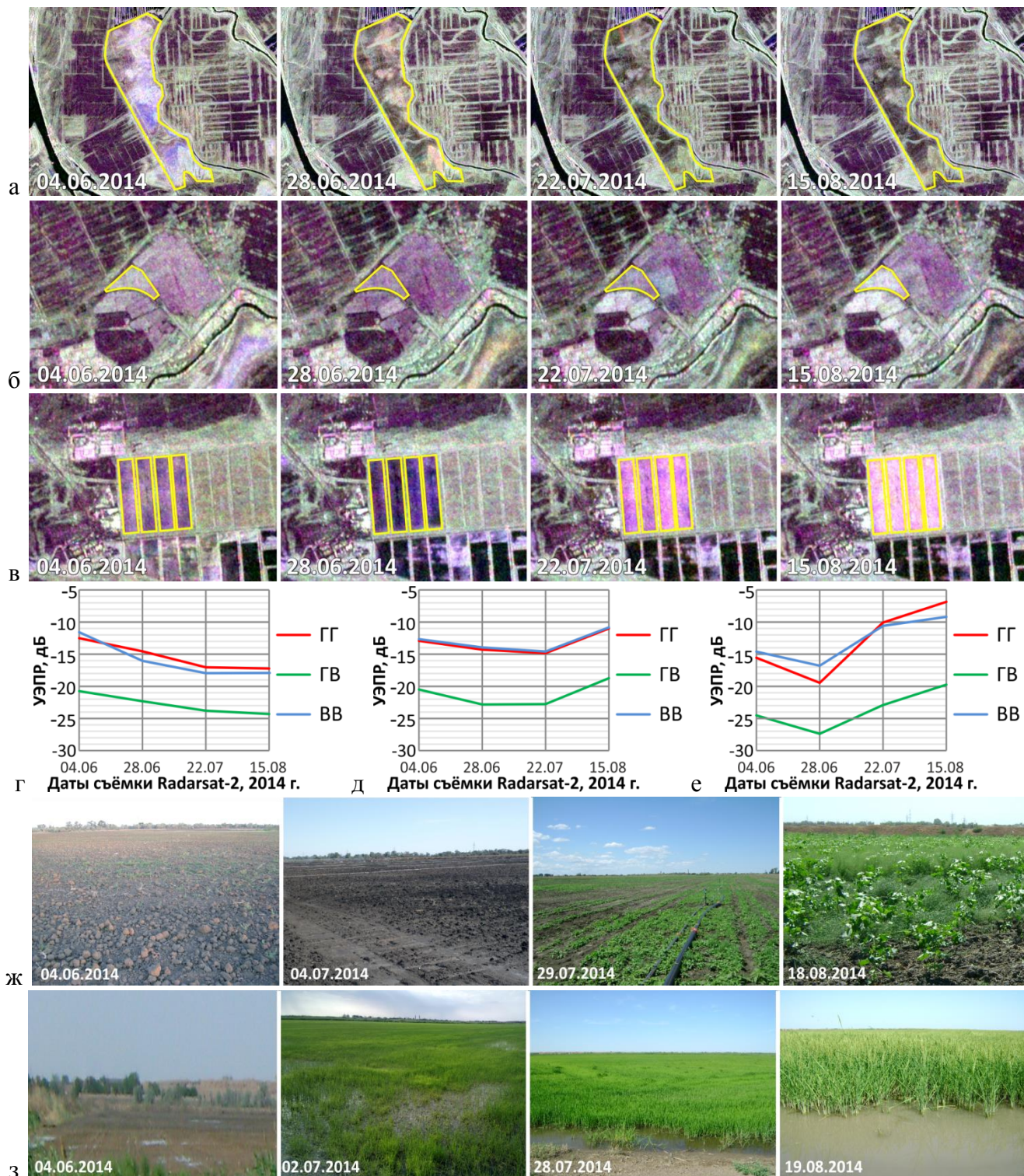


Рис. 2.13. Значительно меняющиеся между съёмками объекты на участке в дельте Волги. Фрагменты многополяризационных РЛИ Radarsat-2 (цветовой синтез: R – ГГ, G – ГВ, В - ВВ), полученных в разные сроки, графики временных образов УЭПР и наземные фотографии: а, г - заливной луг; б, д, ж – посевы хлопчатника; в, е, з – посевы риса

Растительность заливного луга (рис. 2.13-а, г) в начале июня находится в воде, что способствует возникновению двукратного рассеяния с достаточно высокими значениями УЭПР (-11...-13 дБ в согласованных поляризациях и около -21 дБ – в перекрёстной). Снижение интенсивности обратного рассеяния в последующие сроки до -17...-18 дБ в согласованных поляризациях и до -24 дБ в перекрёстной обусловлено уменьшением уровня воды, вследствие чего доминировать стал механизм объёмного рассеяния, а также сенокошением на некоторых участках с возросшим вкладом однократного рассеяния.

Повышенные значения УЭПР на участке с посевами хлопчатника (рис. 2.13-б, д, ж) во время первой съёмки связаны со значительной шероховатостью почвы после вспашки. Из-за поздних всходов хлопчатника (конец июля) не наблюдается положительная динамика УЭПР в первые три срока. Максимальное значение УЭПР наблюдается во время последней съёмки, когда высота хлопчатника достигла 1 м, произрастающих вместе с ним на участке сорняков – около 70 см, а их общее проективное покрытие составило 100%.

Участок заливного поля (рис. 2.13-в, е, з) в первый срок съёмки не заполнен водой, но характеризуется высокой влажностью почвы, что объясняет более высокие значения УЭПР по сравнению со вторым сроком, когда чек был заполнен водой, над которой местами наблюдались всходы риса высотой до 15 см (вероятно, что отражение сигнала от водной поверхности преобладало над рассеянием от всходов). Высота риса в сроки, близкие к 3-ей и 4-ой съёмкам, составляла 35 см и 50 см над водой соответственно, что проявилось в значительном увеличении УЭПР до -7...-9 дБ с согласованных поляризациях и -20 – в перекрёстной (сочетание поверхности воды и стеблей риса приводит в возникновению двукратного рассеяния).

Чётко выраженное влияние изменений сельскохозяйственной растительности между съёмками на значения УЭПР может быть использовано при классификации сельскохозяйственных культур, мониторинге их роста, выявлении неоднородных участков в пределах полей по разновременным радиолокационным изображениям, однако это не является основной задачей

настоящего исследования. Тем не менее, внутрисезонная изменчивость УЭПР обрабатываемых сельскохозяйственных угодий и заливных лугов может использоваться для отделения их от неиспользуемых земель по радиолокационным снимкам.

На рисунке 2.14 приведен фрагмент многополяризационного РЛИ и графики многополяризационных образов УЭПР объектов, слабо меняющихся за период между съёмками, а на рисунке 2.15 – фотографии некоторых из них.

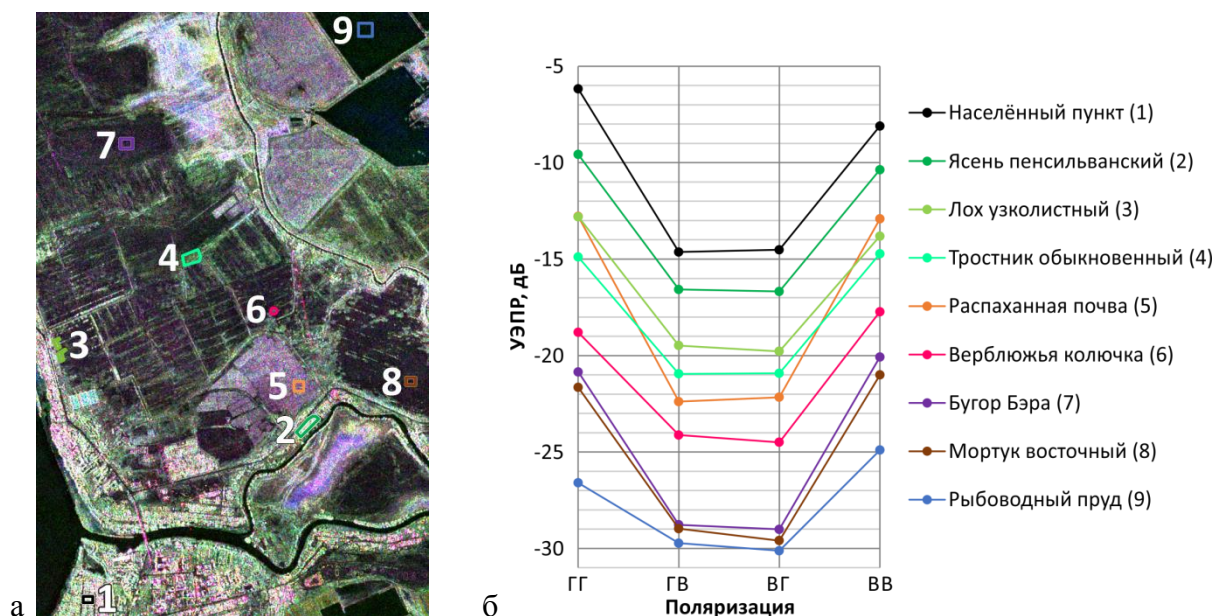


Рис. 2.14. Слабо меняющиеся между съёмками объекты на участке в дельте Волги: а - фрагмент многополяризационного РЛИ Radarsat-2 (цветовой синтез: R – ГГ, G – ГВ, В - ВВ), полученного 04.06.2014 г.; б – графики многополяризационных образов УЭПР за этот же срок

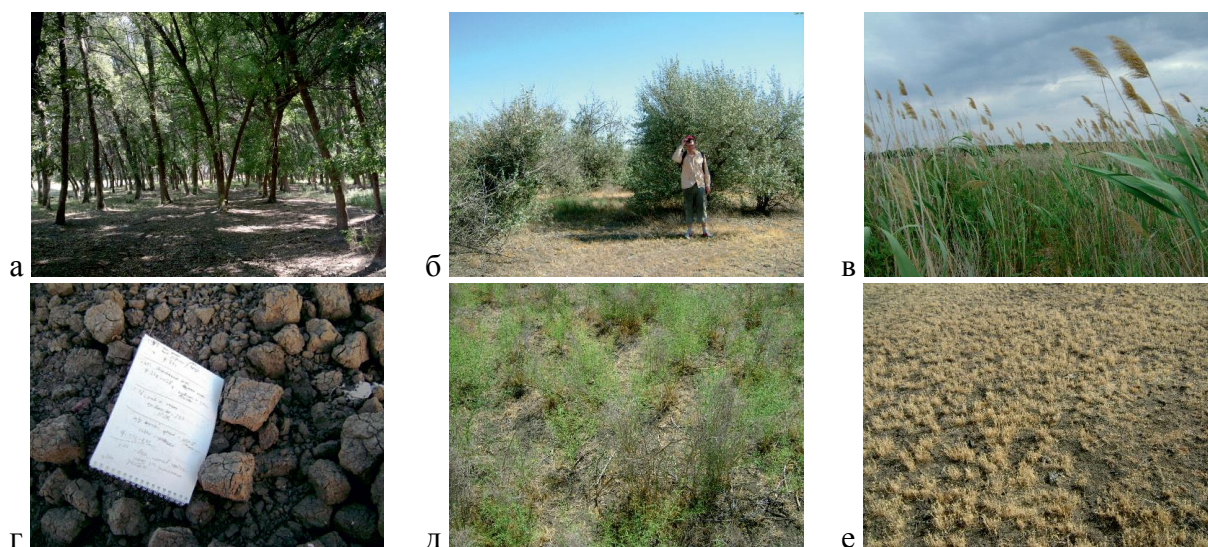


Рис. 2.15. Наземные фотографии участков: а – ясень пенсильванский, б – лох узколистный, в – тростник обыкновенный, г – распаханная почва, д – верблюжья колючка, е – мортук восточный

Среди слабо меняющихся между съёмками объектов самыми низкими значениями УЭПР во всех поляризационных каналах (< -25 дБ) характеризуются рыбоводные пруды, поскольку водная гладь способствует зеркальному отражению волн в сторону от радиолокатора.

Участок залежи с высохшими эфемерами (мортук восточный, высота - 5-10 см, проективное покрытие 50 % (рис. 2.15, е)) в перекрёстных поляризациях имеет такие же низкие значения УЭПР, как водные объекты ($-29...-30$ дБ), что можно объяснить низким вкладом объёмного рассеяния. Несколько большие значения ($-21...-22$ дБ) наблюдаются в согласованных поляризациях, что, вероятно, связано с большей шероховатостью участка по сравнению с поверхностью воды.

Незначительно (меньше, чем на 1 дБ в положительную сторону) от предыдущего участка отличается УЭПР площадки, расположенной на бугре Бэра, для которой характерна бесструктурная почва и разраженный растительный покров небольшой высоты.

УЭПР участка, заросшего верблюжьей колючкой (высота - 40 см, проективное покрытие - 70 %), во всех поляризациях принимает промежуточные значения между УЭПР высохших эфемеров и тростника ($-18...-19$ дБ в согласованных поляризациях и $-24...-25$ – в перекрёстных). Большой разрыв наблюдается со значениями УЭПР эфемеров в перекрёстных поляризациях из-за значительного возрастания вклада объёмного рассеяния (известно, что растительность деполяризует сигнал, в результате чего в перекрёстных поляризациях она имеет достаточно высокую интенсивность рассеяния по сравнению с окружающим фоном [Кронберг, 1988; Родионова, 2015]).

Распаханная почва в согласованных поляризациях имеет значения УЭПР, близкие к УЭПР кустарниковой растительности (около -13 дБ), что связано, вероятно, с высокой шероховатостью. В соответствии с критерием Рэлея, гладкой по отношению к радиоволне (и вследствие этого имеющей низкие значения УЭПР) считается поверхность, высота неровностей которой $h < \lambda / (8 \cos \theta)$, где λ – длина зондирующей волны, θ – угол падения излучения [Woodhouse, 2005]. Для используемых в работе снимков Radarsat-2 ($\lambda = 5,6$ см, $\theta = 47,6-48,7^\circ$) такими

поверхностями можно считать участки с размером неровностей <1 см. Размер комьев распаханной почвы составляет 5-10 см, т.е. предположение о сильном влиянии шероховатости подтверждается. В перекрёстных поляризациях УЭПР распаханной почвы ниже, чем у кустарников и тростника (-22...-23 дБ), из-за не столь высокого вклада объёмного рассеяния.

Участок, заросший тростником обыкновенным (высота вегетирующих частей до 2 м, засохших метёлок - до 3 м, проективное покрытие - 100 %), во всех поляризационных каналах характеризуется значениями УЭПР большими, чем у верблюжьей колючки, но меньшими, чем у кустарников, что связано с промежуточным запасом фитомассы. В согласованных поляризациях УЭПР тростника несколько ниже, чем у распаханной почвы (около -15 дБ), что связано с меньшим вкладом поверхностного рассеяния, а в перекрёстных, напротив, выше (-21 дБ) из-за большего вклада объёмного рассеяния.

Участки с кустарником лохом узколистным (высота до 4 м) характеризуются значениями УЭПР большими, чем у травянистой растительности, и меньшими, чем у древесной, во всех поляризациях (в согласованных – -13...-14 дБ, в перекрёстных – -19...-20 дБ), что, как и в предыдущем случае, объясняется промежуточным запасом фитомассы. Несмотря на сходные значения с УЭПР распаханной почвы в согласованных поляризациях, значительная разница наблюдается в кросс-поляризациях за счёт большего вклада объёмного рассеяния у кустарников.

Среди растительного покрова наибольшим коэффициентом обратного рассеяния характеризуется древесная растительность, поскольку она имеет самый высокий запас фитомассы, приводящий к закономерному возрастанию УЭПР [Верба и др., 2010]. Так, посадки ясеня пенсильванского (высота 10-20 м, сомкнутость крон до 100 %) имеют УЭПР около -9...-11 дБ в согласованных поляризациях и около -16...-17 дБ – в перекрёстных.

Во всех поляризациях самые высокие значения УЭПР свойственны населённым пунктам (-6...-8 дБ в согласованных и -14...-15 дБ в перекрёстных), что объясняется высоким вкладом двукратного рассеяния, образующегося

благодаря сочетанию вертикально и горизонтально ориентированных объектов, способствующему возвращению сигнала в сторону радиолокатора.

Проведённый анализ значений коэффициента обратного рассеяния на участке дельты Волги показал, что прослеживается связь УЭПР с высотой, проективным покрытием растений, запасом фитомассы, с шероховатостью почвы. Как правило, при их возрастании увеличиваются и значения УЭПР. Использование данных в одной поляризации не всегда позволяет однозначно разделять объекты (в согласованных поляризациях почти не различается УЭПР кустарников и распаханной почвы, в перекрёстных – сухих эфемеров и поверхности воды). Использование же нескольких поляризаций одновременно позволяет уверенно разделять эти объекты. Наличие разновременных снимков позволяет однозначно разделять стабильные и изменяющиеся объекты.

Таким образом, имеющиеся разновременные поляриметрические данные Radarsat-2 могут быть использованы по двум направлениям: 1) дифференциация разных видов использования земель в 2014 году и 2) оценка состояния неиспользуемых сельскохозяйственных земель, преимущественно, выявление участков зарастания древесно-кустарниковой растительностью и наиболее подверженных опустыниванию.

2.4.2. УЭПР объектов острова Котельный на радиолокационных изображениях Sentinel-1A

В результате сопоставления цветосинтезированных многополяризационных радиолокационных изображений, преобразованных в соответствии со схемой на рисунке 2.10-б, с пространственно-координированными дополнительными источниками выбран ряд ключевых участков, представляющих основные типы поверхности острова, характеризующиеся различиями в рельефе, растительном покрове и грунтах. Положение ключевых участков показано на рисунке 2.16. В пределах этих участков выделены элементарные площадки, для которых рассчитывались средние значения УЭПР. Расположение элементарных площадок в пределах ключевых участков показано на рисунке 2.17, а их описание, составленное на основе топографической и геологической карты,

геоморфологических схем и схемы геоботанического районирования, приведено в подрисуночной подписи. На рис. 2.18 приведены графики изменения УЭПР этих десяти площадок в двух поляризациях за двухлетний период.

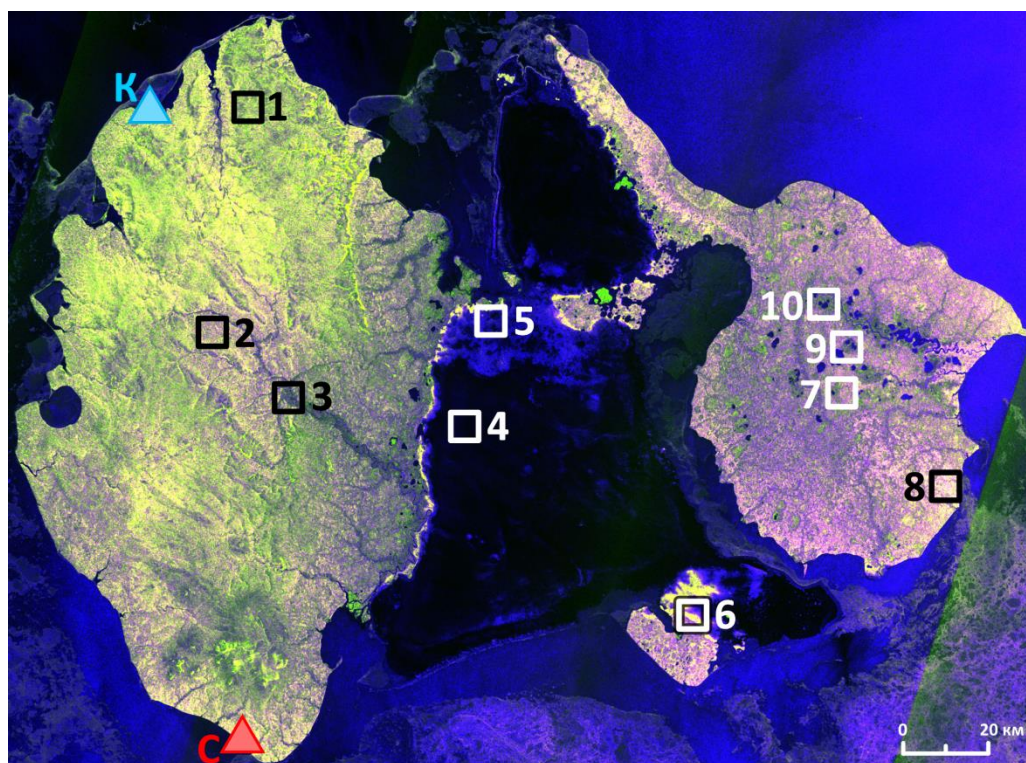


Рис. 2.16. Положение ключевых участков на производном многополяризационном радиолокационном изображении Sentinel-1A, 15.07.2015 (R - ГГ, G - ГВ, В – ГГ/ГВ). Треугольниками показано положение метеостанций «Остров Котельный» (К) и «Пролив Санникова» (С)

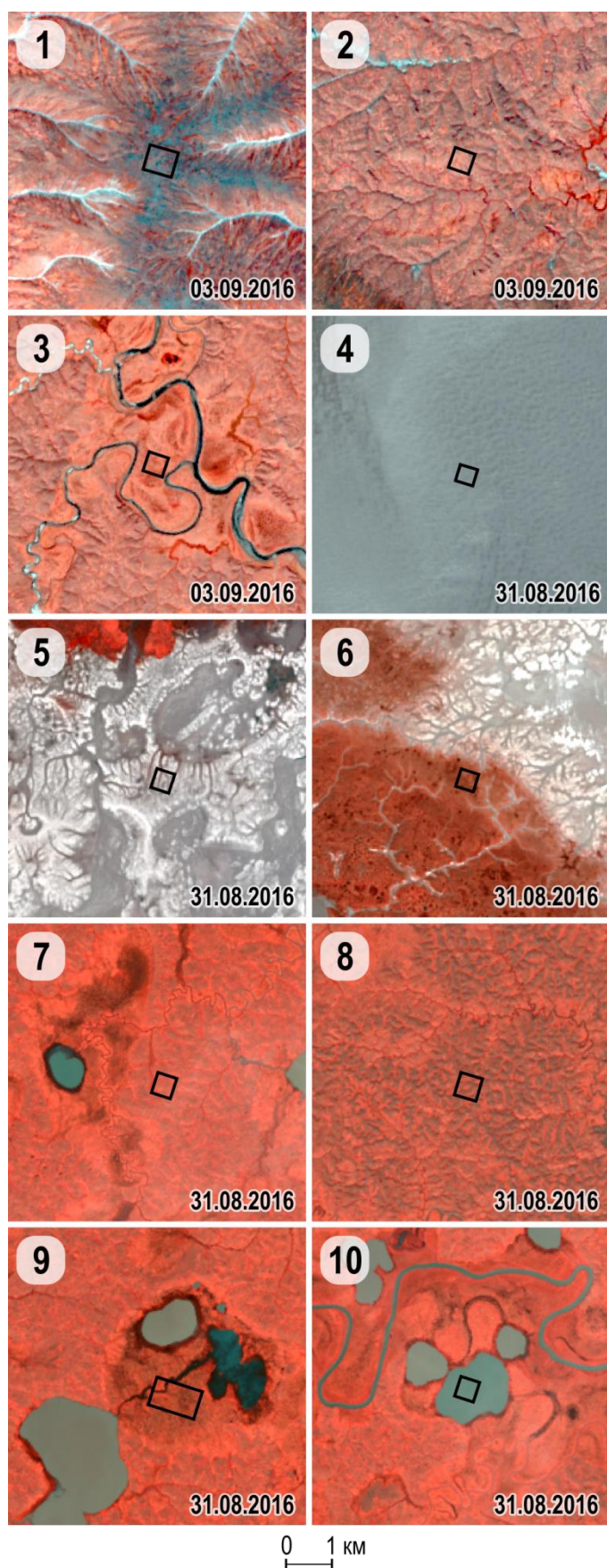


Рис. 2.17. Положение элементарных площадок (чёрные прямоугольники) для расчета средних значений УЭПР на снимках Landsat-8/OLI, цветовой синтез каналов R – 0,85–0,88, G – 0,64–0,67, B – 0,53–0,59 мкм:

- 1 – слабо расчленённая платообразная возвышенная равнина с растительностью горных арктических пустынь;
- 2 – низменная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, с тундровой растительностью (остров Котельный);
- 3 – речная долина с болотной растительностью;
- 4 – плоская, местами слабоволнистая первая морская терраса с сильно разреженной растительностью песчаных арктических пустынь;
- 5 – вторая морская терраса с преимущественно эрозионным расчленением и разреженной растительностью песчаных полярных пустынь;
- 6 – вторая морская терраса с преимущественно эрозионным расчленением и тундровой растительностью;
- 7 – низменная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, с тундровой растительностью (остров Фаддеевский);
- 8 – низменная равнина с высокой степенью эрозионного расчленения и тундровой растительностью;
- 9 – плоское днище термокарстовой котловины (аласа) с болотной растительностью;
- 10 – озеро

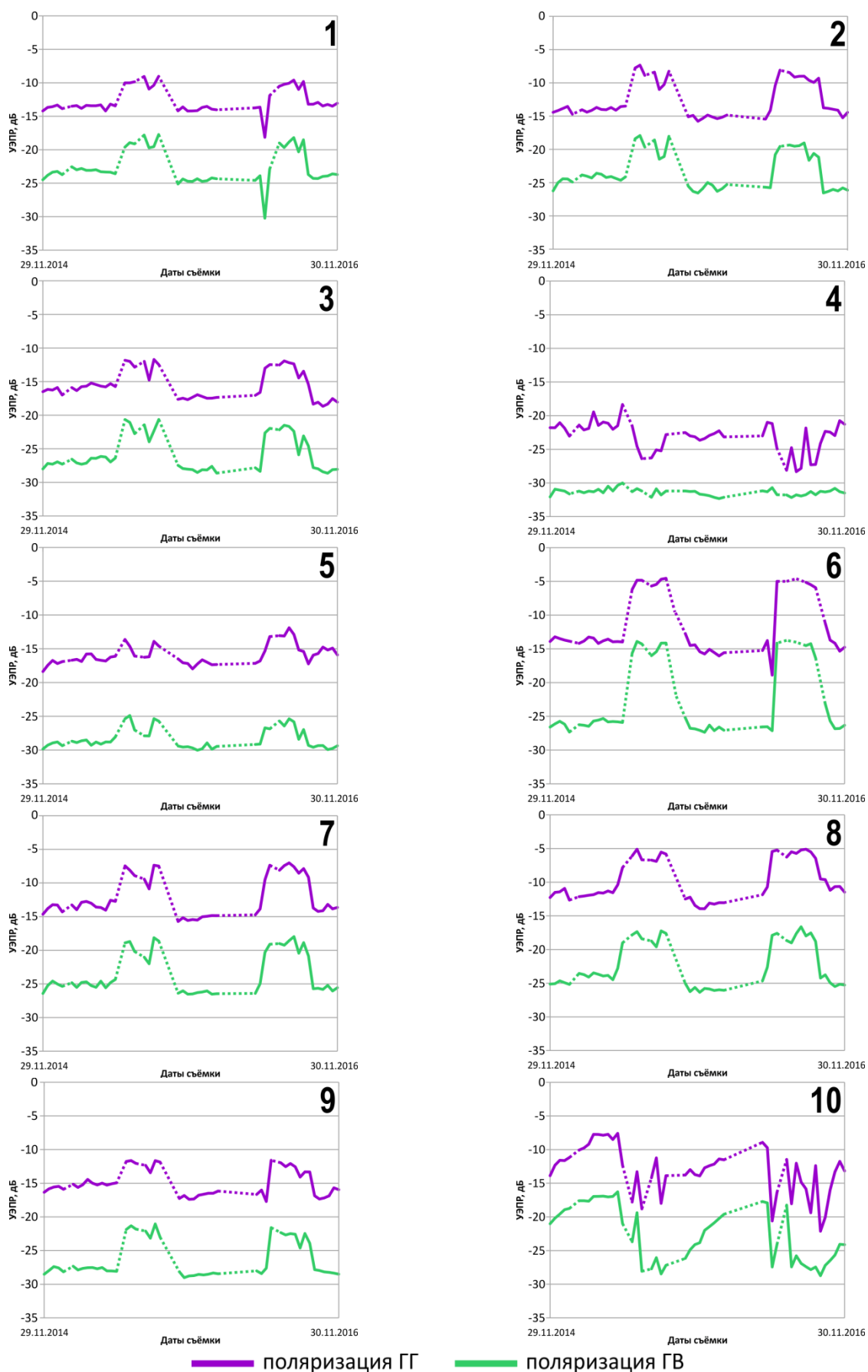


Рис. 2.18. Графики изменения УЭПР элементарных площадок (пунктир – отсутствие материалов съёмки)

В целом, вид графиков временного хода УЭПР в ГВ поляризации во многом повторяет вид таких графиков в ГГ поляризации, но с более низкими значениями; при этом для участка 4 в ГВ поляризации практически не наблюдается вариаций значений УЭПР, поскольку они численно ниже порога радиометрической чувствительности системы. В связи с этим ниже рассмотрены значения УЭПР на примере ГГ поляризации.

