

УДК 528.8.044.2

Е.А. Балдина¹, П.Г. Михайлюкова², К.А. Трошко³

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ

Радиолокационные изображения Земли из космоса, несмотря на более чем тридцатилетнюю историю их получения и использования, не нашли столь же широкого применения при создании тематических карт, как снимки в оптическом диапазоне, что связано с их меньшей до недавнего времени доступностью, сложностью визуального анализа и обработки. Стремительное увеличение объема открытых радиолокационных данных после запуска спутников Sentinel-1 обуславливает актуальность исследований, нацеленных на разработку методов тематического картографирования на их основе. Представлены результаты работ, проведенных за последние годы в лаборатории аэрокосмических методов с использованием космических радиолокационных данных со спутников Radarsat-2 и Sentinel-1. На примере нескольких направлений исследований и территорий, среди которых сельскохозяйственные земли в дельте Волги, динамика рельефа Толбачинского дола (Камчатка), современные природно-территориальные комплексы арктического острова Котельный (архипелаг Новосибирские острова), показана возможность получения уникальных характеристик географических объектов. Разнообразие типов радиолокационных данных, включающих многополяризационные, интерферометрические и многовременные, позволяет в полной мере использовать для характеристики и картографирования территорий признак изменчивости состояния объектов, а также геометрические свойства поверхности. Разработаны методики обработки радиолокационных данных, нацеленные на создание тематических карт. Обоснована возможность создания карт на основе предлагаемых методик.

Ключевые слова: радиолокационные данные, обработка изображений, многовременные данные, поляриметрия, интерферометрия, тематические карты

Введение. Радиолокационная съемка – вид аэрокосмической съемки, осуществляемой активным микроволновым датчиком, способным излучать и принимать отраженные земной поверхностью радиоволны. Ввиду особенностей технологии радиолокационной съемки, она позволяет получать изображения вне зависимости от облачности и от условий освещения земной поверхности. При взаимодействии испускаемого радиоизлучения с поверхностью параметры сигнала меняются в зависимости от ее радиофизических и структурных характеристик, а отраженный сигнал несет информацию о них. Чувствительность к диэлектрическим и геометрическим свойствам наблюдаемых объектов предоставляет информацию, которая может быть использована как самостоятельно, так и совместно с данными, полученными в оптическом диапазоне. При радиолокационном зондировании Земли из космоса наиболее активно используются сантиметровые и дециметровые диапазоны длин волн: X, C и L (соответствующий диапазон длин волн – от 3 до 23 см). Трансформация поляризации электромагнитной волны при отражении также является информативным признаком.

Радиолокационные данные имеют и определенные недостатки: геометрические и яркостные искажения в районах с расчлененным рельефом, зерни-

стость изображения (спекл-шум). Затруднения при интерпретации радиолокационных снимков вызывает влияние на формирование изображения большого количества одновременно действующих факторов. Сложность восприятия и специфичность обработки радиолокационных изображений (РЛИ), их относительно ограниченная до недавнего времени доступность обуславливают тот факт, что эти данные в гораздо меньшей степени используются для географических исследований и тематического картографирования, чем снимки в оптическом диапазоне. Важно подчеркнуть, что развитие методов радиолокации и их применение на протяжении десятилетий осуществлялось преимущественно специалистами в области физико-математических и технических наук и военными. Представители этих наук занимаются их продвижением и в науки о Земле, используя в большинстве случаев радиофизическую терминологию, не имеющую «перевода» на язык природоведов. Отмечалась [Балдина, Чеснокова, 2011] необходимость внедрения радиолокационных данных в учебный процесс на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, а также актуальность совершенствования учебных программ в области дистанционного зондирования и расширения набора используемых данных [Книжников, 2014].

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: baldinaea@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики, вед. инженер; e-mail: polinam_20@mail.ru

³ Институт географии РАН, лаборатория картографии, млад. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: k.a.troshko@igras.ru

За несколько десятилетий разработки и использования радиолокационных систем съемки Земли выявлена возможность применения таких данных в самых разнообразных областях наук о Земле: в геологии, гидрологии, океанологии, сельском, лесном и городском хозяйстве, при мониторинге чрезвычайных ситуаций и археологических изысканиях [Никольский, 2008; Ouchi, 2013; и др.]. Проведенные авторами за несколько последних лет исследования охватывают различные тематические направления и географические районы, позволяют продемонстрировать эффективность применения современных данных радиолокационного зондирования для создания тематических карт.

Постановка задачи. Характеристика радиолокационных данных и методов их обработки. Информация о радиофизических свойствах объектов земной поверхности содержится в амплитуде сигнала (аналог яркости на снимках в видимом и инфракрасном диапазонах); в фазе, описывающей состояние волны в данный момент времени; в поляризации, определяемой направлением вектора напряженности электрического поля; времени прохождения сигнала, определяющего расстояние до поверхности. Разнообразные методы обработки сигналов, ориентированные на исследование отражающих свойств зондируемой поверхности, базируются на анализе этих характеристик [Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Захаров с соавт., 2014].

1. *Амплитудная информация* чаще всего представляется в виде снимка, она используется для распознавания и характеристики объектов земной поверхности на основе значений коэффициента обратного рассеяния σ_0 (или удельной эффективной поверхности рассеяния – УЭПР).

2. *Фазовая составляющая* радиолокационных данных является базовой для методов *интерферометрии (InSAR – interferometric SAR)*, она позволяет получать сведения о высотах поверхности [Massonnet, Feigl, 1998]. Выделяют несколько методов интерферометрической обработки. Так, дифференциальная интерферометрия (**DinSAR – differential SAR interferometry**) – метод, использующий результаты нескольких повторных съемок (минимум двух), полученных через фиксированные интервалы времени. Он позволяет точно и детально вычислять изменения высоты поверхности. В последнее время особое развитие получили методы **PS (Persistent Scatterers – метод постоянных рассеивателей)** и **SBAS (Small Baseline Subset – метод малых базовых линий)**, использующие большие массивы данных (несколько десятков съемок), что позволяет определять смещения с точностью до миллиметров [Crosetto et al., 2016; Manzo et al., 2012].

3. *Когерентный анализ* также основан на использовании *фазовой* составляющей радиолокационного сигнала. Когерентность является мерой согласованности двух разновременных отраженных радиолокационных сигналов и характеризует стабильность поверхности объектов за период между двумя космическими съемками, что позволяет ис-

пользовать этот метод для картографирования динамики природных и антропогенных объектов.

4. *Радиолокационная поляриметрия (PolSAR – Polarimetric SAR)* позволяет различать и характеризовать объекты на основе информации о механизмах рассеяния ими радиоволн по изображению, полученным на разной поляризации радиосигнала [Lee, Pottier, 2009].

Таким образом, специальные методы обработки радиолокационных данных позволяют извлекать уникальную информацию, характеризующую состояние объектов в определенные моменты времени, что служит новым источником информации для создания карт.

Территории и задачи картографирования. Исследование свойств различных радиолокационных данных проводилось на примере нескольких территорий и решаемых задач. Первой из них было северо-западное побережье Каспийского моря и дельта Волги, природные комплексы которых изучались еще с конца 1990-х гг. [Kucheryavenkova et al., 2000; Балдина, 2005; Кравцова, 2006]. Исследования в дельте Волги проводились и по другим материалам дистанционного зондирования разных спектральных диапазонов и пространственного разрешения, что позволило использовать эту территорию как эталонный (тестовый) полигон с известными свойствами для оценки информационных свойств разновременных РЛИ на разных поляризациях.

Возможности и пути использования материалов интерферометрической обработки в картографировании исследованы на примере Толбачинского Дола на Камчатке, где в 2012–2013 годах произошло крупное трещинное извержение, получившее название Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия ИВиС ДВО РАН (сокращенно – **ТТИ-50**). В результате извержения сформировались три лавовых поля: в первые месяцы (27 ноября 2012 г. – январь 2013 г.) образовались Водопадное и Ленинградское поля, а после, вплоть до последних чисел августа 2013 г., происходило формирование Толудского лавового поля [Гордеев и др., 2013; Belousov et al., 2015].