На рисунке 2.19 приведены согласованные графики изменения УЭПР элементарных площадок, сформированные по 49 съёмкам в согласованной горизонтальной поляризации (вверху), и хода среднесуточных температур воздуха на метеостанциях «Остров Котельный» и «Пролив Санникова» за тот же двухлетний период (внизу).

Дополнительно в отдельные сроки 2016 г. для элементарных площадок рассчитаны значения вегетационного индекса NDVI, который позволяет охарактеризовать степень развития растительного покрова. Для этого использовались снимки Landsat-8/OLI, прошедшие этап радиометрической калибровки. Максимальных значений индекс достигает для участков 2, 3 и 7 во второй половине июля-начале августа ($\sim 0,5$), несколько ниже ($\sim 0,4$) – на участке 9 в тот же период и около 0,2-0,3 для участков 6 и 8. При этом эти значения очень слабо меняются за относительно бесснежный период (от конца июня к началу сентября), что свидетельствует о незначительном изменении состояния растительного покрова. Участки 1, 4 и 5 практически не имеют растительного покрова (значения NDVI не превышают 0,1).

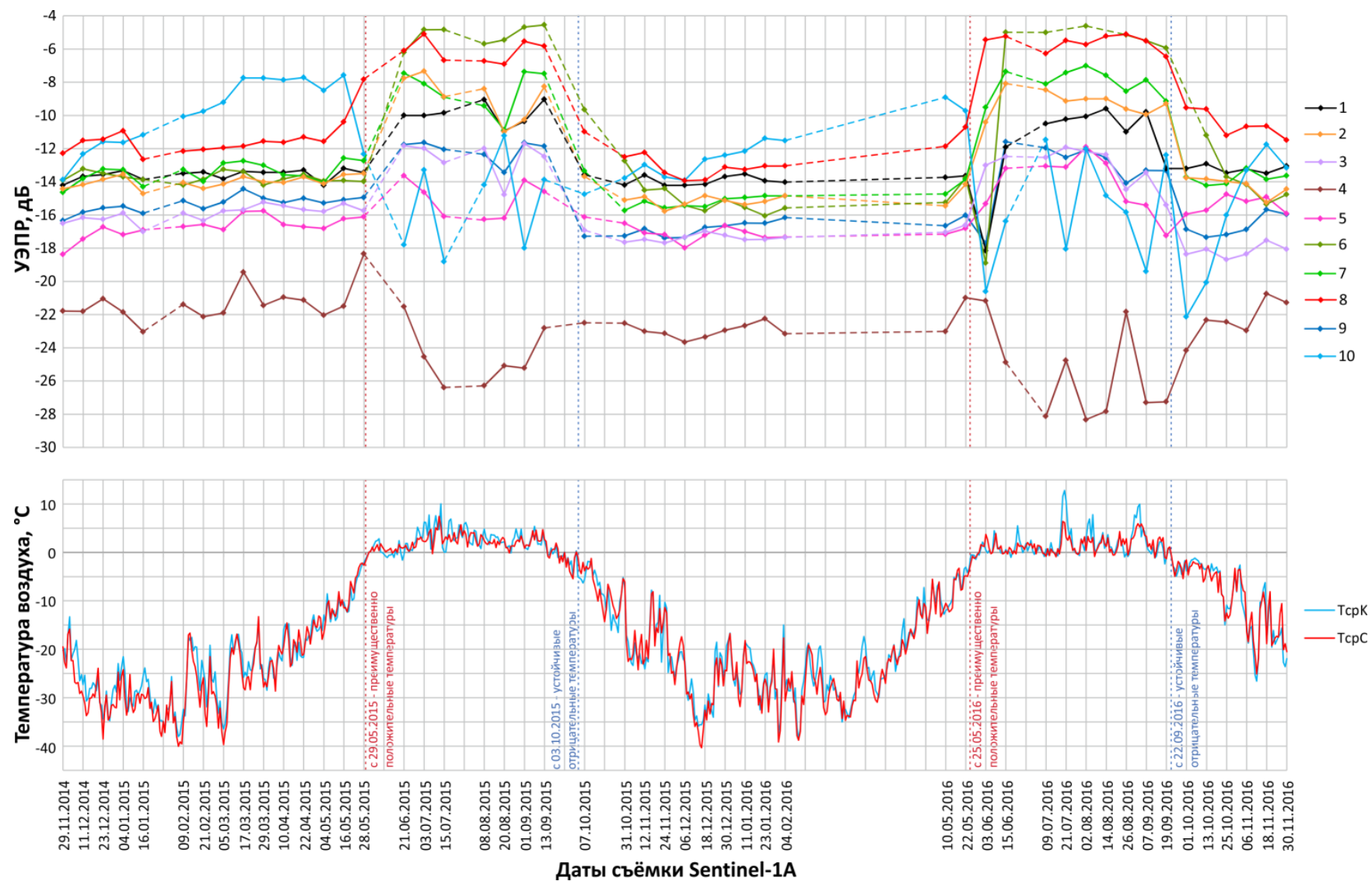


Рис. 2.19. Графики: а – изменения УЭПР в ГТ поляризации для элементарных площадок (пунктир – отсутствие материалов съёмки), б – среднесуточных температур по данным метеостанций «Остров Котельный» (ТсрК) и «Пролив Санникова» (ТсрС)

Приведенные на рис. 2.19 согласованные графики изменения температуры воздуха и значений коэффициента обратного рассеяния в первую очередь демонстрируют четко выраженные различия «теплого» и «холодного» периодов, которые проявляются как в ходе среднесуточных температур, так и в ходе значений коэффициента обратного рассеяния: для большей части выбранных элементарных площадок в период с устойчивыми отрицательными температурами (октябрь-май) характерны низкие (относительно летних) значения УЭПР, а в период с преимущественно положительными температурами (июнь-сентябрь) – высокие; исключение составляют участок песчаной арктической пустыни (4) и озеро (10). Такой ход УЭПР большинства участков объясняется в основном сменой диэлектрических свойств зондируемой поверхности: низкие значения диэлектрической проницаемости свойственны зимнему периоду, который сопровождается промерзанием сезонно-талого слоя, а более высокие – летнему периоду, в течение которого происходит протаивание сезонно-талого слоя. Причем можно отметить, что в зимний период состояние местности, характеризующее значениями обратного рассеяния, в целом является более однородным: каждой площадке свойственен небольшой разброс значений УЭПР, а графики разных площадок располагаются близко друг к другу. В летний же период, напротив, наблюдаются *большие* вариации значений УЭПР для каждой площадки и намного больший разброс значений в целом (кривые значительно отстоят друг от друга).

Несмотря на общее сходство, характер кривых четко различается для выбранных типичных ландшафтов, особенно в летний период. Рассмотрим подробнее основные различия в общей интенсивности обратного рассеяния от участков (порядок соответствует нарастанию среднего значения УЭПР) и характере её сезонного поведения для разных типов поверхности, которые в некоторой степени позволяют выделить влияющие на УЭПР факторы.

Самые низкие значения УЭПР (ниже -18 дБ) в течение всего исследуемого периода наблюдались для участка 4, расположенного в пределах песчаной арктической пустыни Земли Бунге, что хорошо согласуется с известной из

литературы низкой диэлектрической проницаемостью сухих песчаных отложений и их способностью пропускать радиоволну в глубину до встречи с объектом с иными диэлектрическими свойствами (Woodhouse, 2005). Постепенное снижение значений УЭПР в теплый период относительно морозного обусловлено, вероятно, просыханием песков с поверхности, а скачкообразный характер графика этого участка в летний период 2016 г. может быть обусловлен намоканием песков (более высокие значения УЭПР) вследствие выпадения осадков и последующим просыханием (более низкие). Например, резкое повышение значений УЭПР 26.08.2016 предположительно объясняется сильным намоканием: на метеостанции «Остров Котельный» отмечено выпадение снега, а на метеостанции «Пролив Санникова» – ливни.

Участок 5, расположенный в пределах возвышенности Евсекю-Булгуннях, как и участок 4, практически полностью лишён растительного покрова. При этом свойственные ему значения УЭПР выше (в среднем на 5 дБ зимой и на 10 дБ летом), чем у участка песчаной пустыни, что обусловлено его более заметным эрозионным расчленением, которое увеличивает шероховатость поверхности и, как следствие, интенсивность обратного сигнала.

График изменения УЭПР участка 3 в долине реки Балыктах во многом схож по рисунку с графиком 5-го участка, однако имеет более высокие значения УЭПР, что, вероятно, обусловлено наличием выраженного растительного покрова (эта элементарная площадка имеет одни из самых высоких значений NDVI: до 0,49 в начале августа). Однако несмотря на наличие достаточно обильной растительности, значения УЭПР не слишком высоки (не более -12...-15 дБ летом). Вероятно, относительно невысокий уровень обратного рассеяния связан с тем, что этот участок характеризуется плоским рельефом, что способствует доминированию однократного рассеяния сигнала от этой площадки. Существенный вклад может также вносить высокая заболоченность участка: понижение значений УЭПР обусловлено как наличием пятен открытой водной поверхности между вегетирующей растительностью, суммарно приводящих к снижению интенсивности обратного рассеяния в пикселе изображения, так и тем,

что относительно низкорослая растительность не препятствует прохождению радиоволны до гладкой поверхности воды, приводя к преобладанию однократного рассеяния.

Участок 9 в термокарстовой котловине в зимний период характеризуется значениями УЭПР в пределах -14...-17 дБ с последующим повышением летом до -11...-14 дБ, что связано с оттаиванием сезонно-талого слоя и развитием растительности. Стоит отметить, что для аласа характерна достаточно обильная растительность (вегетационный индекс достигает 0,43), однако низкие значения УЭПР, что можно объяснить плоским рельефом котловины и её заболоченностью, как и в случае с участком 3 в речной долине. Обращает на себя внимание выраженное падение УЭПР на 2-11 дБ 3 июня 2016 г. с последующим резким повышением на 4-14 дБ на площадках 1, 6, 9 и 10. По снимку Landsat-8/OLI на ту же дату определено, что на отдельных участках этой территории лежит снег (рис. 2.20). Из литературных источников (Woodhouse, 2005; Antonova et al., 2016) известно о понижающем УЭПР влиянии мокрого снега вследствие поглощения им радиоволн. Таким образом, можно объяснить понижение УЭПР 3 июня на этих четырех участках наличием именно мокрого (ввиду перехода температуры воздуха через 0°C в положительную сторону) снега.

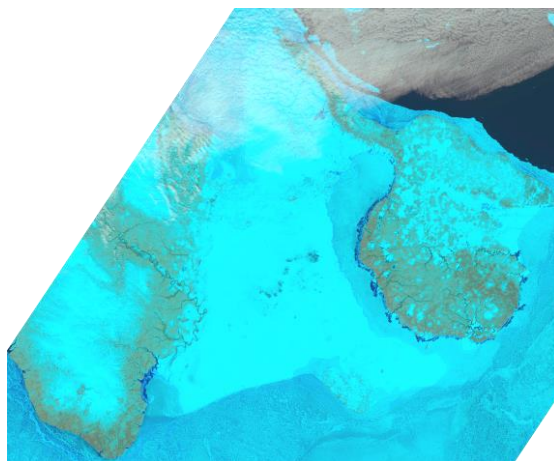


Рис. 2.20. Снимок Landsat-8/OLI от 03.06.2016

УЭПР на участке плато (1) в зимние периоды слабо изменяется в пределах -13...-14 дБ, а летом достигает -9...-11 дБ. Известно, что ввиду высотной поясности на плато находятся арктические пустыни с разреженной, угнетенной и бедной по видовому составу растительностью (Советская Арктика..., 1970).

Слабое развитие растительного покрова подтверждается значениями NDVI, не превышающими 0,14 за летний период 2016 г. Вероятно, что основной вклад в формирование обратного сигнала на участке плато вносит наличие скоплений грубых обломков горных пород, повышающих шероховатость поверхности.

Участки 2 (равнина на острове Котельном) и 7 (равнина на острове Фаддеевский) имеют сходный характер графиков изменения УЭПР при различиях в 1-2 дБ преимущественно во второй половине лета (значения 7-го участка выше). В целом, интенсивность обратного рассеяния этих участков в летний период изменяется в пределах -7...-11 дБ, а зимой – -13...-15 дБ. Относительно высокие значения УЭПР обоих участков определяются, главным образом, сильной расчленённостью рельефа и обилием растительного покрова (NDVI достигает 0,49 на участке 2 и 0,51 на участке 7), однако доступные дополнительные источники не позволяют однозначно объяснить различия между ними. Это могут быть такие факторы, как различия в микро- и нанорельефе в пределах площадок, в структуре растительного покрова, характере увлажнения. Несистематический характер различий не позволяет связать их с разными углами визирования при съёмке.

Участок возвышенности Земли Бунге (6) характеризуется одними из самых высоких летних значений УЭПР (-4...-6 дБ) и низкими зимними значениями (-13...-16 дБ). Наибольший вклад в обратное рассеяние сигнала здесь очевидно вносят неровности рельефа и растительный покров (однако NDVI этого участка относительно невысок – 0,26 в конце августа, что свидетельствует о меньшем, чем для некоторых других участков, влиянии на УЭПР растительности).

Одни из самых высоких значений УЭПР в течение всех сезонов характерны для участка 8 на юго-востоке острова Фаддеевского. На снимке Landsat-8/OLI (рис. 2.16-8) видно, что для этого участка характерна высокая степень эрозионного расчленения (выше, чем, например, на соседнем участке 7). Вероятно, что небольшие склоны, обращённые к радиолокатору, приводят к общему повышению УЭПР, в том числе и зимой (-10...-14 дБ). Высокие значения УЭПР могут быть связаны в т.ч. с наличием множества микроформ криогенного рельефа (байджарахов, которые видны на снимках в видимом диапазоне

сверхвысокого пространственного разрешения, рис. 2.21), повышающих шероховатость поверхности этого участка. Возрастание интенсивности обратного рассеяния летом до $-5...-7$ дБ связано с развитием растительного покрова (NDVI достигает 0,35).



Рис. 2.21. Изображение площадки 8 на снимке сверхвысокого пространственного разрешения в видимом диапазоне (источник – Google Earth)

Существенно отличающийся от других тестовых объектов характер изменений УЭПР выявлен для участка 10 – озера на острове Фаддеевский. Летом этот участок характеризуется резкими перепадами УЭПР: размах значений достигает 9 дБ. Можно предположить, что низкие значения наблюдаются в период ветрового затишья (спокойная поверхность воды – гладкая, что приводит к зеркальному отражению радиоволн в сторону, противоположную радиолокатору), а высокие, напротив, в ветреный период (взволнованная водная поверхность - шероховатая). Зимой для поверхности выбранного озера наблюдается постепенный рост УЭПР: в зимние периоды 2014-2015 гг. и 2015-2016 гг. он составил приблизительно 6 дБ. Среди всех элементарных площадок этот участок характеризуется максимальными зимними значениями интенсивности обратного сигнала. Объяснение такого характера изменения УЭПР можно найти в работах [Atwood et al., 2015; Antonova et al., 2016], где описана следующая закономерность взаимодействия радиоволн со льдом пресных озёр: в период, когда лёд только устанавливается на поверхности озера, преобладает однократное отражение волн в сторону от радиолокатора. По мере возрастания

мощности плавучего льда происходит постепенное увеличение УЭПР и последующее достижение состояния насыщения, когда интенсивность обратного сигнала остаётся достаточно стабильной вплоть до наступления таяния льда (в нашем случае эта стадия хорошо заметна на графике: в период 17.03.2015–16.05.2015 г. наблюдаются устойчивые значения УЭПР на уровне -8 дБ). В результате взаимодействия радиоволны с толщей льда и находящимися в нем пузырьками воздуха (при их наличии), а также с шероховатой границей «плавающий лёд – незамёрзшая вода» волна возвращается в сторону радиолокатора. Такая картина наблюдается только в том случае, когда участок озера не промерзает до дна. В случае же полного промерзания озера (или его части) низкий контраст в диэлектрической проницаемости льда и мерзлого грунта приводит к слабому рассеянию волны на их границе. Хорошо выраженные различия значений УЭПР промерзающей прибрежной и непромерзающей центральной части озера иллюстрирует рис. 2.22. После полного промерзания прибрежной части исследуемого озера (после 16.01.2015 и 04.02.2016) возрастания УЭПР не происходит, а к концу зимы различия в значениях УЭПР прибрежной и центральной частей озера достигают 6 и 4 дБ (в 2015 и 2016 гг. соответственно).

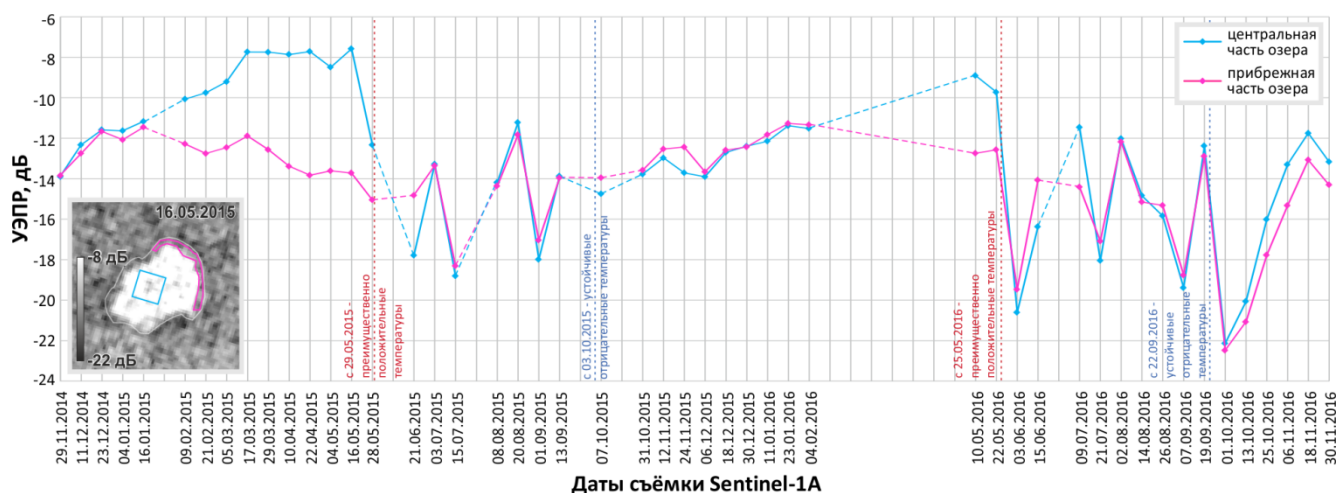


Рис. 2.22. Графики изменения УЭПР в ГГ поляризации для разных частей озера

При анализе значений УЭПР тестовых площадок можно было ожидать различий, связанных с их расположением в дальней и ближней зонах съёмки (площадки 1,2,3 и 7,8,9 соответственно), поскольку угол падения волн в пределах исследуемой территории меняется в пределах 28-43°. Как показал анализ

значений УЭПР вдоль линий, проведённых от дальней к ближней зоне, эти различия хорошо видны на участках открытой водной поверхности (на рис. 2.23-а), в то время как на участках суши в пределах исследуемой территории они выражены слабо (рис. 2.23-б). Кроме того, площадки 2 и 7, расположенные соответственно в дальней (угол падения волн $\sim 40,5^\circ$) и ближней ($\sim 30,3^\circ$) зонах в пределах сходных ландшафтов, имеют очень близкие графики сезонных изменений. Таким образом, в случае острова Котельный различия в значениях УЭПР, обусловленные особенностями местности, существенно превышают различия из-за влияния углов съёмки.

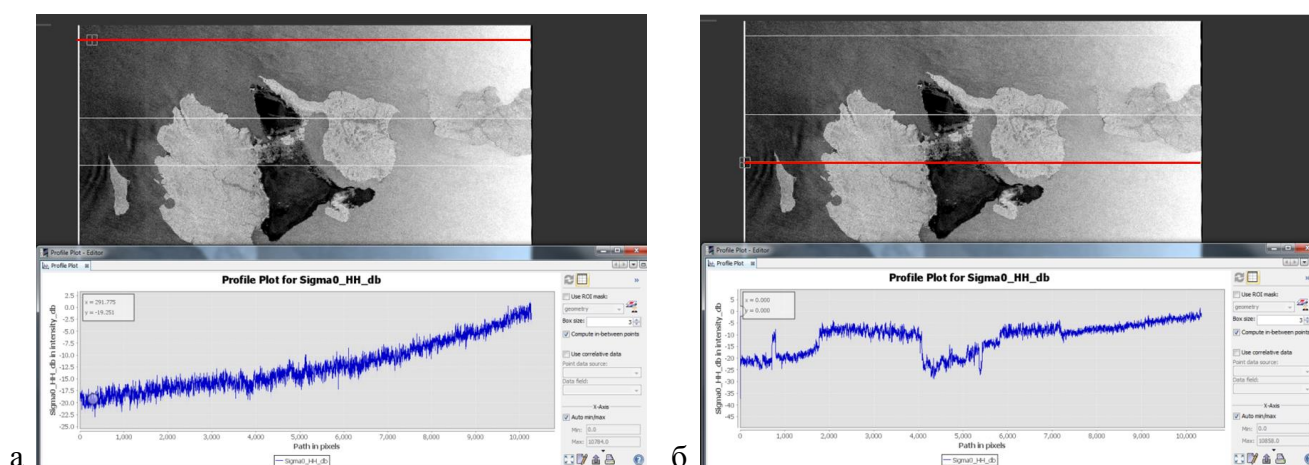


Рис. 2.23. Профили (красные линии на РЛИ Sentinel-1A, 13.09.2015 г., поляризация ГГ), проведённые от дальней к ближней зонам съёмки, и соответствующие им графики значений УЭПР: а – открытая морская поверхность, б – открытая морская поверхность в сочетании с участками суши

Таким образом, на характер обратного рассеяния и радиолокационное изображение острова Котельный влияет целый комплекс особенностей местности, которые в той или иной степени могут определить тематическое содержание карты: вид расчленения рельефа (эрозионное или термокарстовое) и его степень, тип растительности (тундровый, болотный, полярно-пустынный), степень увлажнения поверхности, характер рыхлых отложений на некоторых участках. Существенный вклад в обратный сигнал вносит состояние поверхности, обусловленное протаиванием и промерзанием сезонно-талого слоя. Наличие радиолокационных снимков, полученных в зимний период, позволяет разделять неглубокие озёра, промерзающие полностью, от глубоких, не промерзающих до дна.