Остров Котельный (архипелаг Новосибирские острова) выбран для демонстрации преимуществ космических радиолокационных снимков при исследовании, мониторинге и картографировании арктических районов, для оценки информационных свойств новых радиолокационных данных Sentinel-1. Этот остров состоит из трех частей, существенно различающихся природными особенностями: западная часть о. Котельный, наиболее возвышенная, значительную ее долю занимает плато с абсолютными высотами более 100 м; Земля Бунге – центральная часть, – представляющая собой практически ровную низменную песчаную пустыню; и о. Фаддеевский – восточная часть – равнина с большим количеством речных долин и термокарстовых котловин.

Материалы и методы исследований. В исследованиях использованы данные со спутников Radarsat-2, полученные благодаря участию авторов

Таблица 1

Характеристика использованных радиолокационных данных и дополнительных материалов для картографирования

Территория	Съемочная система	Период съемки	Общее количество снимков	Пространств. разрешение, м	Привлечение снимков в оптическом диапазоне	Полевые обследования / дополнительные источники
Дельта Волги	Radarsat -2	4-х кратная, июнь–август 2014	16 (4 комплекта снимков на 4 поляризациях)	7,6x5,2	Landsat, Google Earth	Наземные обследования одновременно со съемками
Остров Котельный	Sentinel-1A	декабрь 2014 г. – ноябрь 2016 г.	49	40	Landsat-8, Google Earth	Нет / Литературные источники, карты
Толбачик	Radarsat-2	июнь–июль 2013 г.	12 (6 с восходящей и 6 с нисходящей орбиты)	5,2x7,7	EO1/ALI Landsat-8/OLI Terra/ASTER SPOT6/NAOMI	Наземные обследования (геодезическая съемка)

в выполнении проектов, предполагавших предоставление данных, и общедоступные с 2014 г. материалы съемки Sentinel-1 (табл. 1).

Особенности получения радиолокационных данных обуславливают их существенное отличие от снимков в видимом диапазоне, что вызывает необходимость их предварительной обработки, направленной на получение изображений, пригодных для дешифрирования. Обработка включает фильтрацию данных для устранения спекл-шумов на изображении, преобразование поляриметрических составляющих, цветовой синтез разновременных и разнополяризационных изображений. После преобразования радиолокационных данных в снимки, на которых объекты различаются по амплитуде отраженного

сигнала, возможно применение обычных методов визуального дешифрирования и автоматизированной классификации. Эти методы были применены для исследования и картографирования заброшенных и используемых сельскохозяйственных земель в дельте Волги и природно-территориальных комплексов острова Котельный. Блок-схема операций, выполняемых для подготовки радиолокационных данных приведена на рис. 1.

В результате многоступенчатой интерферометрической обработки на основе фазовой информации извлекают значения абсолютных высот местности или же относительные значения смещений земной поверхности (рис. 2), что требует привлечения данных минимум двух повторных радиолокационных