2.5. Визуальное и автоматизированное дешифрирование для выделения контуров

В предыдущем параграфе мы рассмотрели, какие свойства местности проявляются на радиолокационных изображениях, на примере нескольких ключевых участков. Картографирование же предполагает распространение выявленных закономерностей на всю исследуемую территорию, для чего применяются принципы визуального и автоматизированного дешифрирования.

Принцип визуального дешифрирования сводится к выделению контуров на производных радиолокационных изображениях вручную на основе ряда дешифровочных признаков и соотнесению их с реальными объектами местности с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволн с поверхностью и дополнительные источники. Отметим, что интерпретация радиолокационных снимков, значительно отличающихся от снимков в оптическом диапазоне, представляется весьма сложной задачей ввиду малой изученности влияния свойств местности на зондирующий радиосигнал и отсутствия методик выделения конкретных объектов по РЛ изображениям.

Объективное выделение на преобразованных снимках объектов, схожих по интенсивности обратного рассеяния или характеру её изменений, может быть осуществлено с помощью известных методов автоматизированной классификации. Существенным преимуществом классификации является упрощение исходных радиолокационных изображений: совокупности пикселей, сгруппированные в отдельные классы, образующие компактные выделения, лучше поддаются интерпретации с опорой на дополнительные источники информации, чем исходное радиолокационное изображение, особенно многовременное, содержащее больше трёх каналов. К существенным недостаткам автоматизированных методов дешифрирования относится невозможность учёта косвенных признаков и информации, представленной в дополнительных источниках.

Рассмотрим применение разных способов дешифрирования на примере двух исследуемых территорий.

2.5.1. Оценка применимости автоматизированной классификации производных радиолокационных изображений для оценки состояния неиспользуемых сельскохозяйственных земель

Известно, что высокой чувствительностью к характеристикам растительного покрова обладают радиолокационные изображения, полученные в перекрёстных поляризациях (ГВ, ВГ), из-за эффекта деполяризации сигнала [Родионова, 2015], а также изображения, полученные в результате поляриметрических декомпозиций, которые характеризуют вклад объёмного рассеяния в суммарный обратный сигнал. На примере этих двух изображений, полученных по схемам на рисунках 2.9-б и 2.11 (изображения компоненты объёмного рассеяния, полученные по данным четырёх сроков, объединены в одно многоканальное изображение) соответственно, рассмотрим возможность автоматизированного дешифрирования (классификации) состояния неиспользуемых сельскохозяйственных земель. При этом проанализируем влияние разных способов предварительной обработки радиолокационных данных (фильтрации спекл-шума, поляриметрической декомпозиции) на результат дешифрирования. Напомним, что для предварительной обработки использовался специализированный программный комплекс SNAP, для классификации же будем использовать программу ENVI, в которой представлено большее разнообразие алгоритмов.

Чтобы ограничить дешифрирование участками залежей, использовалась векторная маска, составленная на основе топографических карт, снимков Landsat и Radarsat-2. Основной подход к оценке достоверности классификации - составление матрицы ошибок, показывающей долю правильно распознанных пикселей относительно некоторого эталона, в качестве которого может использоваться базовая карта или набор точек. В нашем случае в качестве эталонов будем использовать точки, обследованные в ходе наземных работ на местности, а также отобранные на основе детальных снимков в оптическом диапазоне (источник – Google Earth).

Сравнение изображений в перекрёстной поляризации и компоненты объёмного рассеяния как источников для классификации. Вначале оба вида

изображений (многовременное РЛИ в перекрёстной поляризации и многовременное изображение, составленное из компонент объемно рассеяния, полученных в результате поляриметрической декомпозиции) оценивались на предмет эффективности разделения участков практически открытой почвы с высохшими эфемерами и участков с вегетирующей растительностью. Для этого проводилась неконтролируемая классификация (кластеризация) по методу k-means с выделением двух классов. Полученные результаты показали, что при использовании изображения в перекрёстной поляризации на достоверность кластеризации большое влияние оказывает предварительная фильтрация, а именно, вид фильтра и размер скользящего окна (рис. 2.24).

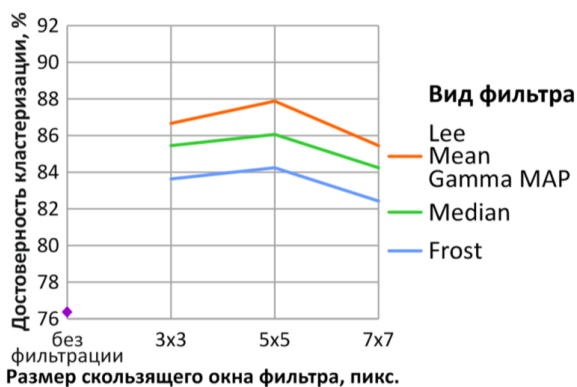


Рис. 2.24. Достоверность кластеризации изображения в кросс-поляризации в зависимости от вида фильтра и размера скользящего окна

Из рисунка 2.24 видно, что при использовании исходного изображения с высоким уровнем спекл-шума достоверность достигает 76,4% (коэффициент каппа=0,51), фильтрация же позволяет существенно её повысить. При этом более низкая достоверность характерна для изображений, прошедших фильтрацию по алгоритму Frost, далее следует фильтр Median, одинаково высокая достоверность получена при использовании фильтров Mean, Lee и Gamma MAP. Определённый вклад в достоверность кластеризации вносит размер скользящего окна фильтра: самые высокие значения наблюдаются для изображений, прошедших фильтрацию при размере окна 5x5 пикселей, несколько меньшие – 3x3 и самые низкие – 7x7. Таким образом, максимальная достоверность получена при следующих параметрах обработки исходных изображений: фильтры Mean, Lee и Gamma MAP с окном 5x5 пикселей. Во всех случаях она составила 87,9% (каппа=0,74).

На основе разновременных комплексных поляриметрических данных, предварительно прошедших поляриметрическую фильтрацию спекл-шума (фильтр VoxCar, размер окна 3x3, 5x5, 7x7 пикселей), были получены результаты декомпозиций Pauli, vanZyl, Freeman-Durden и Yamaguchi. Кластеризация изображения, составленного из компонент объёмного рассеяния, показала, что на достоверность её результата влияние оказывают как параметры фильтрации, так и алгоритмы декомпозиций, причём это влияние неоднозначно (рис. 2.25).

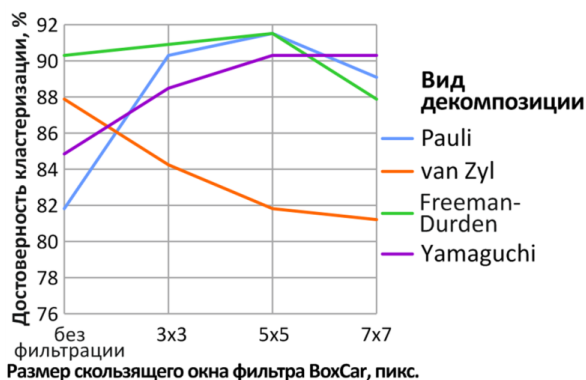


Рис. 2.25. Достоверность кластеризации изображения, составленного из компонент объёмного рассеяния, в зависимости от размера окна фильтра и алгоритма поляриметрической декомпозиции

В случае декомпозиции van Zyl увеличение размера скользящего окна фильтра привело к постепенному снижению достоверности от 87,9% (каппа=0,74) (без предварительной фильтрации) до 81,2% (0,62) (размер окна фильтра 7x7 пикселей). Для декомпозиции Pauli характерен резкий рост достоверности с 81,8% (0,62) (без фильтрации) до 90,3% (0,79) (размер окна 3x3 пикселя), затем незначительный рост до 91,5% (0,82) (5x5 пикселей) и последующее её падение до 89,1% (0,77) при размере окна 7x7 пикселей. В случае декомпозиции Yamaguchi наблюдается постепенный рост достоверности с 84,8% (0,68) (без фильтрации) до 90,3% (0,79) при размере окна 5x5 пикселей и дальнейшая ее стабилизация. Для декомпозиции Freeman-Durden наблюдается незначительный рост достоверности с 90,3% (0,79) (без фильтра) до 91,5% (0,82) (окно 5x5) и последующее её ухудшение до 87,9% (0,74) при размере окна 7x7 пикселей. Таким образом, наибольшая достоверность кластеризации, 91,5% (каппа 0,82), получена при использовании фильтра с размером окна 5x5 пикселей и декомпозиций Pauli и Freeman-Durden.

В целом, использование изображений, характеризующих интенсивность объёмного рассеяния (результатов поляриметрических декомпозиций), позволило получить более высокую достоверность кластеризации по сравнению с изображениями в перекрёстной поляризации. Важно отметить, что существенно бóльшая достоверность классификации была достигнута при использовании значений коэффициента обратного рассеяния, выраженного в децибелах, а не в безразмерных единицах (таблица 2.5).

Таблица 2.5

Достоверность классификации в зависимости от использования σ_0 , σ_{vol} и σ_{0dB} ,

Классифицируемое изображение	σ_{vol} dB	
	Безразмерные значения коэффициента обратного рассеяния	Коэффициент обратного рассеяния выражен в дБ
Перекрёстная поляризация, фильтр Gamma MAP, окно 5x5 пикселей (σ_0)	62,5% (каппа=0,38)	87,9% (каппа=0,74).
Компонента объёмного рассеяния, декомпозиция Freeman-Durden, поляриметрический фильтр BoxCar, окно 5x5 пикселей (σ_{vol})	64,8% (каппа=0,37)	91,5% (каппа=0,82)

Выбор оптимального количества классов для автоматизированного дешифрирования состояния залежей. Выбор оптимального количества классов для оценки состояния залежей основывался на кластеризации изображения, характеризующего интенсивность объёмного рассеяния (при обработке использовались следующие параметры: поляриметрическая фильтрация BoxCar, окно 5x5 пикселей, декомпозиция Freeman-Durden, пересчёт в дБ). Результаты кластеризации при разном количестве классов приведены на рисунке 2.26.

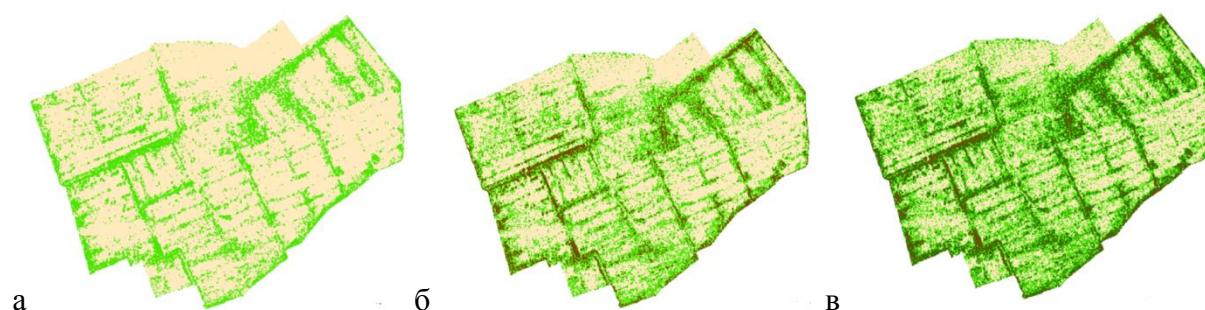
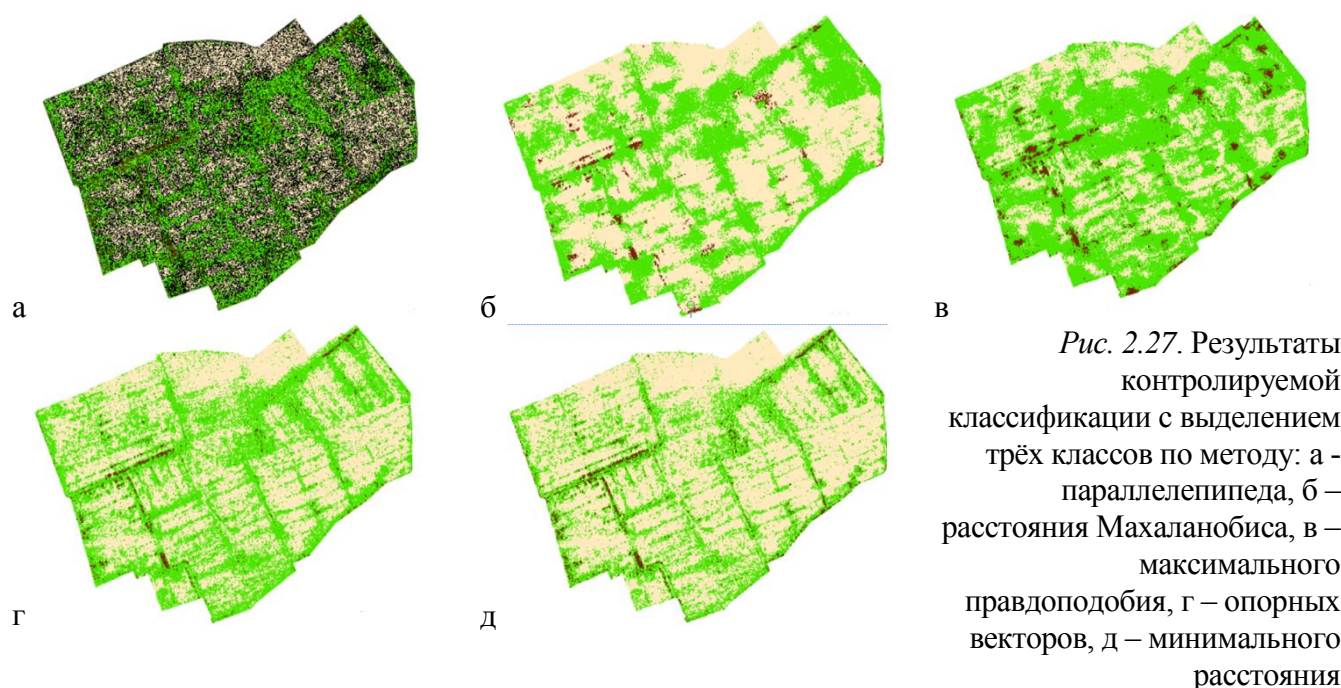


Рис. 2.26. Кластеризация изображения, составленного из компонент объёмного рассеяния, при разном количестве классов: а – 2, б – 3, в – 4

Применение двух классов позволяет разделить участки практически

открытой почвы от участков с вегетирующей растительностью (рис. 2.26-а). При выборе трех классов растительность дифференцируется на вегетирующую травянистую и древесно-кустарниковую (рис. 2.26-б). При дальнейшем увеличении числа классов (рис. 2.26-в) к образуемым новым классам, которые можно соотнести с травянистой растительностью, относится завышенное число пикселей, что не соответствует действительности. Получаемые классы могут быть связаны с различиями в запасе фитомассы, но не с типами растительности. Таким образом, оптимальной представляется классификация залежей с выделением трёх классов: 1) практически открытая почва с высохшими эфемерами, 2) вегетирующая травянистая растительность, 3) древесно-кустарниковая растительность.

Выбор алгоритма контролируемой классификации для оценки состояния залежей. Для выбора оптимального алгоритма контролируемой классификации использовались результаты поляриметрической декомпозиции Freeman-Durden, обеспечившие максимальную достоверность при кластеризации с выделением двух классов. Полученные с использованием разных алгоритмов результаты контролируемой классификации приведены на рисунке 2.27.



Для классификации по методу параллелепипеда характерно большое количество неклассифицированных пикселей, методы расстояния Махаланобиса и максимального правдоподобия, наиболее часто применяемые при обработке данных

в оптическом диапазоне, в нашем случае дали недостоверные результаты. Наибольшая достоверность получена при использовании метода опорных векторов (73,9%, каппа=0,61) и минимального расстояния (75,2%, каппа=0,63). Сопоставление результатов классификации по методу минимального расстояния с эталонами посредством построения матрицы ошибок показало, что распознанными с большей степенью достоверности оказались участки открытой почвы (доля правильно распознанных пикселей этого класса от общего числа проверяемых пикселей – 84%), несколько хуже (82%) – участки зарастания травянистой растительностью. С достоверностью 60% распознаны участки произрастания древесно-кустарниковой растительности, причём основная часть возникших ошибок связана с неверным отнесением пикселей к классу травянистой растительности (а не открытой почвы). На рисунке 2.28 показан результат классификации по методу минимального расстояния всех залежей исследуемого участка.



Рис. 2.28. Результат контролируемой классификация залежей (1 – практически открытая почва с высохшими эфемерами, 2 – вегетирующая травянистая растительность, 3 – древесно-кустарниковая растительность)

Полученный результат предполагается использовать для составления итоговой карты сельскохозяйственных угодий в дельте Волги.

2.5.2. Исследование возможностей дешифрирования производных радиолокационных изображений для выделения природно-территориальных комплексов острова Котельный

Рассмотрим особенности изображения острова Котельный на многополяризационном РЛ изображении, полученном в летний период и преобразованном в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.10-б (рис. 2.29).

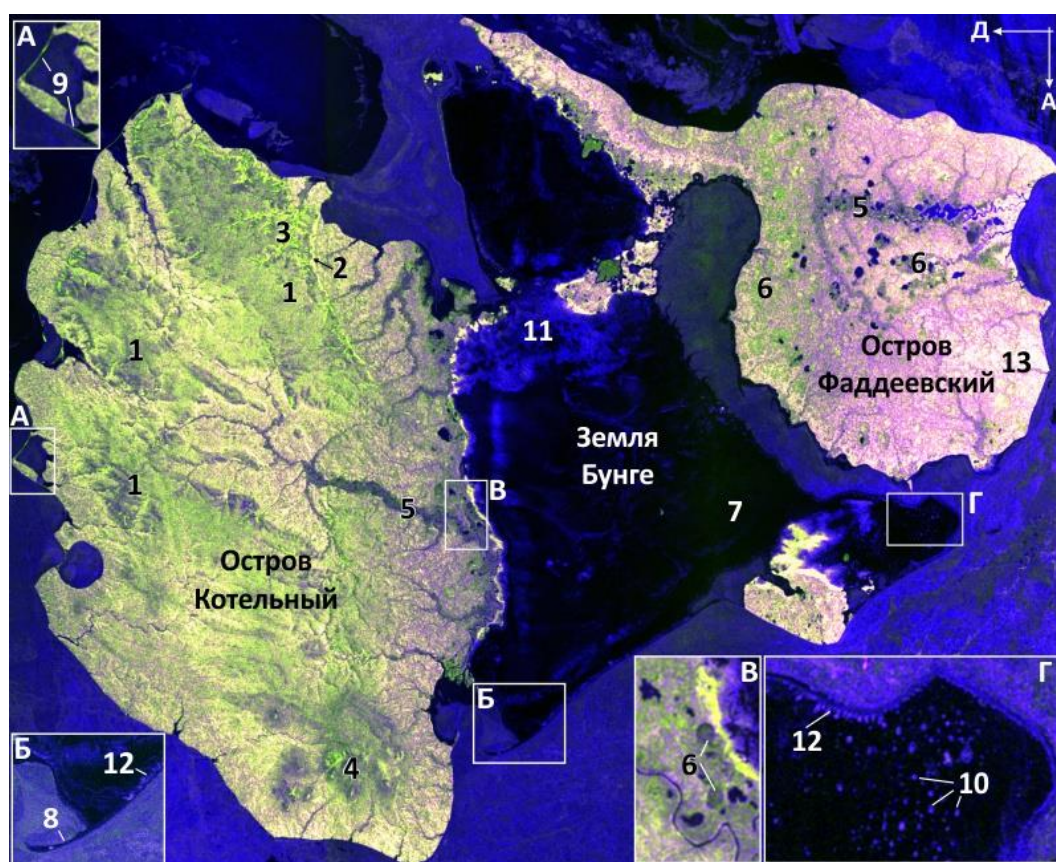


Рис. 2.29. Многополяризационное РЛИ Sentinel-1A, 3 июля 2015 г.: R - ГГ, G - ГВ, В – ГГ/ГВ. Стрелками показаны направления полёта космического аппарата (азимут, А) и направление визирования (дальность, Д). Объяснения к цифрам даны в тексте

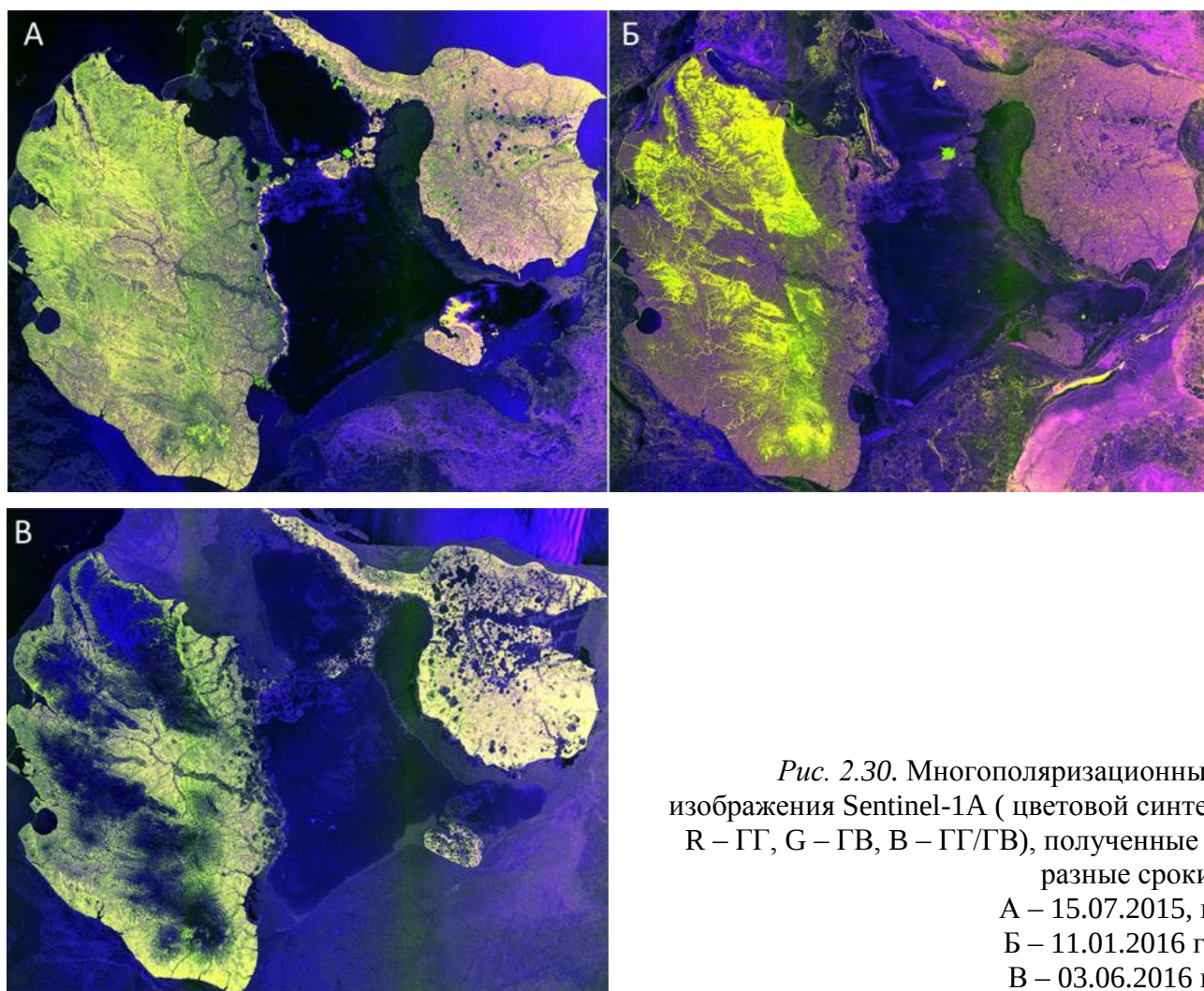
На рисунке 2.29 три части острова сильно различаются: более высокие и разнообразные по рельефу острова Фаддеевский и Котельный имеют высокую яркость и изображаются разнообразными цветами. Представляющая собой ровную песчаную поверхность Земля Бунге, расположенная в центре, слабо отличается от свободной ото льда морской поверхности, что свидетельствует о ее значительной

однородности. Ярким синим цветом изображена покрытая льдом акватория моря.