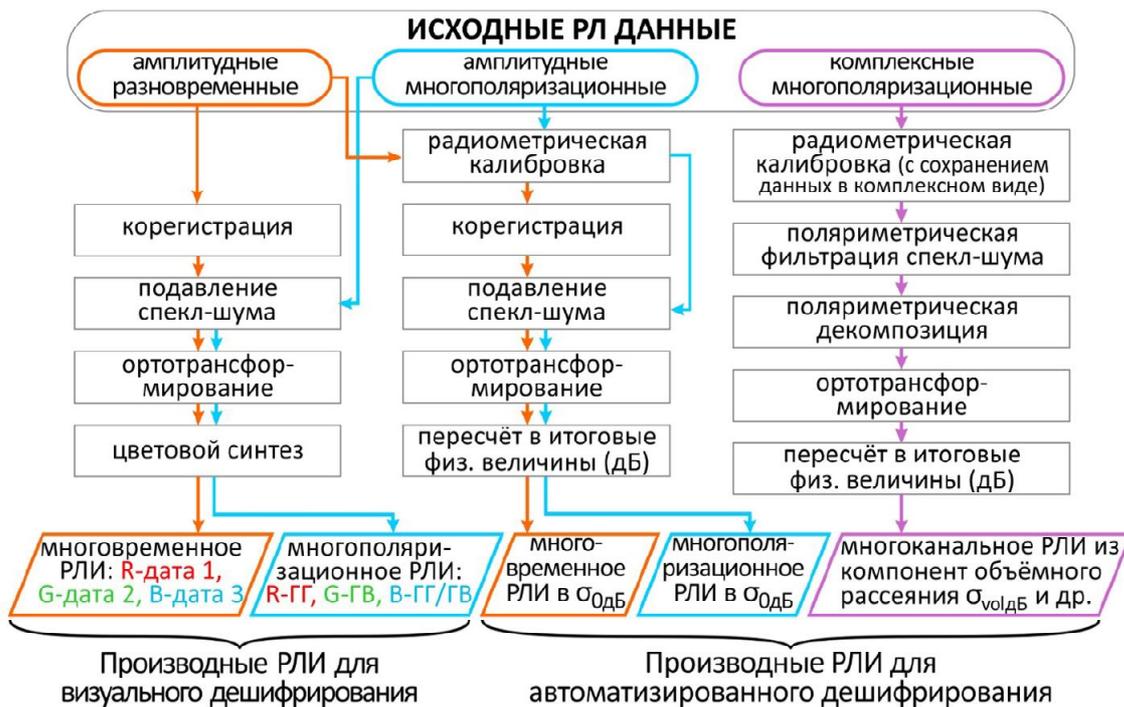


Рис. 1. Блок-схема создания производных радиолокационных изображений

Fig. 1. Flow diagram of creating the derived radar images (RI)

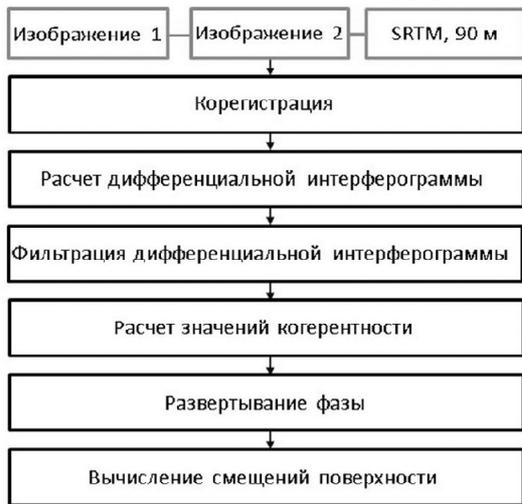


Рис. 2. Последовательность интерферометрической обработки радиолокационных данных

Fig. 2. Sequencing of interferometric processing of radar data

съемок при одинаковых параметрах. Эти результаты были использованы при создании карт динамики рельефа в зонах вулканической активности (на примере лавовых полей Толбачинского Дола) [Михайлюкова, Тутубалина, 2016].

В процессе интерферометрической обработки получают промежуточные результаты, которые также могут служить самостоятельными источниками информации о состоянии объекта: например, значения когерентности характеризуют стабильность поверхности объекта во времени. На рис. 3 максимальные значения когерентности (белый цвет) соответствуют тем участкам лавовых покровов, которые уже сформированы, в то время как низкие значения когерентности (темно-серый цвет – выделено рамкой) характеризуют активное формирование поверхности лавового поля, куда еще поступает жидкая лава.

Интерпретация картин когерентности предполагает первоначальное знание возможных процессов, происходящих с объектом, и впоследствии обеспечивает возможность создания карт изменений на этой основе. На рис. 4 приведены результаты расчета значений когерентности на территорию Толбачинского дола для двух периодов. Заметно, что значения когерентности сильно поменялись между двумя анализируемыми парами изображений (выделено рамкой), что связано с активным формированием поверхности лавы на рассматриваемом участке поля: «осветление» участка в рамке на рис 4, Б свидетельствует о прекращении активного формирования поверхности лавового поля во второй период.

Результаты исследований и их обсуждение.

При оценке состояния сельскохозяйственных земель в дельте Волги проанализированы значения коэффициента обратного рассеяния на многополяризационных снимках четырех летних сеансов съемки. Изображение полей, занятых различными сельскохозяйственными культурами, характеризуется закономерным ростом коэффициента по мере увеличения высоты и проективного покрытия растений на РЛИ, полученных на всех поляризациях (рис. 5).

Внутрисезонные различия в состоянии поверхности залежей на разновременных снимках выражены незначительно, что позволяет отделять их от существенно меняющихся в течение вегетационного периода возделываемых земель (рис. 6).

Для картографирования состояния необрабатываемых земель (залежей) на участке в дельте Волги наиболее информативными оказались снимки на перекрестной поляризации и изображение компоненты объемного рассеяния, полученное в результате поляриметрической декомпозиции, как наиболее чувствительные к характеристикам растительного покрова (высота, густота, разреженность и т. п.). Автоматизированное дешифрирование производных изображений на основе комплексных поляриметрических радиолокационных данных позволило выя-

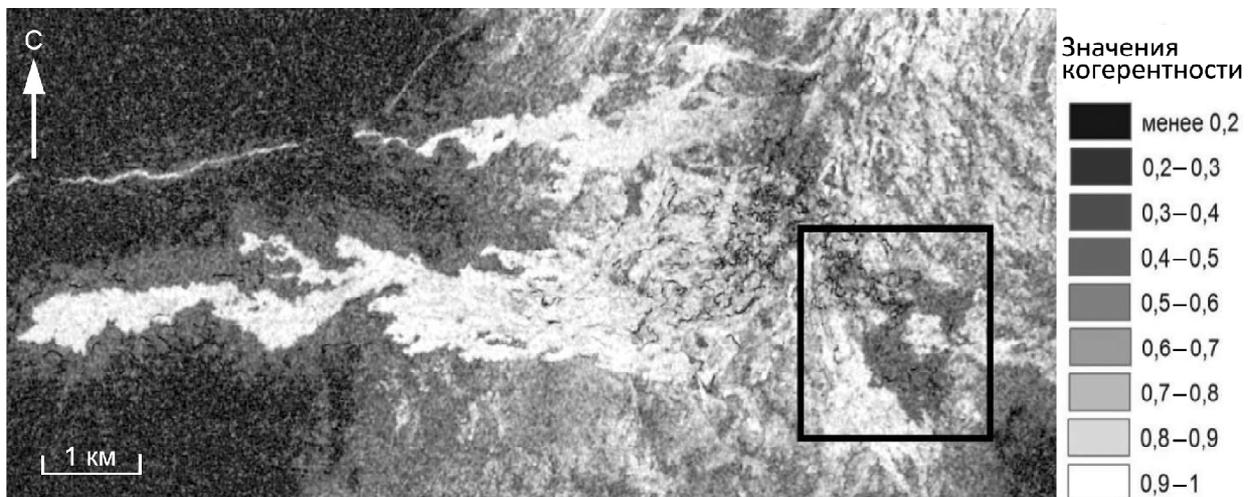


Рис. 3. Значения когерентности для лавовых полей ТТИ-50, рассчитанные по паре 23.07.2013 г.–15.08.2013 г.