Для западной части – острова Котельный – характерен наиболее разнообразный рельеф. Известно [Советская Арктика..., 1970], что внутренняя его часть представлена возвышенным плато (цифра 1 на рис. 2.29). На северо-востоке плато имеет резкий уступ, хорошо заметный в виде ярко-жёлтой полосы (2), повышение яркости обусловлено рассеянием большей части радиосигнала склонами, обращенными в сторону радиолокатора. Благодаря этой же особенности радиолокационной съёмки в отдельных случаях распознаются участки плато с сильным эрозионным расчленением (3) и отдельные вершины столообразных гор (4), расположенные в южной части острова. Восточная часть представляет собой низменную равнину с многочисленными хорошо различимыми по темному тону речными долинами (5) (понижение обратного сигнала здесь связано, вероятно, с заболоченностью этих участков и относительно ровной поверхностью) и термокарстовыми котловинами, имеющими, как правило, округлую форму (6). Земля Бунге – практически ровная песчаная поверхность без растительности – на большей части изображения имеет почти чёрный цвет (7) из-за одинаково слабого обратного сигнала в обеих поляризациях и низкой яркости на изображении в синем канале из-за близких к единице значений отношения ГГ/ГВ. Таким же тёмным тоном на фоне морского льда изображаются узкие песчаные косы (8). Галечные же косы (9), осложняющие западный берег острова Котельный, за счёт большей шероховатости имеют высокую яркость на изображении. На фоне песчаной пустыни чётко выделяются районы со множеством золотых холмов (10), возвышенность Евсекю-Булгуннях (11), изрезанные термоабразионные берега (12), поскольку поверхности с большей степенью расчленения дают несколько повышенный обратный сигнал. Синий цвет этих участков на синтезированном изображении объясняется их повышенной яркостью на изображении ГГ/ГВ, где усилено влияние компоненты согласованной поляризации ГГ. Остров Фаддеевский – равнина с большим количеством речных долин (5) и термокарстовых котловин (6), в юго-восточной части которой находится участок с очень высокой степенью эрозионного расчленения (13), имеющий благодаря этому высокую яркость на

изображении. Отметим, что определённый вклад в обратное рассеяние сигнала и, соответственно, яркость изображения вносит и растительный покров, присутствующий в основном на островах Котельный и Фаддеевский, а также на отдельных участках Земли Бунге (восточнее возвышенности Евсекю-Булгуннях и на юго-востоке, в районе возвышенности Земли Бунге).

Приведённый в параграфе 2.3 анализ интенсивности обратного рассеяния участков острова Котельный на разновременных снимках Sentinel-1A показал её сильную сезонную изменчивость, в связи с чем для дешифрирования целесообразно не ограничиваться только лишь снимками летнего периода. Рассмотрим некоторые отличительные особенности изображений, характеризующих зимнее и ранневесеннее состояние острова (после перехода температуры воздуха через 0° С) (рис. 2.30).



*Рис. 2.30. Многополяризационные изображения Sentinel-1A (цветовой синтез R – ГГ, G – ГВ, B – ГГ/ГВ), полученные в разные сроки:
А – 15.07.2015, г.
Б – 11.01.2016 г.,
В – 03.06.2016 г.*

На РЛИ зимнего периода (11.01.2016) одними из наиболее отчётливо выделяющихся объектов являются плато в центральной части и низкие горы на юге острова Котельный (изображаются жёлтым цветом), границы которых гораздо хуже различимы на летнем снимке. Части озёр, имеющие высокую яркость на зимнем снимке, на местности соответствуют не промёрзшим до дна участкам, в то время как полностью промёрзшие части озёр на РЛ изображении имеют низкую яркость (объяснение - в конце параграфа 2.4.2. Столь же уверенно плато и низкогорье выделяются (синий цвет) по РЛИ, полученному в начале июня (во время недавно установившихся положительных температур) из-за наличия мокрого снега. По этой же причине выделяются термокарстовые котловины и другие понижения со скоплениями мокрого снега.

*Автоматизированная обработка снимков Sentinel-1A для выделения границ
природно-территориальных комплексов*

Рассмотрим возможность автоматизированного дешифрирования объектов на преобразованных снимках в пределах острова Котельный. В отличие от дешифрирования неоднородностей растительного покрова в пределах залежных земель, которое весьма успешно (с высокой достоверностью) выполняется автоматизированным путём, автоматизированное выделение контуров в пределах острова Котельный, соответствующих различным природно-территориальным комплексам, представляется весьма непростой задачей, поскольку границы между ними не всегда читаются однозначно.

Ввиду недостаточного априорного знания местности предпочтительным видится использование методов неконтролируемой классификации (кластеризации). При проведении кластеризации необходимо определить набор входных радиолокационных данных и количество выделяемых кластеров. Для автоматизированного выделения объектов, схожих по характеру обратного рассеяния, целесообразно использовать изображения, полученные в различных поляризациях, так как каждый объект имеет уникальное соотношение значений коэффициента обратного рассеяния в ГГ и ГВ поляризационных каналах. Однако особенности РЛ съемки со спутника Sentinel-1A в режиме TOPSAR накладывают

значительные ограничения на использование данных, полученных в перекрестной поляризации, из-за наличия сильно выраженных и плохо устранимых радиометрических искажений, проявляющихся в виде полос с повышенной яркостью, перпендикулярных направлению полёта космического аппарата (показаны голубыми стрелками на рис. 2.31-а) и направлению визирования (рис. 2.31-а, красные стрелки). Наиболее отчетливо эти искажения выражены на слабо рассеивающих сигнал поверхностях (участки морской поверхности, песчаные отложения). Эти искажения проявляются на результатах кластеризации многополяризационного изображения (рис. 2.31-б), отображая таким образом не особенности местности, а шумы съёмочной аппаратуры.

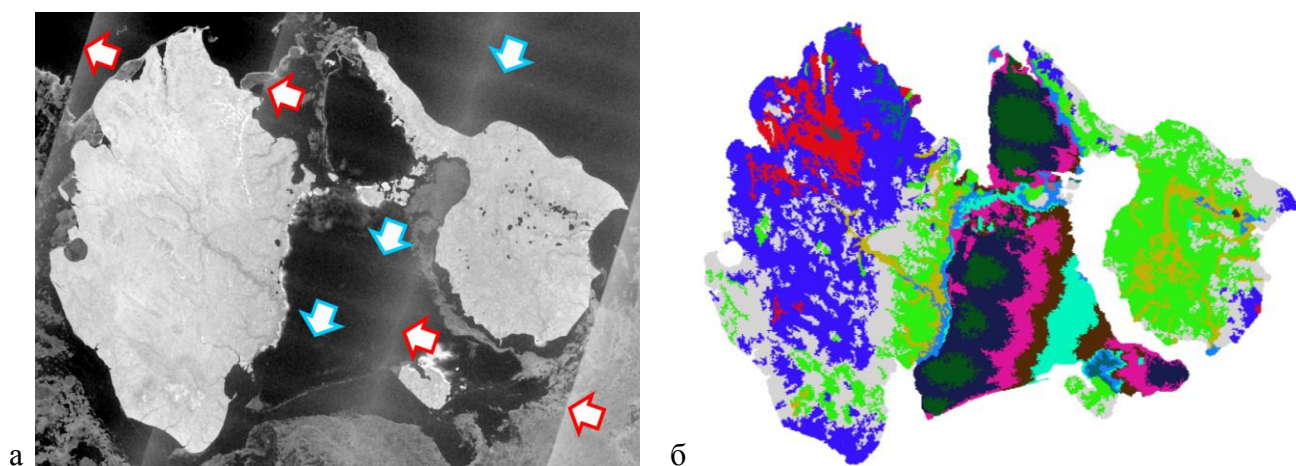


Рис. 2.31. Sentinel-1A, 15.07.2015: а - радиометрические искажения (показаны стрелками) на снимке, полученном в ГВ поляризации, б – результат кластеризации многополяризационного (ГГ и ГВ) РЛИ

Однако для проведения эффективного автоматизированного дешифрирования использование данных одной съемки в одной поляризации является недостаточным. Анализ УЭПР ключевых участков за двухлетний период (параграф 2.3) и разносезонных радиолокационных изображений (рис. 2.30) показал, что различные типы местности лучшим образом выделяются по снимкам, полученным в определенной части года. Таким образом, для автоматизированного дешифрирования целесообразно использовать несколько разносезонных снимков, объединённых в одно многоканальное многовременное изображение. В этом случае выделяемые путем кластеризации объекты характеризуются сходным характером изменений УЭПР во времени.

Рассмотрим, какие объекты местности выделяются при кластеризации многовременного разносезонного изображения, составленного из 19 снимков, охватывающих целиком один «холодный» (13 снимков, полученных между 07.10.2015 г. и 22.05.2016 г.) и один «тёплый» (6 снимков, полученных между 03.06.2016 г. и 19.09.2016 г.) период, и графики средних значений УЭПР, соответствующих каждому классу (рис. 2.32). При кластеризации использована векторная маска острова, чтобы исключить влияние на её результат особенностей изображения морской поверхности и льдов.

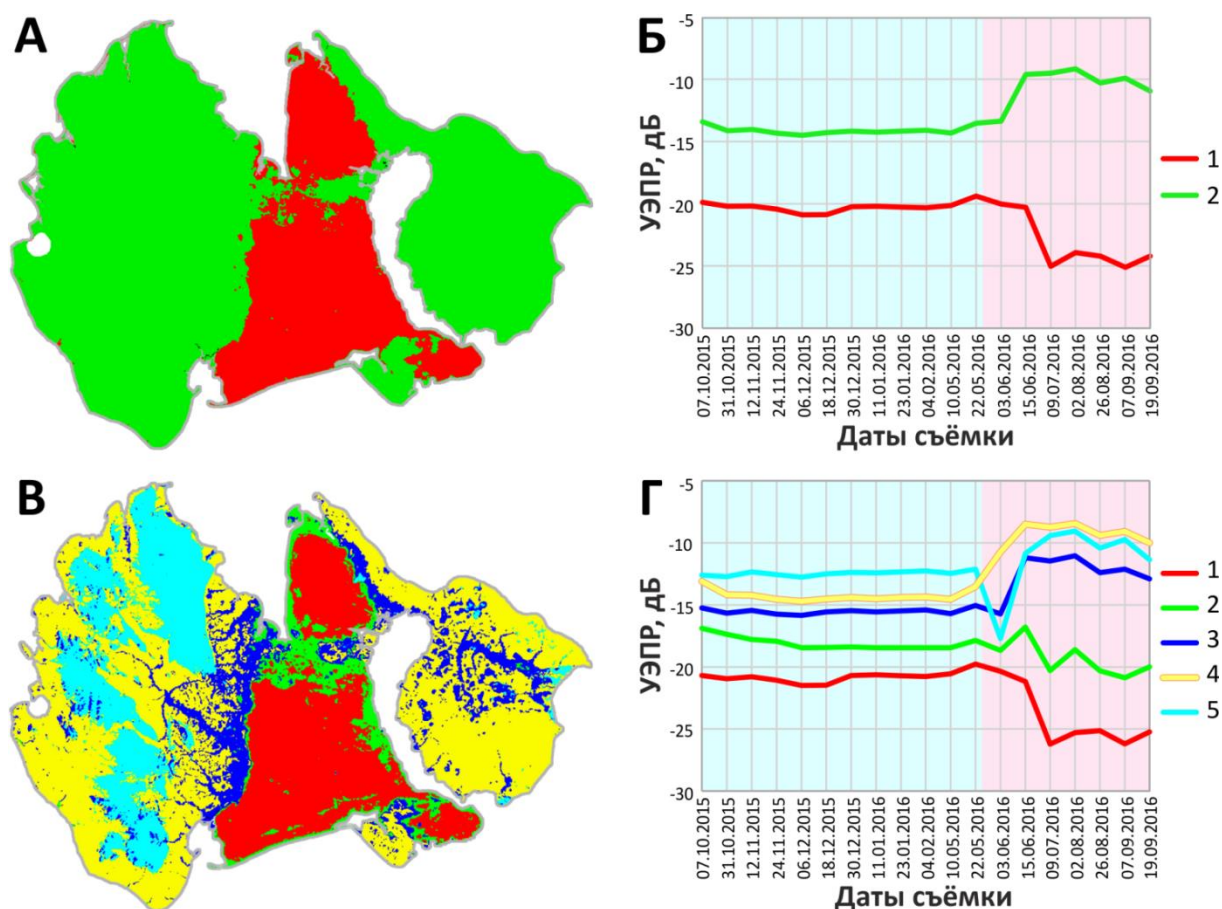


Рис. 2.32. Результаты неконтролируемой классификации многовременного производного РЛ изображения *Sentinel-1A*, составленного из 19 снимков в ГГ-поляризации (07.10.2015-19.09.2016): А – 2 класса, В – 5 классов, Б и Г – графики временных образов кластеров (бледно-голубым цветом выделен период с устойчивыми отрицательными температурами воздуха, бледно-розовым – с преимущественно положительными)

При задании двух классов выделяются следующие объекты:

-класс 1 - относительно ровная песчаная пустыня Земли Бунге, практически лишённая растительности. Невысокие значения УЭПР относительно класса 2 объясняются достаточно низкой степенью шероховатости поверхности и тем, что

она сложена песчаными отложениями. Снижение значений УЭПР в летний период связано, вероятно, с просыханием песков (сухие песчаные отложения характеризуются низкой диэлектрической проницаемостью и способны пропускать радиоволну в глубину до встречи с объектом с иными диэлектрическими свойствами [Woodhouse, 2005]);

-класс 2 - все остальные участки острова, характеризующиеся разными типами и степенью расчленения рельефа и разными типами растительного покрова. В целом для этого класса характерны более высокие, чем для класса 1, значения УЭПР и зимой, и летом. Относительно низкие значения УЭПР в холодный период объясняются низкой диэлектрической проницаемостью промёрзших грунтов, а относительно высокие значения в тёплый период - более высокой диэлектрической проницаемостью протаявших грунтов, развитием растительности.

При задании пяти классов выделяются:

-класс 1 - песчаная пустыня Земли Бунге, практически лишённая растительного покрова. График изменений средних значений УЭПР в целом похож на график класса 1 при кластеризации с выделением двух классов;

-класс 2 - преимущественно участки выхода прочных дочетвертичных пород с признаками эрозионного расчленения, практически лишённые растительного покрова. Этому классу свойственны достаточно низкие значения УЭПР в течение года, но выше, чем для ровной песчаной пустыни, что объясняется большей шероховатостью поверхности;

-класс 3 - речные долины и термокарстовые котловины преимущественно с болотной растительностью. График УЭПР этого класса в целом похож на график для класса 4, однако значения УЭПР несколько ниже, особенно летом. Это может быть связано с более плоским рельефом (по сравнению с участками расчленённой равнины) и высокой степенью заболоченности (понижению значений УЭПР этого класса может способствовать как наличие пятен открытой водной поверхности между вегетирующей растительностью, суммарно приводящих к снижению интенсивности обратного рассеяния в пикселе РЛ изображения, так и тем, что относительно низкорослая растительность не препятствует прохождению

радиоволны до гладкой поверхности воды, что приводит к преобладанию однократного рассеяния);

-класс 4 - равнинные участки с разной степенью эрозионного и термокарстового расчленения, с тундровой растительностью. График изменений средних значений УЭПР в целом похож на график класса 2 при кластеризации с выделением двух классов;

-класс 5 - участки платообразных возвышенных равнин. Для этого класса характерны самые высокие значения УЭПР в зимний период и одни из самых высоких - в летний, что можно связать как с большим количеством склонов, обращённых в сторону радиолокатора, которые дают повышенный уровень обратного сигнала, так и с высокой степенью шероховатости поверхности за счёт наличия грубого обломочного материала. Понижение значений УЭПР 3 июня 2016 г. связано с наличием мокрого снега на поверхности плато, который приводит к поглощению радиоволн.

Дальнейшее последовательное увеличение количества классов приводит к выделению природно-территориальных комплексов более низкого иерархического уровня. Некоторые участки, отчётливо распознаваемые при визуальном дешифрировании, начинают выделяться на результате автоматизированного дешифрирования только при задании большого числа классов. Например, участок с высокой степенью эрозионного расчленения и обилием микроформ криогенного рельефа (байджарахов) в юго-восточной части острова Фаддеевского проявляется только при кластеризации с числом задаваемых классов 20 и более. При этом остальные выделяемые классы получают излишне дробными, что затрудняет использование такого результата кластеризации для всей территории.

Вообще говоря, кластеризация радиолокационного изображения позволяет выявлять радиогеосистемы² - участки со сходным характером интенсивности обратного рассеяния (в случае многовременного изображения – её временной

² Радиогеосистемный подход получил развитие в 1980-90-х гг. в Харьковском национальном университете им. В.Н. Каразина [Некос, 1986; Некос, Некос, 2007]

изменчивости). Картографирование именно радиogeосистем представляется возможным, однако понимание таких карт специалистами в различных областях географии, не знакомых с радиолокационным зондированием и способностью разных объектов рассеивать радиосигнал, представляется затруднительным. В связи с этим необходимо соотнесение радиogeосистем с природно-территориальными комплексами, понятными географам, которым соответствует уникальное сочетание рельефа, растительного покрова и других компонентов среды.

Оптимальным вариантом для картографирования природно-территориальных комплексов острова Котельный видится сочетание обоих 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 разные варианты кластеризации), второй – отредактировать их с учётом границ, видимых глазом на изображении, но не выделяемых компьютером, а также с учётом дополнительных источников. Детально процесс создания карты природно-территориальных комплексов острова рассмотрен в главе 3.

2.5. Выводы

1. Выбор радиолокационных данных для тематического картографирования зависит от особенностей исследуемой территории и тематики картографирования. Наиболее существенными параметрами исходных данных, которые могут повлиять на подходы к их обработке и на качество решения поставленной задачи, помимо частотного диапазона радиолокатора, являются режимы съёмки и уровни начальной обработки данных. Для сильно изменчивых в течение определенного времени (вегетационного периода, года и т.д.) районов предпочтительным представляется использование разновременных амплитудных радиолокационных снимков, в то время как для слабо изменчивых территорий наиболее эффективным может оказаться применение материалов съёмки в нескольких поляризациях.

2. Исходные материалы космических радиолокационных съёмок затруднительно напрямую использовать для дешифрирования и

картографирования ввиду нескольких причин. Во-первых, радиолокационные снимки непривычны для зрения человека ввиду того, что на них отображается не отражённое поверхностью солнечное излучение, а радиоволновое излучение, не видимое глазом. Кроме того, им свойственен спекл-шум, различные геометрические и яркостные искажения, которые затрудняют их интерпретацию. Это обуславливает необходимость предварительной обработки РЛ данных, заключающейся в создании производных изображений, пригодных для визуального и автоматизированного дешифрирования. К первым относятся преимущественно цветные синтезированные многополяризационные и многовременные изображения, а ко вторым – изображения, прошедшие этап радиометрической калибровки, пригодные для измерения коэффициента обратного рассеяния сигнала и автоматизированной классификации на основе числовых значений УЭПР. В обоих случаях необходимым этапом преобразования является подавление спекл-шума.

3. Анализ значений интенсивности обратного рассеяния радиосигнала (УЭПР) в пределах участков поверхности сельскохозяйственных земель в дельте Волги показал, что основными факторами, влияющими на них, являются характеристики почв (преимущественно, размер неровностей) и растительности (проективное покрытие, высота, запас фитомассы). Как правило, при их возрастании увеличиваются и значения УЭПР. Обратное рассеяние от участков поверхности острова Котельный определяется большим количеством факторов: состоянием сезонно-талого слоя, видом расчленения рельефа (эрозионное или термокарстовое) и его степенью, характером растительного покрова, степенью увлажнения поверхности, характером рыхлых отложений. Эти характеристики легли в основу создаваемых карт.

4. Возможность применения автоматизированного дешифрирования радиолокационных изображений во многом определяется «сложностью» картографируемой территории, т.е. количеством свойств местности, одновременно влияющих на интенсивность обратного рассеяния радиосигнала (УЭПР), чёткостью границ между объектами. При относительной «простоте»

территории (т.е. ограниченном числе характеристик местности, формирующих обратный сигнал) для ее картографирования возможно использование только методов автоматизированной классификации производных изображений, в более сложных случаях требуется сочетание принципов автоматизированного и визуального дешифрирования.

ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Обобщив проведённые эксперименты, методику использования радиолокационных данных для тематического картографирования можно представить в виде блок-схемы, приведённой на рисунке 3.1.

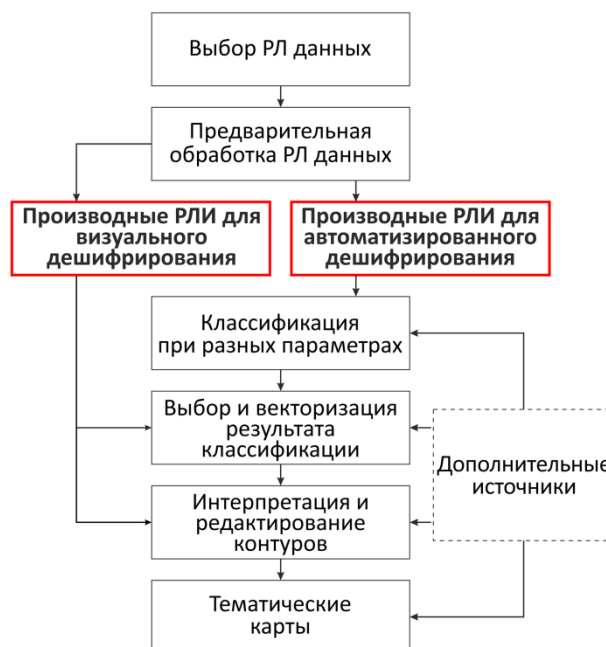


Рис. 3.1. Принципиальная блок-схема методики использования космических радиолокационных данных для тематического картографирования

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1) *Выбор радиолокационных изображений*, осуществляемый двумя путями: заказ новых съёмок или поиск и отбор данных из архива. Критерии выбора материалов съёмки зависят от решаемой географической задачи, особенностей картографируемой территории и предполагаемых методов обработки данных.

Наряду с выбором радиолокационных данных происходит отбор дополнительных источников, причём их состав может значительно отличаться в зависимости от тематики картографирования и степени изученности исследуемой территории. Для большинства случаев важно наличие сведений о погоде (особенно об осадках и температуре воздуха);

2) *Предварительная обработка РЛ данных* является обязательным этапом методики, поскольку в исходном виде их затруднительно использовать и для визуального, и для автоматизированного дешифрирования ввиду присущих им

геометрических и радиометрических искажений, наличия спекл-шума и др. Выбор способов преобразования зависит от используемых данных (от съёмочного режима, в котором они получены, и уровня начальной обработки), особенностей исследуемой территории и решаемой задачи. Предлагается создавать два вида производных радиолокационных изображений, предназначенных для разных направлений дальнейшего использования – для визуального и автоматизированного дешифрирования. К первым относятся цветные синтезированные RGB-изображения (многополяризационные и многовременные), значения пикселей которых могут быть выражены в единицах яркости; ко вторым – изображения, прошедшие этап радиометрической калибровки, пригодные для измерения значений УЭПР и классификации объектов на их основе. Последние могут быть как одноканальными, так и многоканальными (многополяризационными и многовременными; при этом изображение может содержать более трех каналов). В обоих случаях необходимым этапом обработки является подавление спекл-шума.

3) *Классификация производных РЛИ* способствует объективному выделению участков, сходных по характеру обратного рассеяния или его временной изменчивости (в случае использования многовременного снимка). Под разными параметрами классификации подразумевается количество классов и собственно метод классификации. При уверенном знании местности, наличии материалов наземных обследований целесообразно проведение контролируемой классификации, в противном случае – неконтролируемой.

4) *Выбор результатов классификации* основывается на визуальной оценке дробности классов, их сопоставлении с дополнительными источниками, в частности, с материалами наземных обследований. На этом же этапе возможно проведение автоматизированной пост-обработки результата классификации для удаления незначимых контуров, образованных в том числе из-за спекл-шума, объединения разных контуров, соответствующих одним и тем же объектам местности. Отметим, что для последующего картографирования может быть отобрано несколько результатов классификации. В конце этапа проводится

автоматическая *векторизация* отобранных результатов классификации.

5) Этап *интерпретации* контуров подразумевает соотнесение контуров, выделенных в результате классификации, с реальными объектами местности на основе известных законов взаимодействия радиоволн с зондируемой поверхностью и их сопоставление с дополнительными источниками. Уточнение положения границ объектов выполняется на основе визуального дешифрирования с привлечением соответствующих производных радиолокационных изображений.

6) Собственно *составление тематических карт* основывается на совместном применении данных радиоволнового диапазона и дополнительных источников. Примеры составления карт двух исследуемых участков приведены в параграфах 3.1 и 3.2.

3.1. Картографирование сельскохозяйственных угодий в дельте Волги как результат комплексного использования производных радиолокационных изображений Radarsat-2, снимков в оптическом диапазоне и топографических карт

В параграфе 2.5.1 рассмотрен процесс создания одного из тематических слоёв карты сельскохозяйственных угодий участка дельты Волги, характеризующих современное состояние неиспользуемых угодий. Для более полного картографирования особенностей современного землепользования на выбранном участке необходимо привлечение дополнительных источников.

Математическая основа карты. Математическая основа создаваемой карты по большей части определена характеристиками используемых материалов дистанционного зондирования и размерами картографируемой территории и исследуемых объектов. Выбранный масштаб картографирования (1:100 000) обусловлен, прежде всего, пространственным разрешением снимков Radarsat-2 (~7 м) и Landsat (30 м) и достаточно большим размером основных картографируемых объектов (сельскохозяйственных угодий). Карта составлена в проекции UTM, зона 38N. Выбор этой проекции обусловлен тем, что в неё трансформированы космические снимки Landsat.

Географическая основа карты (объекты гидрографии, бугры Бэра³, населённые пункты) составлена по современным космическим снимкам. Населённые пункты наилучшим образом распознаются по радиолокационным снимкам, поскольку имеют одни из самых высоких значений УЭПР из-за преобладания двукратного рассеяния, благодаря чему они отчётливо выделяются на фоне остальных объектов. Бугры Бэра наиболее явно выделяются на снимках в оптическом диапазоне, в то время как на радиолокационных изображениях они дифференцируются от окружающей местности не всегда одинаково эффективно (однозначно они выделяются на фоне заливных лугов с активно вегетирующей растительностью, но выявление их на фоне поверхности с бесструктурной почвой и скудной высохшей растительностью практически невозможно из-за сходных значений УЭПР). Объекты гидрографии одинаково уверенно распознаются на радиолокационных изображениях (водная поверхность характеризуется существенно более низкими значениями УЭПР, чем окружающая её растительность) и на снимках в оптическом диапазоне, особенно в ближнем инфракрасном канале.

Тематическое содержание и оформление карты. Основным элементом тематического содержания карты являются сельскохозяйственные угодья и их характеристики. Как было сказано в параграфе 2.1, к середине 1970-х гг. значительная часть сельскохозяйственных земель в дельте Волги была обвалована. Вначале на основе топографических карт, отображающих местность по состоянию на 1970-80-е гг., был создан векторный слой границ обвалованных полей, которые распознаются благодаря изображению на топокартах системы защитных валов и оросительных каналов, а также обозначению некоторых конкретных видов использования сельскохозяйственных угодий (рыбопитомники и рисовые чеки).

Далее на основе разновременных снимков Radarsat-2 и Landsat-8, полученных в 2014 году, определен характер современного использования

³ Бугры Бэра отнесены к географической основе карты, поскольку они являются наиболее выдающимися элементами рельефа на фоне относительно плоской окружающей поверхности

сельскохозяйственных земель. В обоих случаях для этого применен цветовой синтез разновременных изображений (рис. 3.2). Для снимков Radarsat-2 выполнялась обработка по схеме на рисунке 2.10-а (на выходе сформировано многовременное цветосинтезированное изображение), а для снимков Landsat-8 использовался следующий вариант цветового RGB-синтеза: R – снимок, полученный в начале, G – середине, B – конце вегетационного периода. При синтезе использовались снимки, полученные в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК, 0,76-0,90 мкм), поскольку именно в этом диапазоне наблюдается наибольший контраст между вегетирующей растительностью, включая посевы сельскохозяйственных культур, и участками без растительности.

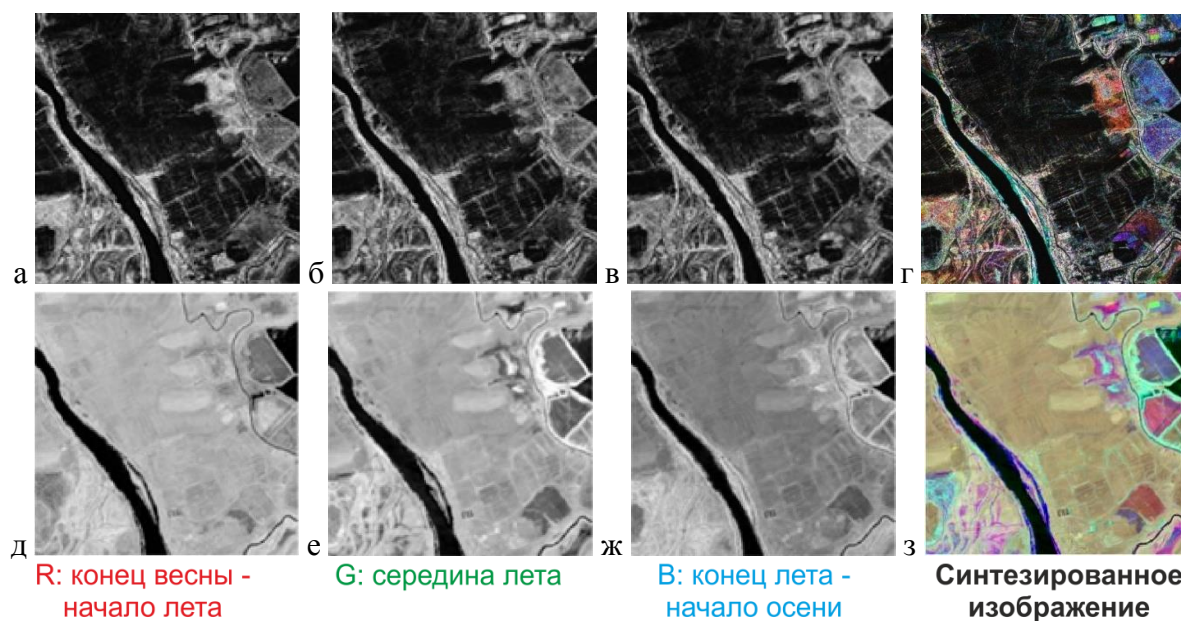


Рис. 3.2. Цветовой синтез разновременных снимков для определения видов землепользования в 2014 г.: а-г – Radarsat-2, д-з – Landsat-8/OLI

Наилучшим образом на разносезонном синтезированном снимке выделяются рыбоводные пруды: как правило, они обвалованы, в основном имеют прямоугольную форму и изображаются тёмным тоном. Уверенно распознаются обрабатываемые пахотные земли, имеющие, как правило, правильную геометрическую форму и изображающиеся различными цветами в зависимости от стадии развития произрастающих культур.

По панхроматическим снимкам Landsat-8 с пространственным разрешением 15 м выделены садово-огородные участки, которые расположены в окрестностях

Астрахани и отличаются от неё типом застройки и большим количеством древесной растительности.

Выделенные на векторной карте обвалованные поля, которые оказались не используемыми в 2014 году, отнесены к категории залежей. На цветном разносезонном снимке в оптическом диапазоне они изображаются, как правило, оттенками серого цвета ввиду слабой сезонной изменчивости, на многовременном радиолокационном – преимущественно тёмно-серым с вкраплениями более светлых оттенков, соответствующих участкам зарастания травянистой и древесно-кустарниковой растительностью.

Для определения возраста залежей анализировались, главным образом, цветные синтезированные разносезонные изображения Landsat, полученные в период с 1984 по 2013 гг. (рис. 3.3). Дополнительно для 2011 года использовались три разновременных радиолокационных изображения со спутника Radarsat-2, полученные 9 сентября, 5 и 29 октября в широкозахватном режиме WideFine и охватывающие территорию всей дельты Волги.

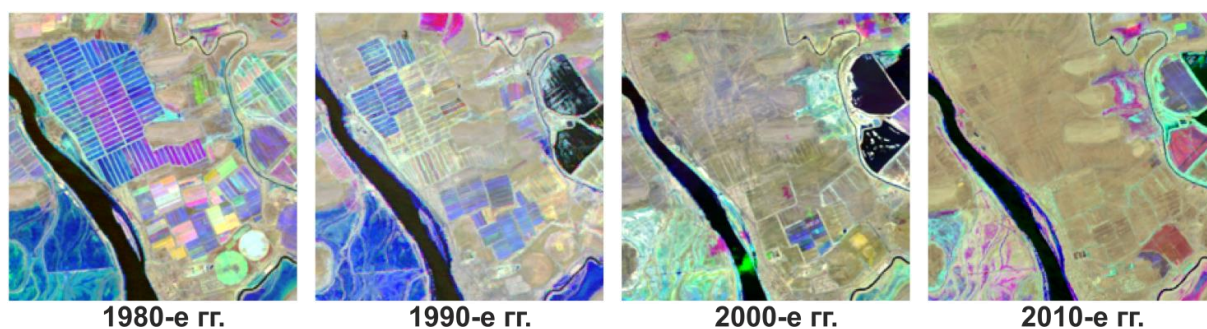


Рис. 3.3. Многолетняя серия разносезонных синтезированных снимков Landsat для выявления изменений в землепользовании

Возраст залежей определялся исходя из того, в какой период времени тот или иной участок возделывался в последний раз (таблица 3.1). Если на топографической карте какой-либо из участков был отнесён к обвалованным, но ни по одному из снимков Landsat или Radarsat-2 на нём не была выявлена сельскохозяйственная деятельность, то этот участок считался залежью максимального возраста (продолжительность периода неиспользования более 30 лет). Отметим, что поля, не отображённые на топографической карте, но

используемые в один из рассматриваемых сроков, были также включены в векторный слой и атрибутированы надлежащим образом.

Таблица 3.1

Определение возраста залежей*

Интервал лет, в который поля возделывались последний раз	Возраст залежей, годы
2009-2013	1-5
2004-2008	6-10
1994-2003	11-20
1984-1993	21-30
до 1984	>30

* - карта, иллюстрирующая возраст залежей в пределах всей дельты Волги, приведена в Приложении А

Остальные сельскохозяйственные участки дельты Волги были отнесены к естественным кормовым угодьям и разделены на две категории: 1) заливные луга и 2) незаливаемые или редко заливаемые луга. Для разделения этих классов при цветовом синтезе целесообразно использовать два снимка: полученный в пик половодья и после его окончательного спада. Среди всех снимков Landsat-8, полученных в 2014 г., половодье наиболее ярко выражено на изображении, полученном 17 мая. Самый ранний радиолокационный снимок (4 июня) позволяет выделять заливные луга уже не по наличию открытой водной поверхности, а по очень высоким значениям УЭПР, связанным с развитием на этих участках растительности.

Таким образом, легенда карты состоит из двух частей: сельскохозяйственные угодья и прочие объекты (объекты гидрографии, бугры Бэра, земли населённых пунктов). Сельскохозяйственные угодья разделены на три группы:

1) возделываемые (земли, находившиеся в обработке в 2014 г.: пашни, рыбоводные пруды, периодически используемые как пашня, садово-огородные участки);

2) залежи, классифицированные на пять категорий в зависимости от длительности периода неиспользования (1-5, 6-10, 11-20, 21-30, >30 лет). Залежи классифицированы также в соответствии с их современным состоянием. На отдельные участки залежей с разрушенными валами в настоящее время проникает

вода, благодаря чему здесь развивается луговая растительность. Этот тип состояния залежей удалось выделить по космическим снимкам, полученным в период половодья. Участки с сохранившимися валами, которые в настоящее время зарастают древесно-кустарниковой, травянистой растительностью или остаются практически лишёнными растительного покрова, выделены на основе результата классификации производного радиолокационного изображения Radarsat-2 (рис. 2.28);

3) естественные кормовые угодья, представленные заливными лугами, используемыми частично как сенокосы, пастбища и одновременно являющимися нерестилищами в период половодья, а также не заливаемыми или редко заливаемыми в половодье лугами со встречающейся местами древесно-кустарниковой растительностью.

Для отображения сельскохозяйственных угодий как основного объекта картографирования использовались яркие насыщенные цвета, для других объектов – более приглушённые тона. Для изображения залежей как главных «проблемных» сельскохозяйственных земель региона использовался розовый цвет, чтобы привлечь внимание пользователя карты к этому элементу тематического содержания. Разными оттенками розового показана возрастная структура залежей: более светлые оттенки соответствуют недавно заброшенным землям, более тёмные – залежам большего возраста. Современное состояние неиспользуемых земель показано разными способами: для участков с разрушенными валами использовалась штриховка, а для участков с сохранившимися валами – картодиаграммы, показывающие долю площади каждой залежи, заросшей древесно-кустарниковой, травянистой растительностью и практически лишённой растительного покрова. Составленная карта приведена на рисунке 3.4.

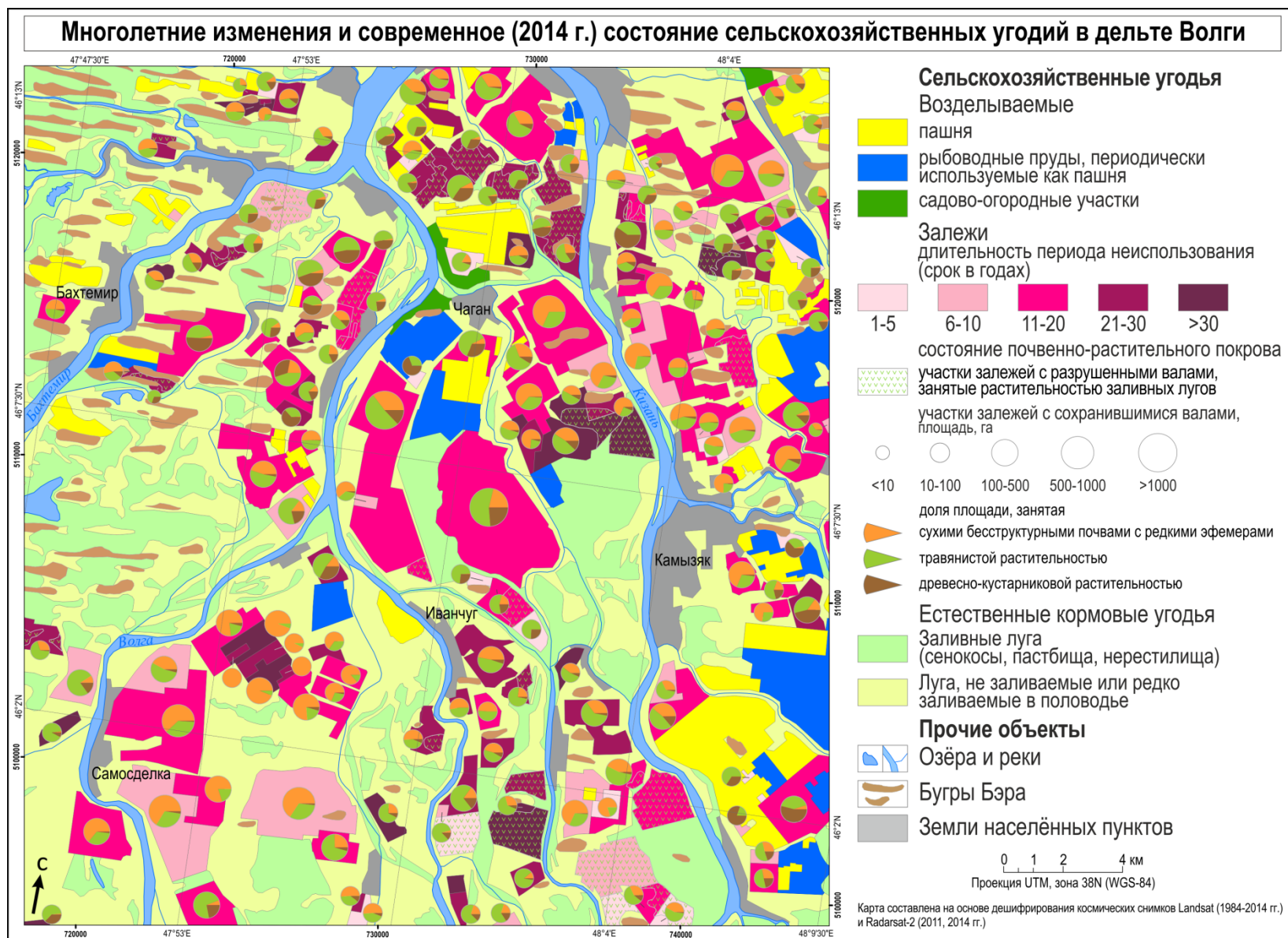


Рис. 3.4. Карта сельскохозяйственных угодий на участке дельты Волги (уменьшена)

Созданная карта даёт представление как о современном землепользовании в пределах выбранного участка (позволяет выявить категории земель в 2014 г.), так и о его изменениях (позволяет проследить динамику выведения пахотных земель из оборота). Кроме того, она даёт представление о современном состоянии неиспользуемых сельскохозяйственных земель.

Создание карты в среде ГИС позволило выполнить количественные оценки площадей разных сельскохозяйственных угодий (таблица 3.2).

Таблица 3.2

Площадь сельскохозяйственных угодий на участке дельты Волги в 2014 г.

Виды сельскохозяйственных угодий		Площадь, км ²	Доля от площади всех сельскохозяйственных земель участка дельты, %
Неиспользуемые сельскохозяйственные земли, длительность периода неиспользования в годах	1-5	10,0	33,6
	6-10	42,1	
	11-20	118,6	
	21-30	39,6	
	>30	17,4	
Возделываемые сельскохозяйственные земли	пашни	47,0	11,2
	рыбоводные пруды	25,4	
	садово-огородные участки	3,6	
Луга	заливные	250,2	55,2
	не заливаемые или редко заливаемые в половодье	124,27	

Визуальный анализ карты, а именно, приуроченности состояния залежей к их возрастному составу, позволяет сделать вывод о том, что длительность периода неиспользования земель не является основным фактором, определяющим их современное состояние (вероятно, большее влияние оказывают природные особенности, связанные с увлажнением участков, характером почвенного покрова и др.).

Созданная карта в сочетании с результатами детальных наземных обследований может быть использована для формирования рекомендаций по проведению рекультивационных работ, возвращению залежных земель в оборот.

3.2. Картографирование природно-территориальных комплексов острова

Котельный на основе производных радиолокационных изображений

Sentinel-1A и дополнительных источников

Как было сказано в параграфе 2.5.2, получаемые в результате кластеризации многовременного радиолокационного снимка классы представляют собой радиогеосистемы – участки местности, характеризующиеся сходной интенсивностью обратного рассеяния радиосигнала или её изменениями. Картографическое представление особенностей пространственного (или пространственно-временного) распределения УЭПР в пределах той или иной территории представляется довольно малоинформативным для специалистов в разных областях географии, особенно для тех, кто не знаком с закономерностями взаимодействия радиоволн с земной поверхностью. При создании тематических карт на основе результатов преобразования радиолокационных данных целесообразно перевести «радиогеофизический язык», описывающий способность разных участков поверхности рассеивать радиосигнал, на язык географический, описывающий привычные географам характеристики местности (рельеф, растительный покров и т.д.).

Математическая основа карты. Как и в примере картографирования участка дельты Волги, проекция космических снимков определила проекцию составляемой карты острова Котельный (UTM, зона 54N). Именно в проекции UTM предоставляются снимки в оптическом диапазоне Landsat, которые использовались в исследовании в качестве одного из дополнительных материалов. Исходные непривязанные изображения Sentinel-1A в свою очередь также были трансформированы в проекцию UTM.

Исходя из размеров острова (около 175 км с севера на юг и 238 км с запада на восток), пространственного разрешения преобразованных радиолокационных изображений (в результате некогерентного накопления с коэффициентом усреднения, равным трём пикселям, разрешение составило 120 м), весьма неравномерного распределения по площади разнообразных форм рельефа (острова Котельный и Фаддеевский отличаются большим их разнообразием, в то время как Земля Бунге практически полностью представляет собой однообразную песчаную пустыню) определён оптимальный масштаб картографирования – 1:750 000.

Географическая основа карты. Основным источником для создания географической основы карты послужила обзорно-топографическая карта масштаба 1:500 000, трансформированная в проекцию UTM. В качестве основных элементов географической основы были отобраны объекты гидрографии (постоянные и временные водотоки) и отметки высот. В связи с тем, что масштаб создаваемой карты несколько мельче масштаба топографической карты, была проведена их генерализация. Топографическая карта послужила также основным источником географических названий.

Было принято решение не использовать в качестве элемента географической основы горизонтали, поскольку в сочетании с выделенными по радиолокационным снимкам контурами они сильно затрудняют восприятие карты.

Разработка легенды и оформление карты. Проведённый анализ разновременных радиолокационных изображений Sentinel-1A показал, что на них находят отображение особенности местности, связанные преимущественно с её рельефом, растительностью и в некоторых местах – с характером слагающих участки отложений. В соответствии с этим в легенде охарактеризованы преимущественно эти три составляющие природно-территориальных комплексов.

Поскольку при составлении географической основы карты было принято решение исключить горизонтали, сведения о высотных уровнях были вынесены в названия природно-территориальных комплексов в легенде. В легенде комплексы расположены по увеличению высоты.

Среди объектов гидрографии помимо водотоков, заимствованных с топографической карты, выделены водоёмы. Рассмотренные в параграфе 2.4.2 особенности хода значений УЭПР озёр зимний период позволяют дифференцировать их на мелкие, промерзающие до дна в зимний период 2014-2015 гг. и 2015-2016 гг., и глубокие, не промерзающие.

В зависимости от локализации картографируемых объектов использовались различные способы изображения. Занимающие обширные пространства природно-территориальные комплексы показаны качественным фоном

(графическое средство – цвет). Протяжённые узкие объекты (водотоки, косы и др.) показаны линейными знаками, при этом сплошными линиями показаны постоянно существующие объекты, а пунктирной – временные. Значки использовались для отображения небольших по площади золотых холмов.

Составленная карта природно-территориальных комплексов острова Котельный представлена на рис. 3.5. В приложении Б приведён дополнительный вариант легенды этой карты, представленный в табличной форме и сочетающий как характеристики природно-территориальных комплексов, так и свойственные этим комплексам разносезонные значения УЭПР. Карта даёт представление о современных природно-территориальных комплексах острова Котельный, характеризующихся уникальным сочетанием рельефа, растительного покрова и грунтов. В отличие от разработанных ранее тематических карт и схем, она характеризует особенности местности с большей детальностью. Помимо этого, она предоставляет ценную информацию о свойствах местности, не показанную на других картах, нанесение которой стало возможно благодаря наличию нескольких разносезонных радиолокационных снимков.

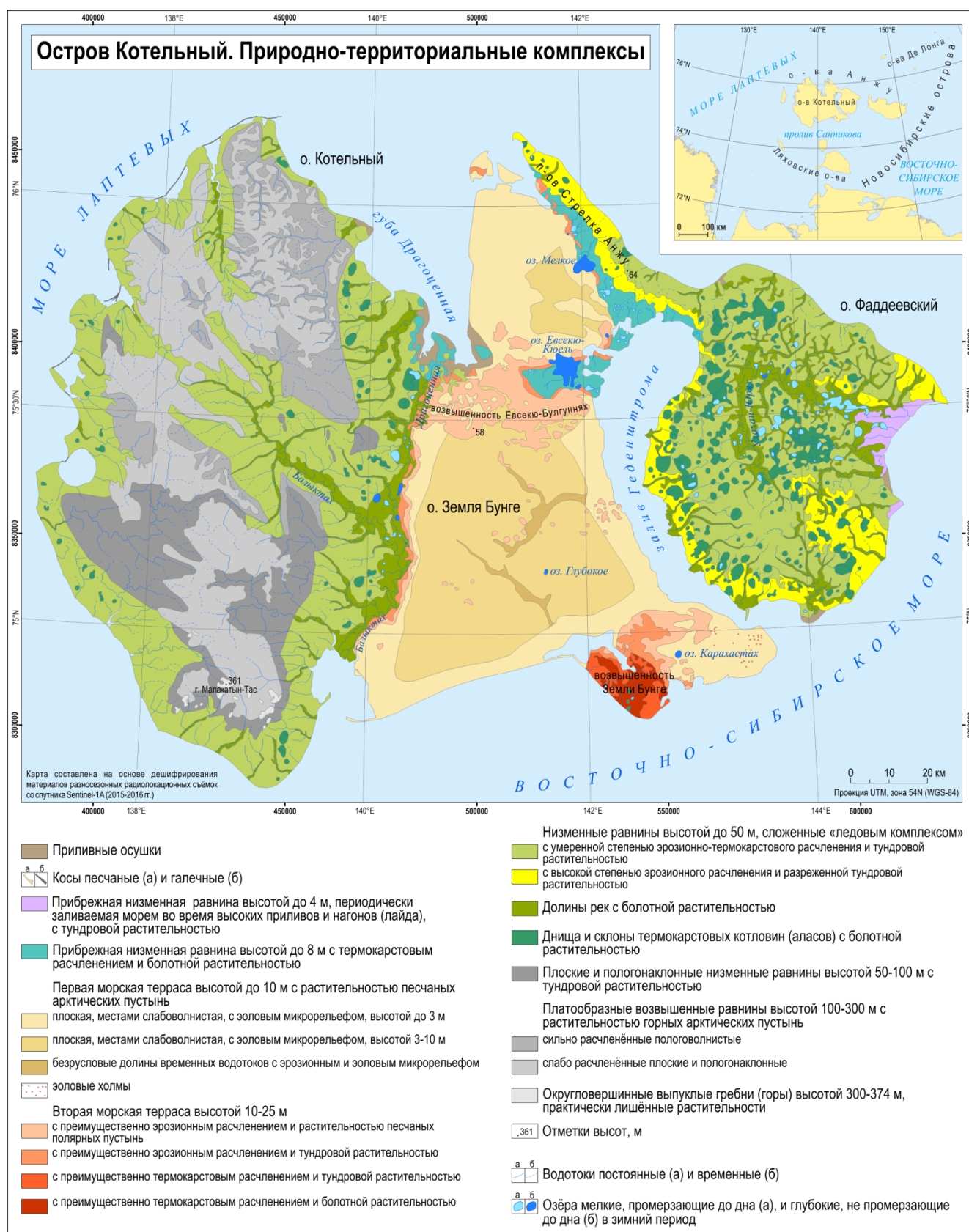


Рис. 3.5. Карта природно-территориальных комплексов острова Котельный (уменьшена)

3.3. Особенности использования и роль радиолокационных данных в тематическом картографировании

Проведённые эксперименты показали, что спутниковые радиолокационные данные как источник для картографирования имеют свои преимущества и недостатки, с которыми можно столкнуться на разных этапах исследования. Их несомненным преимуществом перед дистанционными данными оптических съёмочных систем является получение изображения местности в любую погоду и при любых условиях освещения. Именно эти особенности радиолокационного зондирования обуславливают возможность накопления больших временных рядов снимков, которые можно использовать для регулярного мониторинга местности и картографирования её динамики. Положительной стороной данных радиолокационного зондирования является и то, что на изображениях проявляются особенности местности, которые не видны на снимках в оптическом диапазоне, что позволяет извлекать новые данные о территории для составления тематических карт.

Несмотря на столь существенные положительные стороны материалов радиолокационного зондирования, при их использовании возникает немало сложностей. С одной из них, многовариантностью исходных данных, которая определяется разнообразием параметров съёмки и уровней начальной обработки данных, можно столкнуться уже на начальных этапах работы.

Материалы радиолокационной съёмки требуют многоэтапной обработки, которая может различаться в зависимости от выбранных данных и от задач исследования. Остановимся на нескольких важных особенностях исходных радиолокационных снимков и их обработки, которые влияют на создаваемые по ним карты. Существенным отличием радиолокационных изображений от снимков, полученных в оптическом диапазоне, является спекл-шум. Проведение операций по его подавлению (некогерентного накопления или фильтрации) хоть и улучшает изобразительные качества радиолокационных снимков, но при этом приводит к ухудшению пространственного разрешения изображений, потерям важных деталей, которые могут быть нанесены на карту, что в целом делает возможный масштаб картографирования мельче, чем на основе необработанных изображений. В то же время указанные операции можно рассматривать как

инструмент автоматизированной генерализации создаваемых по радиолокационным снимкам карт. Фильтрация изображений может сказаться и на точности проведения границ объектов: при больших размерах скользящего окна, в пределах которого работает фильтр, происходит заметное размытие изображения, в результате чего границы могут быть нанесены неверно. Это в свою очередь будет приводить к неточному определению площадей объектов по созданной карте. На точность нанесения границ влияет также точность координатной привязки изображений, которая обычно проводится на основе орбитальных данных и может не соответствовать требованиям к точности картографирования. При необходимости повышения точности проведения границ может быть выполнена допривязка изображения к точной опоре или же использованы сведения об уточнённых параметрах орбиты космического аппарата, которые в последнее время всё чаще предоставляются для данных радиолокационной съёмки. Также стоит отметить, что точность положения пикселей изображения (и, соответственно, точность нанесённых границ объектов) может быть улучшена [TerraSAR-X Value..., 2014] путём проведения операции ортотрансформирования, использующей цифровую модель рельефа, особенно в случае сильно расчленённой территории.

Свои особенности данные радиолокационной съёмки имеют и при их использовании для извлечения тематической информации. Определённые сложности могут возникнуть при дешифрировании одноканального радиолокационного изображения, поскольку одинаковые значения интенсивности обратного рассеяния могут быть свойственны различным по своей природе объектам и наоборот: одинаковые объекты, расположенные по-разному относительно падающего излучения или несколько различающиеся своим состоянием, могут характеризоваться разными значениями коэффициента обратного рассеяния. Случайные события, например, осадки, могут существенно изменить облик объектов на РЛИ, что в свою очередь может быть также неверно интерпретировано. Эта трудность может быть решена путём использования многополяризационных или разновременных радиолокационных изображений.

Различия значений обратного рассеяния в разных поляризационных каналах позволяют более уверенно дифференцировать объекты при дешифрировании (один из наглядных примеров показан на рисунке 2.14, где распаханная почва и кустарники принимают близкие значения УЭПР в согласованной горизонтальной поляризации, но существенно различающиеся значения – во всех остальных). Для выделения некоторых объектов может оказаться предпочтительным тот или иной сезон съёмки, что наглядно показано на рисунке 2.30.

Ввиду того, что на интенсивность обратного сигнала оказывает влияние большое количество параметров и съёмочной аппаратуры, и местности, однозначное установление связи «интенсивность обратного рассеяния – объект местности» часто представляется затруднительным, особенно при исследовании малоизученных территорий. Разнообразие влияющих на изображение свойств местности обуславливает сложность создания универсальных методик дешифрирования и картографирования на основе радиолокационных снимков. В каждом конкретном случае должна учитываться специфика исследуемой территории, в зависимости от которой необходим подбор дополнительных источников, позволяющих наиболее полно и достоверно выполнить дешифрирование радиолокационных изображений.

Роль радиолокационных данных в тематическом картографировании может быть различной в зависимости от исследуемой территории и тематики картографирования. Это видно и на двух рассмотренных в предыдущих параграфах примерах.

При создании карты сельскохозяйственных угодий дельты Волги радиолокационные изображения использовались преимущественно для формирования одного тематического слоя (современное состояние залежей). Гораздо меньшее значение они имели при определении длительности периода неиспользования сельскохозяйственных земель ввиду отсутствия архивных снимков за большую часть интересующего временного интервала (радиолокационные данные на исследуемый участок имелись только для 2011 и 2014 гг.). Тем не менее, при наличии такого архива радиолокационные данные

могли бы служить главным (практически единственным) источником для картографирования (рис. 3.6). Роль дополнительных источников в этом случае сводилась бы только к выбору эталонов для обучения алгоритмов классификации и оценки достоверности получаемых результатов.

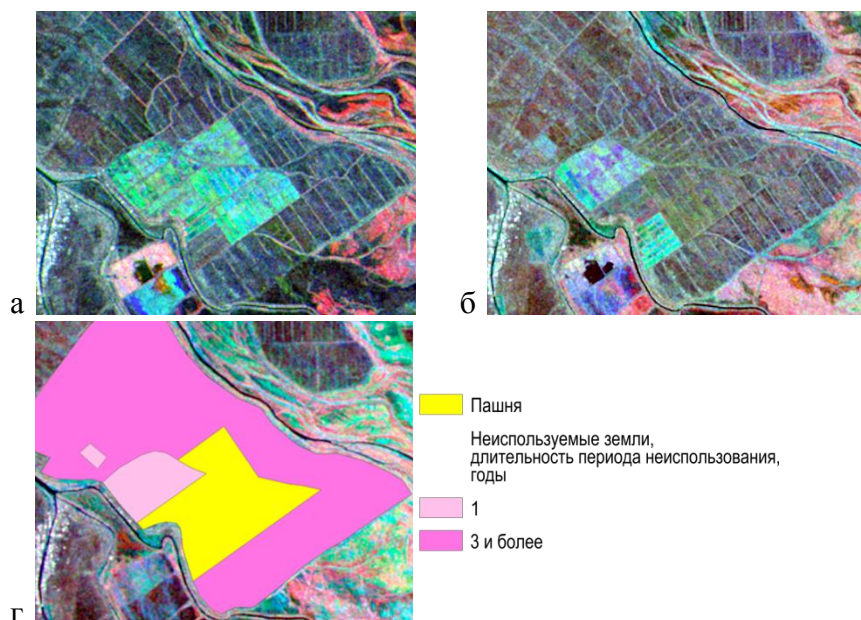


Рис. 3.6. Серия разносезонных синтезированных РЛИ Sentinel-1 участка дельты Волги: а – 2015 г., б – 2016 г., в – 2017 г., г – определение длительности периода неиспользования сельскохозяйственных земель по состоянию на 2017 г.

При создании карты природно-территориальных комплексов острова Котельный основная часть контуров была выделена именно по многовременному радиолокационному снимку, однако при их интерпретации существенную роль играл обширный комплект пространственно-координированных дополнительных источников. Это объясняется тем, что на обратный сигнал от различных участков острова влияет целый комплекс характеристик местности (а именно, её рельефа, растительного покрова поверхности и т.д.), и объяснение различий в интенсивности сигнала только с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностями, имеющими разную шероховатость и диэлектрические свойства, является недостаточным. Дополнительные же источники позволяют оценить вклад в обратный сигнал различных характеристик местности (растительности, заозёрности или заболоченности, расчленения рельефа и т.д.).

Таким образом, говорить о радиолокационных данных как о самодостаточном источнике для тематического картографирования можно далеко

не во всех случаях. Как самостоятельный источник для создания карт этот вид данных можно использовать при уверенном знании особенностей картографируемой территории, при относительной «простоте» картографируемого объекта (как, например, залежей в аридной зоне, где заранее известно, что преобладать будут механизмы однократного и объемного рассеяния от почвы и растительности соответственно, а увеличение запаса фитомассы будет в целом приводить к возрастанию УЭПР). В остальных же случаях (при слабом знакомстве с местностью, сложности взаимодействия радиоизлучения с зондируемой поверхностью) картографирование по радиолокационным данным во многом опирается на сторонние источники информации.

На основе анализа мирового опыта и проведения собственных экспериментов сформирована сводная таблица (Приложение В), обобщающая возможные направления картографирования с использованием материалов радиолокационных съёмок, с указанием роли этих материалов при создании карт.

3.4. Выводы

1. Роль радиолокационных данных в тематическом картографировании может быть различной в зависимости от исследуемой территории и тематики картографирования. Как самостоятельный источник информации для создания карт этот вид данных можно использовать при уверенном знании особенностей картографируемой территории и относительной «простоте» картографируемого объекта (т.е. при ограниченном числе характеристик местности, формирующих обратный сигнал). В других случаях картографирование по радиолокационным данным во многом опирается на сторонние источники информации. Влияние на обратный сигнал множества факторов (и характеристик съёмочной системы, и особенностей местности), затрудняет создание универсальных методик дешифрирования радиолокационных изображений и картографирования на их основе.

Комплексное использование производных радиолокационных изображений и дополнительных источников позволило составить две тематические карты разного содержания.

2. Созданная с опорой на результаты преобразования поляриметрических радиолокационных данных 2014 г., топографическую карту, многолетнюю (1984-2014 г.) серию снимков в оптическом диапазоне со спутников Landsat и разновременные снимки Radarsat-2 2011 г. карта участка дельты Волги характеризует современные (2014 г.) виды использования сельскохозяйственных угодий, динамику выведения пахотных земель из оборота и современное состояние этих земель.

3. Составленная карта природно-территориальных комплексов острова Котельный характеризует особенности рельефа, растительности, грунтов и объектов гидрографии этой территории. Комплексы выделены благодаря различиям в характере сезонной изменчивости УЭПР на многовременном радиолокационном изображении Sentinel-1A. Их географическая интерпретация выполнена с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностью и дополнительные источники. Благодаря наличию многовременных радиолокационных данных итоговая карта характеризуется значительно большей детальностью и более крупным масштабом по сравнению с использованными тематическими источниками.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ГЕОГРАФО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В УЧЕБНО- МЕТОДИЧЕСКОМ ПОСОБИИ

Проведенные автором исследования на основе радиолокационных данных позволяют обобщить их результаты и сформулировать методические основы использования этих данных при географических исследованиях и картографировании. Учитывая мировой и российский опыт распространения знаний по использованию данных дистанционного зондирования, целесообразно представить их в виде наглядного учебно-методического пособия, в котором должны быть представлены современные космические радиолокационные системы и получаемые ими данные, методы их обработки и примеры практического использования при решении конкретных географических задач. Разработка таких материалов и их последующее внедрение в образовательный процесс во многом соответствует концепции университетского инновационного географо-картографического образования [Берлянт и др., 2009], среди принципов которой – введение новых актуальных дисциплин и создание новых средств географо-картографического образования.

4.1. Обзор методических пособий по дистанционному зондированию Земли

Процесс географического познания во многом опирается на зрительные образы [Чалова, 1995], в связи с чем обучение методам дистанционного зондирования Земли представляется наиболее эффективным при использовании различных наглядных средств. В первую очередь следует назвать атласы космических снимков, которые появились наряду с традиционными атласами (систематизированными собраниями карт) по мере развития космической съёмки и использования снимков в географических исследованиях. Существенный вклад в разработку атласов космических снимков и пособий по их дешифрированию внесла Лаборатория аэрокосмических методов географического факультета МГУ [Дешифрирование многозональных..., 1982; Дешифрирование многозональных..., 1988; Космические методы..., 1998]. Важной ступенью развития обучения методам дистанционного зондирования Земли стало проведение вначале школ-

семинаров (1978-1995 гг.), а позже, в первой половине 2000-х гг., Интернет-семинаров Межуниверситетского Аэрокосмического Центра под руководством Ю.Ф. Книжникова, в рамках которых рассматривались вопросы получения космических снимков, их компьютерной обработки и применения в географических исследованиях [Межуниверситетский аэрокосмический...; Балдина и др., 2002].

Атласы и пособия на основе космических снимков предложено [Чалова, 1995] разделить на три типа: 1) территориальный, охватывающий, например, территорию Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова [Московский университет..., 2004], 2) проблемный, посвящённый определённой географической тематике, например, экологическому состоянию устьевых областей российских рек [Кравцова, Митькиных, 2013], 3) методический, включающий учебно-методические вопросы, касающиеся, например, применения космических снимков в различных областях географии [Дешифрирование многозональных..., 1982; Дешифрирование многозональных..., 1988; Земля – планета..., 1995; Савиных и др., 2000]. Атласы, разъясняющие принципы космической съёмки той или иной аппаратурой и методики работы с получаемыми изображениями, относятся к типу методических. Большая часть существующих атласов этого типа посвящена снимкам в оптическом диапазоне. Гораздо меньше произведений посвящено космическим снимкам радиоволнового диапазона. Среди них наиболее известны два атласа, созданные на основе данных американского космического радиолокатора Seasat, функционировавшего в 1978 г. [Ford et al., 1980; Fu et al., 1982], и атлас, составленный по данным отечественной системы Алмаз-1 (1991-92 гг.) [Дикинис и др., 1999].

Атлас «Seasat Views North America, the Caribbean, and Western Europe With Imaging Radar» содержит теоретический раздел, включающий характеристики съёмочной системы, описание основных особенностей радиолокационных изображений суши, в том числе влияние различных объектов местности на интенсивность обратного сигнала и геометрические искажения. Основная часть атласа, содержащая собственно снимки, разделена на 4 тематические

направления: 1) геология, 2) гидрология и водные ресурсы, 3) городские поселения, 4) сельское хозяйство. В общей сложности представлен 41 снимок с характеристикой изображённой местности. В каждом случае радиолокационный снимок сопровождается тематической схемой дешифрирования или снимком в видимом диапазоне.

Второй атлас «Seasat Views Oceans and Sea Ice With Synthetic Aperture Radar», как и предыдущий, содержит вводную часть, посвященную характеристикам радиолокационной съёмочной системы, установленной на спутнике Seasat, и общим особенностям полученных снимков. Атлас включает около 50 радиолокационных изображений поверхности океана, на которых проявляются различные океанические явления и объекты: поверхностные и внутренние волны, вихри, течения, нефтяные плёнки, суда, а также морской лёд. Вспомогательные материалы представлены схемами привязки снимков, информацией о погоде в момент съёмки, результатами моделирования параметров зондируемой поверхности (например, скорости ветра по данным скаттерометра, установленного на спутнике Seasat).

Примерное соотношение иллюстративной и текстовой информации в этих двух атласах – 70/30%. Все изображения в них – чёрно-белые. Схемы дешифрирования достаточно простые, на них изображаются лишь некоторые видимые элементы местности (рис. 4.1). Оба атласа доступны в электронном виде в формате *.pdf.

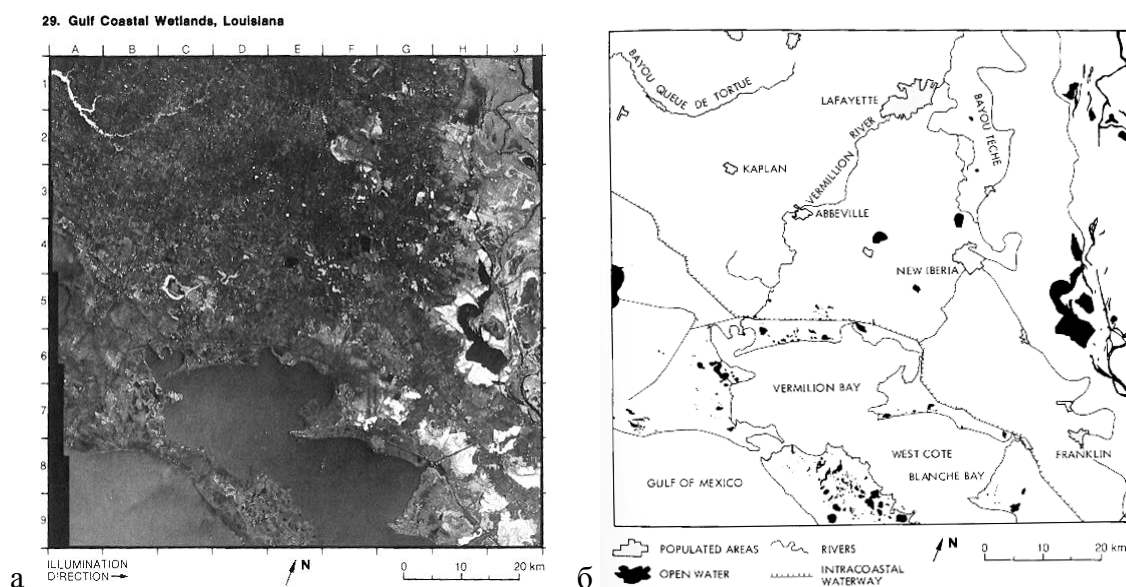
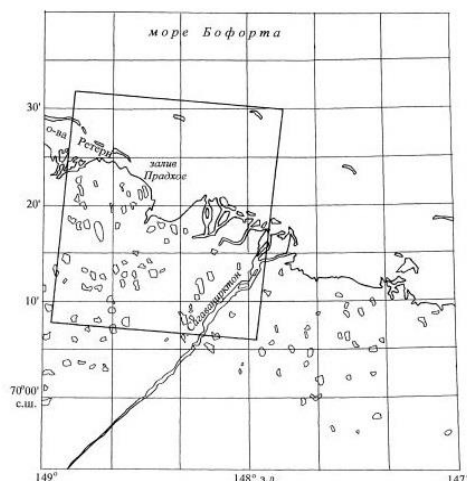


Рис. 4.1. Атлас изображений Seasat: а – радиолокационный снимок, б – схема дешифрирования [Ford et al., 1980]

Первая часть «Атласа аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1» содержит теоретические основы радиолокационной съёмки и океанологической интерпретации космических радиолокационных изображений. Во второй части приведена вся доступная априорная гидрометеорологическая информация, необходимая для полноценного дешифрирования радиолокационных изображений океана, которые приведены в следующем разделе. Каждый снимок, размещённый в третьей части, сопровождается фрагментом обзорной или детальной навигационной карты (рис. 4.2) и аннотацией, содержащей результаты его интерпретации. Представленные в атласе снимки разделены на пять групп в зависимости от изображаемых на них явлений: 1) ветровые волны и зыбь, 2) приливные явления и внутренние волны, 3) морские течения, 4) загрязнение и динамика вод в прибрежных районах, 5) рельеф дна мелководий. Некоторое неудобство в использовании атласа создает раздельное размещение на его листах снимков и аннотаций к ним. Соотношение иллюстративной и текстовой информации – приблизительно 40/60%. Атлас доступен в электронном виде на портале РФФИ.



а Рис. 3.31. Радиолокационное изображение акватории у северной побережья Аляски (данные Прадос), 31.07.1992



б Рис. 3.32. Положение РЛИ на обзорной карте масштаба 1: 500 000

Рис. 4.2. Лист атласа, составленного на основе данных радиолокационной съёмки «Алмаз-1»: а – РЛ снимок, б – схема его привязки [Дикинис и др., 1999]

Несомненно, все три рассмотренных атласа являются ценными источниками информации по применению методов радиолокационного зондирования в науках о Земле, однако включённые в них примеры снимков актуальны для конца 1970-х – начала 90-х гг. За последующие десятилетия далеко вперёд продвинулись методы радиолокационного зондирования, накоплены внушительные архивы радиолокационных данных и разработаны новые технологии их обработки.

В настоящее время существует большое количество материалов, посвящённых основам радиолокационного зондирования Земли, обработке данных и их практическому использованию, представленных в виде книг, сайтов и презентаций. Эти материалы создаются космическими агентствами, разработчиками программного обеспечения и другими организациями [Index; Tutorial: Fundamentals...; Sarmap – Your...; Radar Basics; Front | SAR-EDU], в основном они представлены на иностранных языках. В большинстве русскоязычных образовательных источников основное внимание уделяется не радиолокационному зондированию Земли, получаемым изображениям и особенностям их интерпретации, а физическим, математическим и техническим основам радиолокации, особенностям аппаратуры и принципам обработки сигналов. Наиболее известный русскоязычный источник, касающийся именно обработки спутниковых радиолокационных изображений (преимущественно интерферометрической), – раздел «Теория радиолокационной космической

съемки и обработки радиолокационных снимков» электронного ресурса «Вики-фотограмметрия», разработанного компанией «Ракурс» [Вики-фотограмметрия]. Этот ресурс ориентирован в основном на специалистов, знакомых с основами радиолокационного зондирования, содержит много специальной терминологии и технических деталей обработки данных и в целом сложен для восприятия исследователями, не работавшими ранее с данными съёмки в радиоволновом диапазоне. Недостаток русскоязычных наглядных материалов, разъясняющих особенности радиолокационной съёмки и демонстрирующих возможности их практического использования, во многом обусловил необходимость разработки методических наглядных материалов, адаптированных для географов.

4.2. Разработка структуры, содержания и формы методического наглядного пособия

Структура пособия. Потенциальные пользователи разрабатываемого пособия, студенты и специалисты-географы, в большинстве своём знакомы со снимками в световом диапазоне спектра и в меньшей степени – с изображениями, полученными в радиоволновом диапазоне, что объясняется меньшим распространением этого вида данных, их высокой стоимостью, сложностью восприятия и интерпретации. В связи с этим особенно важно наглядно показать основные отличительные особенности современных радиолокационных снимков и объяснить механизмы их формирования, а также продемонстрировать некоторые способы их преобразования и примеры решения конкретных географических задач на основе таких снимков. Именно потому, что пособие предполагает включение не только самих снимков, но и некоторых теоретических вопросов радиолокационной съёмки, результатов обработки получаемых материалов и примеров их дешифрирования, оно названо методическим. В структуре разрабатываемого пособия по аналогии с атласами, рассмотренными в параграфе 4.1, выделено два основных раздела: теоретический «Принцип радиолокационной съёмки» и прикладной «Примеры практического применения радиолокационных данных». Дополнительно для более глубокого самостоятельного изучения темы введён раздел «Литература».

Источники для составления. При разработке пособия использовались материалы двух видов: текстовые (учебники и статьи на русском и преимущественно английском языках) и наглядные (иллюстрации и радиолокационные снимки). Источниками современной информации обоих видов послужили сайты и презентационные материалы космических агентств (например, европейского – ESA [Index]), операторов космических систем радиолокационного наблюдения (Airbus Defence and Space [Airbus Defence...]) и разработчиков программного обеспечения для обработки космических радиолокационных снимков (sarmap SA [Sarmap – Your...], Ракурс [Вики-фотограмметрия]). В качестве исходных материалов для создания второго раздела пособия использовались не только радиолокационные снимки, но и полученные автором результаты их обработки и дешифрирования.

Содержание разделов. В структуре первого раздела обособлены вопросы, которые относятся к характеристикам радиолокационных изображений, обусловленным особенностями метода космической радиолокационной съёмки и свойствами местности. Отдельный подраздел посвящён предварительной обработке радиолокационных данных, нацеленной на улучшение визуального восприятия изображений и подготовку их для дешифрирования. Необходимость включения такой темы связана с тем, что значительная часть операций, применяемых к радиолокационным данным, не используется для снимков в видимом и инфракрасном диапазонах и потому незнакома широкому кругу исследователей. Завершающая часть раздела – обзор существующих и перспективных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой и основных областей применения радиолокационных данных. Эта часть пособия обобщает основные характеристики космических радиолокационных систем и предваряет прикладную его часть, знакомя пользователей с тем спектром задач, которые успешно решаются с применением радиолокационных данных.

Первый раздел пособия составлен преимущественно на основе литературных источников. Текстовый материал насыщен иллюстрациями, среди которых – специально разработанные схемы и подобранные пары снимков в

оптическом и радиоволновом диапазонах, наиболее информативно демонстрирующие свойства последних. Систематизированный перечень рассматриваемых в первом разделе вопросов приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Раздел «Принцип радиолокационной съёмки»

№	Название подраздела	Содержание
1	Технология съёмки	Принцип активной съёмки, длина и поляризация радиоволн, геометрия съёмки, режимы обзора и работы космических радиолокационных систем
2	Свойства объектов, влияющие на характер радиолокационного изображения	Шероховатость и диэлектрические свойства поверхности, механизмы рассеяния радиоволн
3	Радиолокационные снимки	Форма записи радиосигнала, зависимость изображения от длины волны и поляризации, изображение природных и антропогенных объектов на снимках, яркостные и геометрические искажения
4	Обработка снимков	Некогерентное накопление, автоматическая корегистрация серии снимков, фильтрация спекл-шума, радиометрическая калибровка и нормализация, геокодирование и ортотрансформирование, расчёт изображения когерентности, поляриметрическая декомпозиция
5	Системы съёмки Земли из космоса	Обзор космических радиолокационных систем, в том числе перспективных
6	Области применения радиолокационной съёмки Земли	Перечень областей применения и некоторых задач, наиболее часто решаемых с использованием радиолокационных данных

Второй раздел пособия «Примеры практического применения радиолокационных данных», в отличие от первого, основан на экспериментах, проведённых автором с использованием радиолокационных данных, полученных разными съёмочными системами и охватывающих разные регионы Земли. Конечно, в пособии представлен далеко не полный перечень областей применения радиолокационных данных, он определён имеющимися материалами космической съёмки на ту или иную территорию. Для каждого набора данных приведён пример решения конкретной задачи с использованием разных методов преобразования данных. Все примеры, включённые в пособие, выбраны с целью как демонстрации преимуществ радиолокационных данных (независимость от облачности, высокая чувствительность к шероховатости и диэлектрическим свойствам поверхности, возможность получения точной информации о высотах

поверхности и др.), так и с точки зрения разнообразия решаемых задач. Содержание второго раздела раскрыто в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Раздел «Примеры практического применения радиолокационных данных»

№	Материалы космической съёмки	Территория	Задача	Метод преобразования данных
1	Разновременные амплитудные снимки Radarsat-2	Астраханская область, дельта р. Волги	Определение состояния сельскохозяйственных угодий	Синтез разновременных амплитудных снимков
2	Комплексные поляриметрические данные Radarsat-2			Поляриметрическая декомпозиция
3	Разновременные комплексные интерферометрические данные ALOS/PALSAR	Ставропольский край, Шпаковский район	Выявление лесных вырубок	Синтез разновременных амплитудных снимков и изображения когерентности
4		Тверская область, Калининский район		
5	Амплитудный снимок TanDEM-X и снимок в оптическом диапазоне Landsat-5/TM (разновременные)	Дальний Восток РФ и Северо-Восток Китая	Выявление затопленных территорий	Синтез разновременных снимков в оптическом и радиоволновом диапазонах
6	Разновременные амплитудные снимки TerraSAR-X	Япония, г. Сендай		Синтез разновременных амплитудных снимков и изображения Ratio*
7	Разновременные комплексные интерферометрические данные TerraSAR-X	Австралия, скала Улуру	Построение цифровой модели рельефа (ЦМР)	Радиолокационная интерферометрия
8	Разновременные амплитудные двухполяризационные снимки Sentinel-1A	Республика Якутия, остров Котельный	Картографирование арктических природно-территориальных комплексов	Кластеризация многовременного амплитудного снимка
9	Разновременные амплитудные снимки Sentinel 1A и -1B	Кабардино-Балкария, озеро Башкара	Выявление изменений площади озера после прорыва	Синтез разновременных амплитудных снимков

*Ratio – отношение значений коэффициента обратного рассеяния двух каналов изображения

Части второго раздела пособия, посвящённые решению разных тематических задач, имеют сходный порядок изложения материала: для каждой из них приведена краткая географическая характеристика территории, ее местоположение указывается на схемах привязки снимков, для которых выбрана единая основа – цветной снимок в видимом диапазоне с интернет-портала Visible Earth [NASA Visible...], сформулирована решаемая по радиолокационным данным задача, кратко охарактеризованы свойства радиолокационных снимков, обусловленные особенностями изображённой на них местности, и методы их обработки, приведён анализ полученных результатов. Результаты тематической обработки радиолокационных снимков представлены схемами классификации и визуального дешифрирования. Для наглядного представления изучаемых объектов дополнительно использованы снимки в оптическом диапазоне, полученные в близкие сроки, приводятся наземные видовые фотографии местности.

В разделе «Литература» помимо ссылок на статьи и книги приведены ссылки на различные образовательные материалы (презентации, видеоуроки и др.), источники радиолокационных данных и программное обеспечение для их обработки.

Форма представления и оформление. Один из вариантов пособия представлен в бумажном виде в виде набора страниц формата А3.

Для возможности ознакомления с пособием широкой аудитории было решено оформить его в электронном виде с последующим размещением в сети Интернет (как, например, разработанное ранее в лаборатории аэрокосмических методов электронное пособие по применению снимков в тепловом инфракрасном диапазоне [Использование космических...]). Такой вариант представляет собой набор страниц, написанных на языке гипертекстовой разметки HTML (HyperText Markup Language), переход между которыми осуществляется посредством гиперссылок.

В первую очередь был разработан общий для всех страниц макет (рис. 4.3). Размещение основного содержания предусмотрено в центральной части страницы

для удобства восприятия читателем. В левой части центрального блока расположено оглавление, позволяющее перемещаться между разделами пособия. При нажатии на название каждого раздела раскрывается название входящих в него подразделов. В нижней части каждой страницы размещена клавиша, позволяющая вернуться в её верхнюю часть.

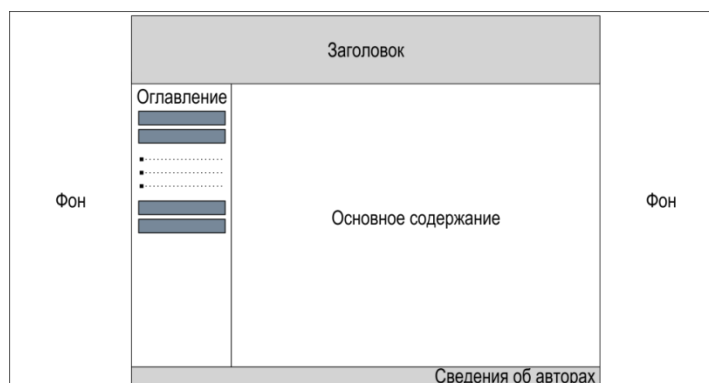


Рис. 4.3. Макет страниц пособия

Для всех страниц использовано единое графическое оформление. В целом, для пособия выбран достаточно простой дизайн, чтобы оформление не отвлекало читателя от основного содержания страниц. Основные используемые цвета – белый, чёрный и различные оттенки серого. Используются различные размеры шрифта: самый крупный – для основного заголовка с последующим уменьшением по мере перехода на более низкий иерархический уровень. В основном тексте курсивом выделены гиперссылки на сторонние источники, которые могут быть полезны для работы с радиолокационными данными. Для удобства просмотра изображений предусмотрена возможность увеличения их масштаба. Используются цветные рамки, объединяющие разнообразные материалы (текст, иллюстрации, снимки) в единый блок, что облегчает усвоение материала. В качестве фона используется радиолокационный снимок высокого пространственного разрешения, также пригодный для дополнительного изучения. Оформление стартовой страницы продемонстрировано на рисунке 4.4.

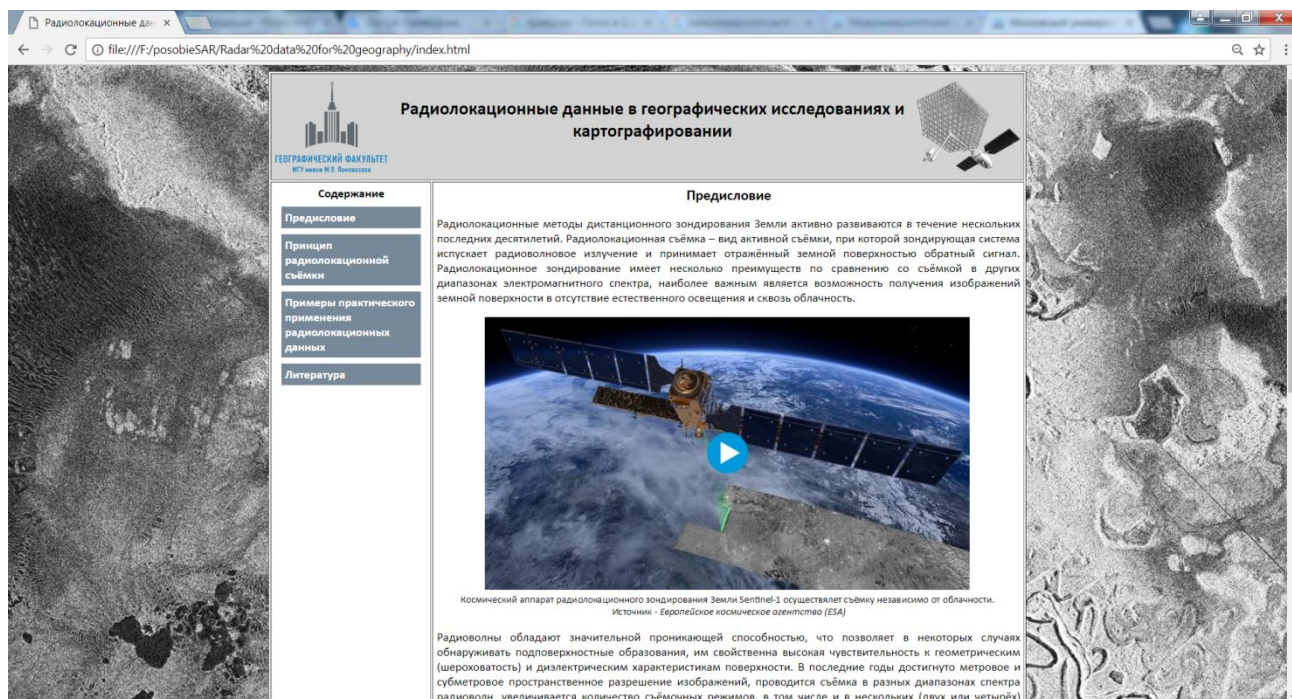


Рис. 4.4. Стартовая страница пособия

Разработанное пособие имеет учебно-методическую направленность, может использоваться во время лекционных и практических занятий студентами бакалавриата и магистратуры, а также для самостоятельного изучения всеми заинтересованными специалистами в различных областях наук о Земле. Ознакомиться с материалами пособия можно на сайте кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ в разделе «Учебные материалы» (<http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/radiolocation/>).

4.3. Выводы

1. Наглядные методические атласы и пособия по практическому использованию материалов космических съёмок давно используются как средство распространения новых географических знаний. Существует большое число атласов радиолокационных снимков и электронных пособий, посвященных радиолокационной съёмке, созданных зарубежными космическими агентствами, разработчиками программного обеспечения. В России наиболее известен электронный ресурс «Вики-фотограмметрия», один из разделов которого посвящен вопросам интерферометрической обработки РЛ данных. Однако существующие пособия из-за перегруженности специальной терминологией и техническими деталями часто сложны для восприятия исследователями, не

работавшими ранее с данными космических съёмок в радиоволновом диапазоне, что обусловило необходимость разработки специальных наглядных материалов, адаптированных для географов.

2. Опыт работы с радиолокационными данными обобщен в виде учебно-методического наглядного пособия, в котором систематизированы особенности выполнения съёмок при разных режимах работы систем, виды получаемых изображений, возможности их преобразования и дешифрирования. Поскольку для географов чрезвычайно важна опора на зрительные образы, особое внимание уделено формированию наглядных производных изображений на основе амплитудных радиолокационных снимков, поляриметрических и интерферометрических данных. На наиболее типичных примерах проиллюстрированы возможности применения материалов радиолокационных съёмок в географических исследованиях и при создании карт. Разработанное пособие призвано расширить круг пользователей радиолокационными данными, ознакомить географов с новым инструментом, материалы которого возможно использовать для решения географических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая работа позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Космическое радиолокационное зондирование Земли – динамично развивающееся на протяжении нескольких последних десятилетий направление. Несомненным преимуществом материалов радиолокационных съёмок перед дистанционными данными оптических съёмочных систем является возможность получения изображения местности в любую погоду и при любых условиях освещения. На радиолокационных изображениях проявляются особенности местности, которые не видны на снимках в оптическом диапазоне, связанные преимущественно с её геометрическими и диэлектрическими свойствами. 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 нефтяных загрязнений акваторий, картографирование лесной растительности, в том числе запаса фитомассы, высот поверхности и их изменений. Вопросы использования радиолокационных данных в других областях тематического картографирования проработаны 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; классификацию производных изображений при разных параметрах с последующим выбором оптимального варианта; создание векторной карты на основе результата кластеризации 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. Как правило, при их возрастании увеличиваются и значения УЭПР. Обратное рассеяние от участков 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 природных особенностей, 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 автоматизированной классификации, в более сложных случаях требуется сочетание втоматизированного 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. При создании карты сельскохозяйственных угодий дельты Волги радиолокационные изображения Radarsat-2 использовались как самостоятельный источник преимущественно для формирования одного тематического слоя карты, характеризующего современное состояние залежей – неиспользуемых сельскохозяйственных земель. При создании карты природно-территориальных комплексов острова Котельный основная часть контуров была выделена именно по многовременному радиолокационному снимку Sentinel-1A, однако при их интерпретации существенную роль играл обширный комплект пространственно-координированных дополнительных источников.

5. Активное развитие радиолокационных космических съемочных систем и появление общедоступных изображений Земли в радиоволновом диапазоне обуславливают актуальность более широкого знакомства с ними географов. 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 в географических исследованиях и для создания карт.

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.

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.

Список литературы

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / Под ред. Г. А. Романенко. – М.: «Росинфеормагротех», 2008. – 64 с.
2. Атлас поверхности Венеры. - М.: ГУГК при Совете Министров СССР, 1989. – 358 с.
3. Бакун О., Евтушенко Н., Иванов А., Филимонова Н. Многолетний спутниковый контроль экологической обстановки в северной части Каспийского моря // Земля из космоса. – 2015. – №4(20). – С. 27-31
4. Балдина Е.А., Тутубалина О.В., Чалова Е.Р. Опыт межуниверситетского аэрокосмического центра по использованию Интернет для образования в области аэрокосмических методов географических исследований // Труды конференции «Научный сервис в сети Интернет». – Новороссийск, 23-28 сентября 2002 г. – С. 107-109
5. Балдина Е. А., Чеснокова О.А. Радиолокационное зондирование Земли для географических исследований // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2011. – № 1. – С. 16-21.
6. Бармин А. Н., Иолин М. М., Стебенькова М. А. Виды антропогенного воздействия и стратегия оптимизации природопользования Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги для устойчивого развития // Изменения природно-территориальных комплексов в зонах антропогенного воздействия. – М.: Медиа-Пресс, 2006. – С. 172-188.
7. Бахтинова Е.В., Никольский Д.Б., Соколов А.Ю., Кантемиров Ю.И. Полуавтоматическое выявление вырубок леса на мультитременных радарных и радарно-оптических цветных композитах // Геоматика. – 2012. – №1. – С. 52-55.
8. Берлянт А.М., Лурье И.К., Тутубалина О.В., Чалова Е.Р. Концепция университетского инновационного географо-картографического образования // Вест. Моск. Ун-та. Серия 5: География. – 2009. – №2. – С. 6-12.
9. Брыксин В.М., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Использование радарных изображений и DInSAR-PSInSAR технологии для мониторинга Западной Сибири и

- Арктики // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – 2012. – №6. – 53 с. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/text.pdf>.
10. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / [Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.]; Под ред. В.С. Вербы. - М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
 11. Голуб В. Б., Сорокин А. Н., Мальцев М. В., Чувашов А. В. Почвы и растительность многолетней залежи в дельте р. Волги // Вест. Волжского университета имени В. Н. Татищева. – 2012. – № 3. – С. 308-317.
 12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист S-53-55 – Новосибирские острова. Объяснительная записка. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. – 208 с.
 13. Гусев М.А., Денисов П.В., Кирбижекова И.И., Дмитриев А.В. Базовые продукты дистанционного зондирования Земли на основе радиолокационных данных // Вестник СибГАУ. – 2013. – №5 (51). – С. 82-85.
 14. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Методика и результаты: Атлас / АН СССР, Ин-т косм. исслед., МГУ, Геогр. фак., АН ГДР, Центр. ин-т физики Земли; Отв. ред. Р.З. Сагдеев. - М.-Берлин: Наука: Академи-Ферлаг, 1982. – 83 с.
 15. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Сканирующая система «Фрагмент». Методика и результаты. М.-Берлин, 1988.
 16. Дешифрирование морского льда дальневосточных морей по данным радиолокационного зондирования. Методическое пособие / под ред. З.И. Мироненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 56 с.
 17. Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом Алмаз-1. – М: ГЕОС, 1999. – 116 с.
 18. Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Гусев М.А., Дагуров П.Н., Емельянов К.С., Захаров А.И., Кирбижекова И.И. Базовые продукты зондирования Земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли из космоса. – 2014. – №5. – С. 83-91.

19. Елсаков В.В. Развитие системы спутникового мониторинга экосистем европейских тундр с использованием данных SAR/ERS-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – т. 5. – №2. – С. 483-488.
20. Захаров А.И., Захарова Л.Н. Применение интерферометрии для мониторинга районов добычи и транспортировки нефти и газа // ROGTEC: Российские нефтегазовые технологии. – 2006. – Вып. 5. – С. 58-67.
21. Захаров А.И., Ковалевский Н.П., Синило В.П. Особенности методов обработки радиолокационной космической информации // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – №5 (78). – С. 108-113.
22. Захаров А.И. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. / А.И. Захаров, О.И. Яковлев, В.М. Смирнов – М.: КРАСАНД, 2012. – 248 с.
23. Земля – планета людей. Взгляд из космоса: Географический атлас/Редактор-составитель Э.М. Цыпина. – М.: «Варяг», 1995. – 120 с.
24. Иванов А.Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» // Исследования Земли из космоса. – 1997. – №6. – С. 70–80.
25. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). Методическое пособие. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 120 с.
26. Карвер К.Р., Элаши Ш., Улаби Ф.Т. Дистанционное зондирование из космоса в СВЧ-диапазоне // ТИИЭР: Пер. с англ. – 1985. – Т.73. – №6. – С.30-56.
27. Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы SRTM // Геопрофи. – 2010. – №1. – С. 48-51.
28. Картоведение (серия "Классический университетский учебник") / А. М. Берлянт, А. В. Востокова, В. И. Кравцова и др. – Изд-во Аспект- Пресс Москва, 2003. – С. 477.
29. Киселёва Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П., Дмитриев П.Н. Комплексирование методов анализа амплитуды и фазы спутниковых радарных снимков для оценки смещений оползневых склонов // ВМУ. Серия 3. Физика.

Астрономия. – 2015. – №4. – С. 87-94.

30. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О.Ю. Лаврова, А.Г. Костяной, С.А. Лебедев и др. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
31. Космические методы геоэкологии / В. И. Кравцова, И. А. Лабутина, Е. И. Пижанкова и др. — Географический факультет МГУ Москва, 1998. – 108 с.
32. Кравцова В. И., Митькиных Н. С. Устья рек России. Атлас космических снимков / Под ред В.М.Михайлова. – Научный мир Москва, 2013. – 122 с.
33. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
34. Лукьяненко Д.Н. Классификация земных покровов по радиолокационным изображениям на основе методов статистического текстурного анализа // автореферат дис. кандидата технических наук: 05.13.16 / Лукьяненко Дмитрий Николаевич; Алтайский гос. ун-т. - Барнаул, 2000. – 20 с.
35. Люри Д. И., Горячкин С. В., Караваева Н. А., Денисенко Е. А., Нефедова Т. Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. – М.: ГЕОС, 2010. – 416 с.
36. Маркин С.Н. Методы подавления спекл-шума в РСА-изображениях // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2008. – Вып. 10. – С. 220-222.
37. Материалы комплексного экологического обследования участков территории. Обосновывающего придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального назначения // Всемирный фонд дикой природы. – 2015 – Т.1 – 483 с.
38. Митник Л.М., Хазанова Е.С. Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 2. – С. 100-113.
39. Михайлюкова П. Г., Тутубалина О. В. Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 153–163.

40. Московский университет – Воробьёвы горы. Взгляд из космоса, с воздуха, с земли. Аэрокосмический атлас / Автор-составитель Е.Р. Чалова (при участии О.В. Вахниной); Под ред. В.И. Кравцовой. – М.: Научный мир, 2004. – 52 с.
41. Мышляков С.Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика – 2016. – №2. – 16-24 с.
42. Некос В.Е., Некос А.Н. Наземное обеспечение дистанционных исследований: наработки и перспективы // Сборник тезисов конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г. – С. 35.
43. Некос В. Е. Основы радиофизической географии. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та. – 1986. – 89 с.
44. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: Учебное пособие, эл. версия. СПб.: 1999. – 174 с.
45. Никольский Д.Б. Уровни обработки радиолокационных данных // Геоматика. – 2008. – №1. – С. 25-36.
46. Новосибирские острова. Сборник статей. / Под ред. Г. Л. Рутилевского и Р. К. Сиско. - Л.: «Мор. Транспорт». – 1963. – 233 с.
47. Новосибирские острова. Физ.-геогр. характеристика архипелага. / Под ред. Я. Я. Гаккеля. - Л.: «Гидрометеиздат». – 1967. – 212 с.
48. Применение радиолокационной аэросъемки при геолого-географических исследованиях / В.М. Глушков, В.Б. Комаров, В.А. Старостин и др.; М-во геологии СССР. Произв. геол. объединение «Аэрогеология». Лаб. Аэрометодов. – Л.: Недра, 1981. – 238 с.
49. Природа и сельское хозяйство Волго-Ахтубинской долины и дельты Волги. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 448 с.
50. Ржига О.Н. Новая эпоха в исследовании Венеры (Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). – М.: Знание, 1988. – 64 с.

51. Родионова Н.В. Влияние поляризации волны на текстурные характеристики объектов на радиолокационном изображении // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 1. – С. 12-16.
52. География из космоса: Учебно-методическое пособие / [Савиных В.П. и др.] - М.: Изд-во «Московский государственный университет геодезии и картографии». – 2000. – 224 с.
53. Исследование возможности распознавания посевов подсолнечника по данным Sentinel-1A методом искусственных нейронных сетей / Самофал Е.В., Барталев С.А. // Четырнадцатая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" 14-18 ноября 2016 / Тезисы докладов. – Москва. ИКИ РАН, 2016. – С. 393.
54. Сафьянов Г.А., Репкина Т.Ю. Цифровые модели рельефа и их значение для геоморфологии // Геодезия и картография. – 2014. – №9. – С. 41-46.
55. Синёва А.А. Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря // ТРУДЫ МФТИ. – 2014. – Том 6. – № 3. – С. 129-141.
56. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана. - М.: Наука, 1970 г. – 526 с.
57. Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Ефимов В.Б., Курекин А.С., Матвеев А.Я., Гавриленко А.Я., Бычков Д.М. Использование многочастотных радиолокационных данных для выявления геологических структур и месторождений полезных ископаемых дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №2. – С. 354-360.
58. Чалова Е.Р. Создание учебных географических атласов на основе аэрокосмических снимков // Геодезия и картография. – 1995. – №7. – С. 29-33.
59. Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Кантемиров Ю.И., Холец Ф., Барбиери М. Технология количественной оценки высоты леса по данным космических радарных тандемных интерферометрических съемок со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X // Геоматика. – 2014. – №1. – С. 72-79.

60. Abdelsalam M.G., Stern R. J. Mapping Precambrian structures in the Sahara Desert with SIR-C/X-SAR radar: The Neoproterozoic Keraf Suture, NE Sudan // *Journal of Geophysical Research*. – 1996. – Vol. 101. – No. E10. – PP. 23,063-23,076.
61. Antonova S., Duguay C.R., Kääb A., Heim B., Langer M., Westermann S., Boike J. Monitoring Bedfast Ice and Ice Phenology in Lakes of the Lena River Delta Using TerraSAR-X Backscatter and Coherence Time Series // *Remote Sens*. – 2016. – Vol. 8. – issue 11. – 903. – 23 p.
62. Argenti F., Lapini A., Bianchi T., Alparone L. A Tutorial on Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE geoscience and remote sensing magazine*. – 2013. – Vol. 1. – No. 3. – PP. 6-35.
63. Atwood D.K., Gunn G.E., Roussi C., Wu J., Duguay C., Sarabandi K. Microwave backscatter from Arctic lake ice and polarimetric implications // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. – 2015. – Vol. 53. – Issue 11. – PP. 5972-5982.
64. Bardi F., Frodella W., Ciampalini A., Bianchini S., Del Ventisette C., Gigli G., Fanti R., Moretti S., Basile G., Casagli N. Integration between ground based and satellite SAR data in landslide mapping: The San Fratello case study // *Geomorphology*. – 2014. – Vol. 223. – PP. 45–60.
65. Bartsch A., Pointner G., Leibman M.O., Dvornikov Y.A., Khomutov A.V., Trofaier A.M. Circumpolar Mapping of Ground-Fast Lake Ice // *Frontiers in Earth Science*. – 2017. – Vol. 5. – No. 12. – 16 p.
66. Birch S.P.D., Hayes A.G., Dietrich W.E., Howard A.D., Bristow C.S., Malaska M.J., Moore J.M., Mastrogiuseppe M., Hofgartner J.D., Williams D.A., White O.L., Soderblom J.M., Barnes J.W., Turtle E.P., Lunine J.I., Wood C.A., Neish C.D., Kirk R.L., Stofan E.R., Lorenz R.D., Lopes R.M.C. Geomorphologic Mapping of Titan's Polar Terrains: Constraining Surface Processes and Landscape Evolution // *Icarus*. – 2016. – Vol. 282. – PP. 214-236.
67. Chai X., Zhang T., Shao Y., Gong H., Liu L., Xie K. Modeling and Mapping Soil Moisture of Plateau Pasture Using RADARSAT-2 Imagery // *Remote Sens*. – 2015. – Vol. 7. – Issue 2 – PP. 1279-1299.
68. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthery N., Crippa B. Persistent

- Scatterer Interferometry: A review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 115. – PP. 78-89.
69. Daout S., Doin M.-P., Peltzer G., Socquet A., Lasserre C. Large scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau // Geophysical Research Letters. – 2017. – Vol. 44. – Issue 2. – PP. 901-909.
70. Farage G., Foucher S., Béné G.B. Comparison of PolSAR Speckle Filtering Techniques. IGARSS. – 2006. – PP. 1760-1763.
71. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. – 1999. – PP. 1528-1530.
72. Ford J. P., R. G., Blom, M. L., Bryan et al. Seasat Views North America, The Caribbean, and Western Europe with Imaging Radar. Publication 80-67, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif. – 1980. – 141 p.
73. Fu L.-L., Holt B. Seasat Views Oceans and Sea Ice With Synthetic-Aperture Radar. Publication 81-120, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif. – 1982. – 200 p.
74. Gibbins W.A., Slaney V.R. Preliminary Geologic Interpretation of SAR Data, Yellowknife-Hearne Lake Area, N.W.T. // Arctic. – 1991. – Vol. 44. – Supp. 1. – PP. 81-93.
75. Jensen J. Remote sensing of the Environment and Earth resource perspective. Prentice Hall. – 2006. – 608 p.
76. Jezek K.C. RADARSAT-1 Antarctic Mapping Project: change-detection and surface velocity campaign // Annals of Glaciology. – 2002. – Vol. 34. – PP. 263-268.
77. Khabazan S., Motagh M., Hosseini M. Evaluation of Radar Backscattering Models IEM, OH, and Dubois using L and C-Bands SAR Data over different vegetation canopy covers and soil depths // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2013. – Vol. XL-1/W3. – PP. 225-230.
78. Korosov A.A., Park J.-W. Very high resolution classification of Sentinel-1A data using segmentation and texture analysis // Proc. 'Living Planet Symposium 2016', Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. – August, 2016. – ESA SP-740. – 5 p.

79. Kozlenko N., Jeffries M.O. Bathymetric Mapping of Shallow Water in Thaw Lakes on the North Slope of Alaska with Spaceborne Imaging Radar // *Arctic*. – 2000. – Vol. 53. – No. 3. – PP. 306-316.
80. Kumar S., Khali U.G. Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR) and Inversion Modelling. SPIE APRS 2016 Pre-Symposium Tutorials. 2016. – 13 p.
81. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The Use of Satellite SAR Imagery to Crop Classification in Ukraine within JECAM Project. IGARSS. – 2014. – PP. 1497-1500.
82. Land Applications of Radar Remote Sensing / Ed. by F. Holecz, P. Pasquali, N. Milisavljevic, D. Closson. – Publisher: InTech. – 2014. – 318 p.
83. La T.V., Khenchaf A., Comblet F., Nahum C. Retrieval of Surface Wind Fields at High Spatial Resolutions from C-band Sentinel-1 Data // *Proceedings of BDAW '16*, November 10-11, 2016, Blagoevgrad, Bulgaria. – 2016. – 6 p.
84. Lampropoulos G., Li Y., Liu T. Advancements in estimating crop growth stages using Radarsat-2 and TerraSAR-X polarimetric data // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2015. – Vol. XL-7/W3. – PP. 1227-1232.
85. Lee J.S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambacq P., Oosterlinck A. Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review. *Remote Sensing Reviews*. – 1994. – Vol.8. – PP. 313-340.
86. Lee J.-S., Pottier E. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Published: CRS Press. – 2009. – 440 p.
87. Liu L., Zhang T., Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska // *Journal of geophysical research*. – 2010. – vol. 115. – Issue F3. – 14 p.
88. Liu Z.Y.C., Radebaugh J., Harris R.A., Christiansen E.H., Neish C.D., Kirk R.L., Lorenz R.D., the Cassini RADAR Team. The tectonics of Titan: Global structural mapping from Cassini RADAR. *Icarus*. – 2016. – Vol. 270. – PP. 14-29.
89. Lorenz R.D., Stiles B.W., Aharonson O., Lucas A., Hayes A.G., Kirk R.L., Zebker H.A., Turtle E.P., Neish C.D., Stofan E.R., Barnes J.W. A global topographic map of Titan // *Icarus*. – 2013. – Vol. 225. – PP. 367-377.

90. Manzo M., Fialko Y., Casu F., Pepe a., Lanari R. A Quantitative Assessment of DInSAR Measurements of Interseismic Deformation: The Southern San Andreas Fault Case Study // *Pure and Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 169. – Issue 8. – PP. 1463–1482.
91. Margarit G., Barba Milanés J.A., Tabasco A. Operational Ship Monitoring System Based on Synthetic Aperture Radar Processing // *Remote Sens*. – 2009. – Vol. 1. – Issue 3. – PP. 375-392.
92. Mascarenhas, N.D.A. An Overview of Speckle Noise Filtering in SAR Images // *Image Processing Techniques, First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing, Buenos Aires, 2-4 December 1996*. – 1996. – PP. 71-79.
93. McNairn H., Brisco B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review // *Can. J. Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 30. – No. 3. – PP. 525–542.
94. McNairn H., Champagne C., Shang J., Holmstrom S., Reichert G.. Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories. *ISPRS J. of Photogramm. and Remote Sens*. – 2009. – Vol. 64. – Issue 5. – PP. 434–449.
95. Minh D.H.T., Toan T.L., Rocca F., Tebaldini S., Villard L., Réjou-Méchain M., Phillips O.L., Feldpausch T.R., Dubois-Fernandez P., Scipal K., Chave J. SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 175. – PP. 138–147.
96. Moen M.-A.N., Anfinsen S.N., Doulgeris A.P., Renner A.H.H., Gerland S. Assessing polarimetric SAR sea-ice classifications using consecutive day images. *Annals of Glaciology*. – 2015. – Vol.56 – No.69 – PP. 285-294.
97. Monaldo, F. M., Thompson, D. R., Winstead, N. S., Pichel, W. G., Clemente-Colon, P., and Christiansen, M. B.: Ocean wind field mapping from synthetic aperture radar and its application to research and applied problems, *Johns Hopkins Apl. Tech. Dig*. – 2005. – Vol. 26. – No. 2. – PP. 102-113.
98. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar // *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*. – 2013. – Vol.1 – Issue. 1. – PP. 6-43.

99. Nagler T., Rott H., Hetzenecker M., Wuite W., Potin P. The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations // Remote Sens. – 2015. – Vol. 7 – Issue 7. – PP. 9371-9389.
100. Nagler T., Rott H., Ripper E., Bippus G., Hetzenecker M. Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR // Remote Sens. – 2016. – Vol. 8. – Issue 4. – 348. – 17 p.
101. Nonaka T., Ishizuka Y., Yumane N., Shibayama T., Takagishi S., Sasagawa T. Evaluation of the geometric accuracy of TerraSAR-X // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Beijing, 2008. – Vol. XXXVII. – Part B7. – PP. 135-140.
102. Ouchi K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5 – Issue 2. – PP. 716-807.
103. Paloscia S., Pettinato S., Santi E., Notarnicola C., Pasolli L., Reppucci A. Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation // Remote Sensing of Environment. – 2013. – Vol. 134 – PP. 234-248.
104. Park S.-E., Yamaguchi Y., Singh G., Bartsch A. Spatio-temporal monitoring of permafrost region using SAR remote sensing // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. - Kyoto, Japan. – 2010 – Vol. XXXVIII. – Part 8. – PP. 142-145.
105. Perissin D., Wang Z., Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2012. – Vol.73. – PP. 58-67.
106. Pulvirenti L., Pierdicca N., Chini M., Guerriero L. An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2011. – Vol. 11. – Issue 2. – PP. 529-540.
107. Radarsat-2 product format definition.: Oct.26, 2016 – issue 1/15. – 86 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docplayer.net/65868367-Radarsat-2-product-format-definition.html>.

108. Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. ESA, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/S1-Radiometric-Calibration-V1.0.pdf>.
109. Ramana, K V; Srikanth, P; Deepika, Sesha Sai M.V.R. Polarimetric Synthetic Aperture Radar data for Crop Cover Classification // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – Volume II-8. – PP. 117-121.
110. Riegler G., Henning S.D., Weber M. WorldDEM – a novel global foundation layer // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - 2015. – Volume XL-3/W2 – PP. 183-187.
111. Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B. Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet. Science. – 2011. – Vol. 333. – PP. 1427-1430.
112. Rosenqvist A., Shimada M., Chapman B., Freeman A., De Grandi G., Saatchi S., Rauste Y. The Global Rain Forest Mapping project—a review // Int. j. remote sensing. – 2000. – Vol. 21. – No. 6-7. PP. 1375-1387.
113. Santamaria C., Alvarez M., Greidanus H., Syrris V., Soille P., Argentieri P. Mass Processing of Sentinel-1 Images for Maritime Surveillance // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9. – Issue 7. – 678. – 20 p.
114. Setiyono T., Nelson A., Holecz F. Satellite based crop yield monitoring and forecasting, FAO/ADB Crop Monitoring for Improved Foods Security, Proceedings of the Expert Meeting, Vientiane. – 2014. – 12 p.
115. Silva E.A. Cartography and remote sensing in the Amazon - The Sivam Project // ISPRS Archives –ISPRS Commission IV Symposium GIS Between Visions and Applications, September 7-10, 1998. – Vol. XXXII. – Part 4 – PP. 580-585.
116. Sharov A., Nikolskiy D. Satellite Map Series of Long-term Elevation Changes on Eurasia's Northernmost Ice Caps. Proceedings of EARSeL Symposium, 3-6 June 2013. – 14 p.
117. Sharov A.I., Tyukavina A.Yu. Mapping and interpreting glacier changes in Severnaya Zemlya with the aid of differential interferometry and altimetry. Proc. 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy, 30 November – 4 December 2009. – ESA SP-677. – March 2010. – Vol.30. – 8 p.

118. Shuchman R.A., Flett D.G. Sar Measurement of Sea Ice Parameters: Sea Ice Session Overview Paper. Proceedings of the Second Workshop on Coastal and and Marine Applications of SAR, 8-12 September 2003. – 10 p.
119. Sobiech J., Boike J., Dierking W. Observation of melt onset in an Arctic tundra landscape using high resolution TerraSAR-X and Radarsat-2 data // IGARSS 2012. – PP. 3552-3555.
120. Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture retrieval // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6410. – 641001-1. – PP. 1-12.
121. Stefanski J., Chaskovskyy O., Waske B. Mapping and monitoring of land use changes in post-Soviet western Ukraine using remote sensing data // Applied Geography. 2014. – Vol. 55. – PP. 155-164.
122. Stramondo S., Vannoli P., Cannelli V., Polcari M., Melini D., Samsonov S., Moro M., Bignami C., Saroli M. X- and C-Band SAR Surface Displacement for the 2013 Lunigiana Earthquake (Northern Italy): A Breached Relay Ramp? // IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. – 2014. – Vol. 7. – No. 7. – PP. 2746-2753.
123. Strozzi T., Kouraev A., Wiesmann A., Sharov A., Wegmüller U., Werner C. Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. – Issue 3. – PP. 636-645.
124. Tan C.P., Ewe H.T., Chuah H.T. Agricultural crop-type classification of multi-polarization SAR images using a hybrid entropy decomposition and support vector machine technique // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32. – No. 22. – PP. 7057-7071.
125. TerraSAR-X Value Added Product Specification. – 2014. – 26 p.
126. van Zyl J., Kim Y. Synthetic Aperture Radar Polarimetry. – Wiley, 2011. – 312 p.
127. Wang H., Feng G., Xu B., Yu Y., Li Z., Du Y., Zhu J. Deriving Spatio-Temporal Development of Ground Subsidence Due to Subway Construction and Operation in Delta Regions with PS-InSAR Data: A Case Study in Guangzhou, China // Remote Sens. – 2017. – Vol. 9. – Issue. 10. – 1004. -19 p.

128. White L., Brisco B., Dabboor M., Schmitt A., Pratt A. A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands // Remote Sens. – 2015. – Vol. 7. – Issue 6. – PP. 7615-7645.
129. Widhalm B., Bartsch A., Heim B. A novel approach for the characterization of tundra wetland regions with C-band SAR satellite data // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 36. – No. 22. – PP. 5537-5556.
130. Woodhouse I. Introduction to Microwave Remote Sensing. – CRC Press, 2005. – 400 p.
131. Yusoff N.M., Muharam F.M., Takeuchi W., Darmawan S., Razak M.H.A. Phenology and classification of abandoned agricultural land based on ALOS-1 and 2 PALSAR multi-temporal measurements // International Journal of Digital Earth. – 2017. – Vol. 10. – Issue 2. – PP. 155-174.
132. Zakhvatkina N.Yu., Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M., Sandven s., Frolov Ye. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2013. – Vol. 51. – No. 5. – PP. 2587-2600.
133. Zhou X., Chang N.-B., Li S. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research // Sensors. – 2009. – Vol. 9. – Issue 3. – PP. 1876-1912.
134. Zhou C., Zheng L. Mapping Radar Glacier Zones and Dry Snow Line in the Antarctic Peninsula Using Sentinel-1 Images // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9. – Issue 11. – 1171. – 19 p.
135. Антарктида из космоса – Новости и события – Пресс-центр – Росгидромет. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/press/news/6706/>.
136. Вики-фотограмметрия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/wiki>.
137. Использование космических снимков в ИК-диапазоне для географических исследований. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/start.htm.
138. ИФЗ РАН: Мониторинг здания МГУ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ifz.ru/v-otdelenie/lab-502/napravlenija-issledovanii/razrabotka-metodov->

obrabortki-i-interpretacii-dannykh-radarnoi-sputnikovoi-interferometrii/ustoichivye-otrazhateli/monitoring-zdaniya-mgu/.

139. Межуниверситетский аэрокосмический центр. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/centre.htm>.

140. Погода в 243 странах мира. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rp5.ru/>.

141. Роскосмос из-за недостатка финансирования откажется от разработок новых спутников ДЗЗ - Космос – ТАСС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tass.ru/kosmos/3782150>.

142. Airbus Defence and Space: Geo-Intelligence - Satellite Imagery & Maps, Geospatial Services, Geoinformation Products, Elevation data & 3D. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intelligence-airbusds.com/>.

143. Asia Rice Crop Estimation and Monitoring (Asia-RICE). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geoglam.org/index.php/en/global-regional-systems-en/asiarice>

144. BIOMASAR.org: About BIOMASAR. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biomasar.org/>.

145. Comisión Nacional de Actividades Espaciales – SAOCOM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.conae.gov.ar/index.php/english/catalog/image-catalog/223-conae-en/satellite-mission/saocom/469-saocom>

146. EarthExplorer. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

147. Forest Dragon. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forestdragon2.uni-jena.de/home.html>.

148. Front | SAR-EDU. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://saredu.dlr.de/>.

149. Index. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earth.esa.int/handbooks/asar/toc.html>.

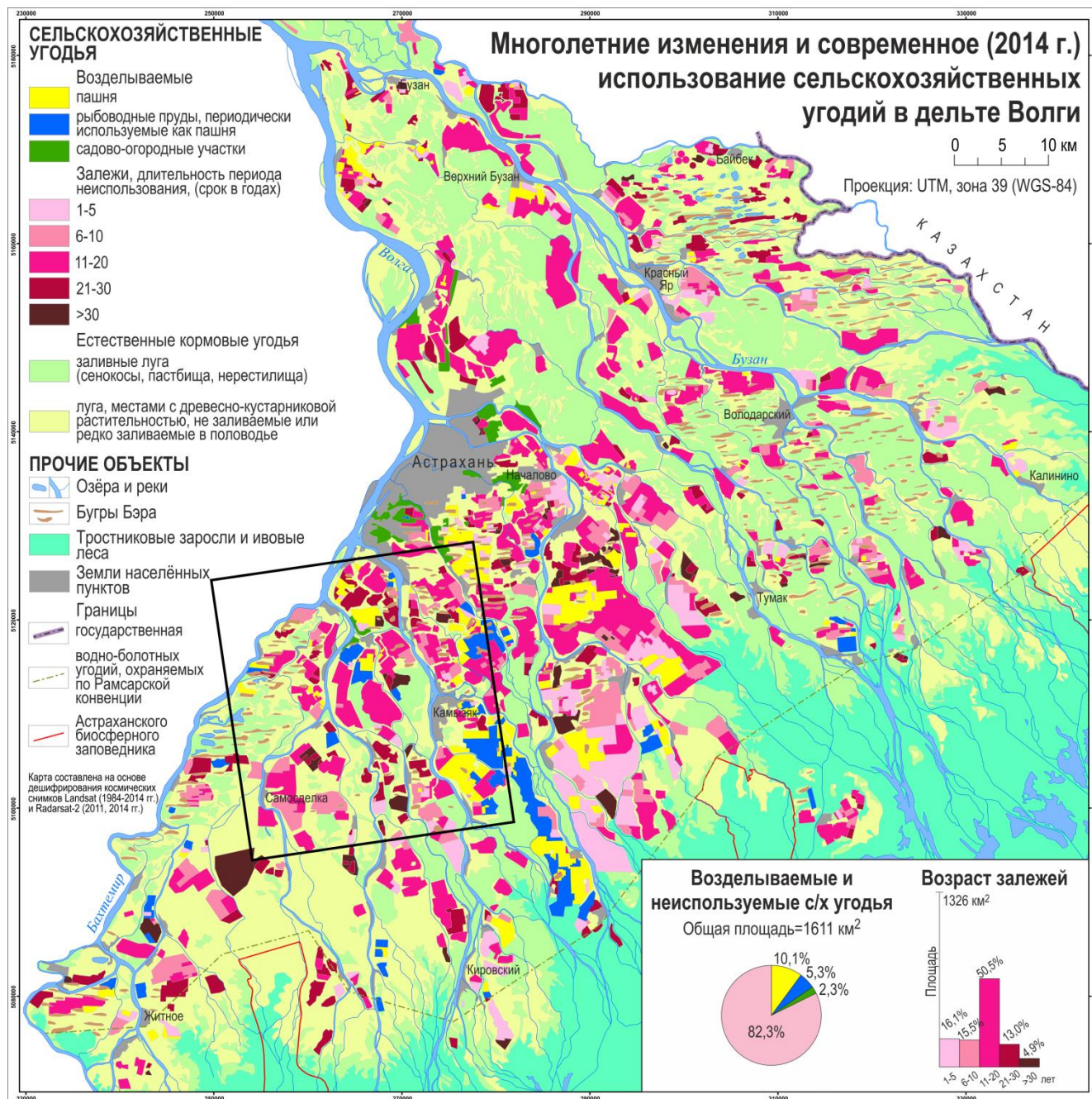
150. List of Charter Activations - International Disasters Charter. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://disasterscharter.org/web/guest/activations/charter-activations>.

151. MAIRES – Monitoring Arctic Land and Sea Ice from Russian and European Satellites. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dib.joanneum.at/maires/index.php?page=atlas>.
152. NASA Visible Earth. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=57752>.
153. Polarimetry Tutorial | PolSARpro | ESA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earth.esa.int/web/polsarpro/polarimetry-tutorial>.
154. Radar Basics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radartutorial.eu>.
155. Sarmap – Your Information Gateway. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sarmap.ch/page.php?page=tutorials>.
156. Satellite Missions Directory – Earth Observation Missions – eoPortal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.
157. Scientific Data Hub. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scihub.copernicus.eu/>.
158. Sentinel Online – ESA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinels.copernicus.eu>.
159. Sentinel-1 speeds up crop insurance payouts / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1_speeds_up_crop_insurance_payouts1_speeds_up_crop_insurance_payouts.
160. SIBERIA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siberia1.uni-jena.de/>.
161. Siberia II – Project Website. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siberia2.uni-jena.de>.
162. SMARAGD - Satellite Monitoring And Regional Analysis of Glacier Dynamics in Franz Josef Land. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dib.joanneum.at/smaragd/>.
163. TREmapsTM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tremaps.tre-altamira.com>.

164. Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing | Natural Resources Canada. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nrcan.gc.ca/node/9309>.
165. Waterloo makes public most complete Antarctic map for climate research | Waterloo News University of Waterloo. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uwaterloo.ca/news/news/waterloo-makes-public-most-complete-antarctic-map-climate>.

Приложения

Приложение А. Карта «Многолетние изменения и современное (2014 г.) использование сельскохозяйственных угодий в дельте Волги» масштаба 1:250 000 (уменьшена)



Чёрным прямоугольником выделен участок, для которого составлена карта масштаба 1:100 000, отображающая также современное состояние неиспользуемых сельскохозяйственных угодий (рис. 3.4).

Приложение Б. Вариант табличной легенды карты природно-территориальных комплексов острова Котельный

Природно-территориальные комплексы		Интенсивность обратного рассеяния в ГГ-поляризации на разносезонных радиолокационных снимках С-диапазона								
		высокая (-5...-10 дБ) зимняя и летняя	умеренная (-10...-15 дБ), возрастающая до высокой (-5...-10 дБ) зимняя и сильно изменчивая умеренная и низкая (<-10 дБ) летняя	умеренная (-10...-15 дБ) зимняя и высокая (-5...-10 дБ) летняя	умеренная (-10...-15 дБ) зимняя и летняя	умеренная (-10...-15 дБ) зимняя и сильно изменчивая умеренная и низкая (<-10 дБ) летняя	умеренная (-15...-20 дБ) зимняя и умеренная (-10...-15 дБ) летняя	умеренная (-15...-20 дБ) зимняя и сильно изменчивая умеренная и низкая (<-15 дБ) летняя	умеренная (-15...-20 дБ) зимняя и сильно изменчивая низкая (<-20 дБ) летняя	низкая (<-20 дБ), слабо изменчивая зимняя и сильно изменчивая летняя
Приливные осушки										
Косы	песчаные									
	галечные									
Прибрежная низменная равнина высотой до 4 м, периодически заливаемая морем во время высоких приливов и нагонов (лайда), с тундровой растительностью										
Прибрежная низменная равнина высотой до 8 м с термокарстовым расчленением и болотной растительностью										
Первая морская терраса высотой до 10 м с растительностью песчаных арктических пустынь	плоская, местами слабоволнистая, с золовым микрорельефом, высотой до 3 м									
	плоская, местами слабоволнистая, с золовым микрорельефом, высотой 3-10 м									
	безрусловые долины временных водотоков с эрозийным и золовым микрорельефом									
	золовые холмы									
Вторая морская терраса высотой 10-25 м	с преимущественно эрозийным расчленением и растительностью песчаных полярных пустынь									
	с преимущественно эрозийным расчленением и тундровой растительностью									
	с преимущественно термокарстовым расчленением и тундровой растительностью									
	с преимущественно термокарстовым расчленением и болотной растительностью									
Низменные равнины высотой до 50 м, сложенные «ледовым комплексом»	с умеренной степенью эрозийно-термокарстового расчленения и тундровой растительностью									
	с высокой степенью эрозийного расчленения и разреженной тундровой растительностью									
Долины рек с болотной растительностью										
Днища и склоны термокарстовых котловин (аласов) с болотной растительностью										
Плоские и пологонаклонные низменные равнины высотой 50-100 м с тундровой растительностью										
Платообразные возвышенные равнины высотой 100-300 м с растительностью горных арктических пустынь	сильно расчленённые пологоволнистые									
	слабо расчленённые плоские и пологонаклонные									
Округловершинные выпуклые гребни (горы) высотой 300-374 м, практически лишённые растительности										
Озёра	мелкие, промерзающие до дна в зимний период									
	глубокие, не промерзающие до дна в зимний период									



Водотоки постоянные (а) и временные (б)

361 Отметки высот, м

Приложение В. Возможность использования спутниковых радиолокационных данных для общегеографического и тематического картографирования (классификация карт – по [Картоведение, 2003])

В таблице представлены направления картографирования, где одним из источников информации могут являться космические снимки разного типа. Зелёным цветом обозначены те области картографирования, в которых материалы радиолокационной съёмки возможно использовать как самостоятельный источник данных для создания карт; жёлтым – те области, в которых использование РЛ данных возможно при их совместном использовании с дополнительными источниками (или для получения ограниченного набора картографируемых показателей); красным – где использование РЛ данных невозможно.

КАРТЫ												
Общегеографические	Тематические											
	Природы									Социально-экономические		Эколого-географические
	Геологические	Геофизические	Рельефа	Метеорологические и климатические	Гидрологические	Океанологические	Почвенные	Ботанические	Общие физико-географические	Хозяйства	Населения	
	топографические суши	структурно-геологического районирования	сейсмометрические	гипсометрические	условий увлажнения	гидрографические	гидрографические	физико-механических свойств почв	современного растительного покрова	ландшафтные	транспорта**	
морские навигационные	тектонические и неотектонические		морфометрические и морфографические	ветрового режима*	ледового режима и гидрологических явлений	загрязнения океана	генетических типов почв	восстановленного растительного покрова	нарушения природной среды и природного риска	сельского хозяйства		результатов и последствий воздействия на среду
топографические шельфа	четвертичных отложений		геоморфологические (общие и отдельных процессов)	атмосферных явлений*	загрязнения вод	динамики водных масс		фенологические		лесного хозяйства		факторов воздействия на окружающую среду в целом и на отдельные ее компоненты
	гидрогеологические		батиметрические	термического режима	снежного покрова	физических свойств				продуктивности растений		
	сейсмичности и вулканизма				физико-химических характеристик вод	флоры и фауны морей и океанов				нарушенности растительного покрова		
	полезных ископаемых					гидрохимические				отдельных видов растений и растительных ассоциаций		

* - над поверхностью океана
** - судовой обстановки