Fig. 3. Coherence values for lava fields TTI-50 calculated for the pair of images (23.07.2013-15.08.2013)

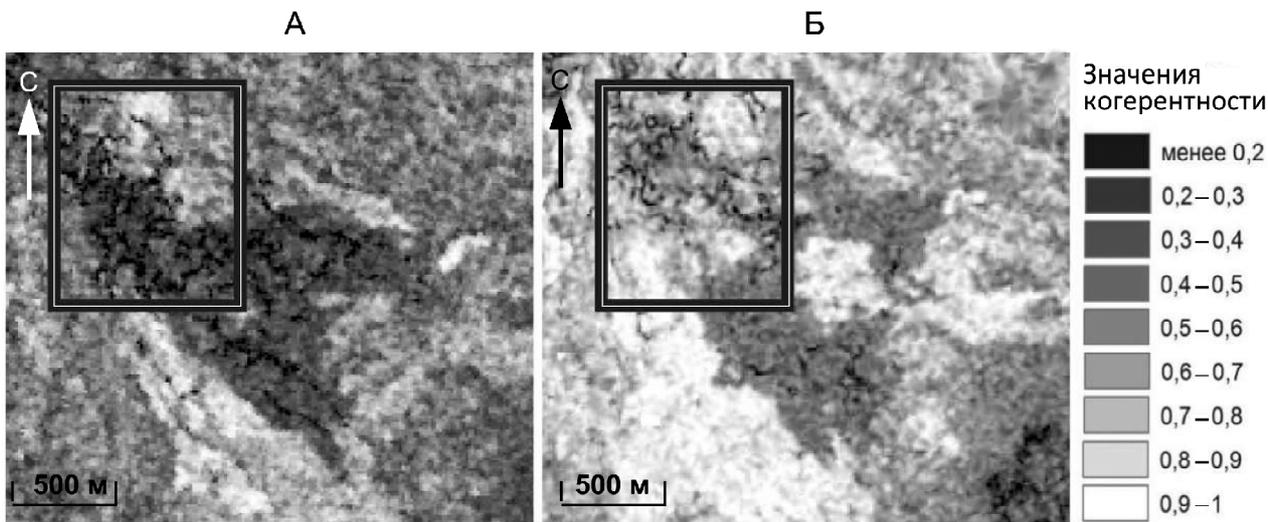


Рис. 4. Значения когерентности, рассчитанные по парам РЛИ Radarsat-2 от: А) 25.06.2013 г.–19.07.2013 г. и Б) 23.07.2013 г.– 15.08.2013 г.
 Fig. 4. Coherence values calculated for the pairs of Radarsat-2 radar images: А) 25.06.2013-19.07.2013 and Б) 23.07.2013 – 15.08.2013

вить участки неиспользуемых сельскохозяйственных угодий и оценить относительные площади залежей, подверженных опустыниванию, зарастанию древесно-кустарниковой, а также травянистой растительностью. Таким образом, карта современного использования земель в дельте Волги представляет три их характеристики: 1) виды современного (на 2014 г.) использования, 2) динамика выведения пахотных земель из оборота (возраст залежей) и 3) современное состояние неиспользуемых земель.

Анализ большого числа предварительно обработанных радиолокационных разносезонных снимков *острова Котельный* при опоре на традиционные источники сведений показал, что на яркость изображения (величину обратного радиосигнала) влияет целый комплекс особенностей этой территории: характер расчленения рельефа (эрозионное или озерно-термокарстовое) и его степень, наличие растительности разных типов (полярно-пустынной,

тундровой, болотной), тип рыхлых отложений, степень увлажнения поверхности. Прослеживание изменений отражательных свойств разных участков за двухлетний период позволило установить, что существенный вклад в величину обратного радиосигнала вносит состояние поверхности, обусловленное таянием и замерзанием сезонно-талого слоя. Наличие радиолокационных снимков, полученных в зимний период, позволило разделить неглубокие озера, промерзающие полностью, и глубокие, не промерзающие до дна [Трошко, Балдина, 2018].

На основе неконтролируемой классификации предварительно обработанного разносезонного многовременного радиолокационного снимка о. Котельный при разном количестве классов оказалось возможным выделять природно-территориальные комплексы исследуемой территории разных иерархических уровней. Так, при задании двух классов уверенно разделяются нерасчлененные

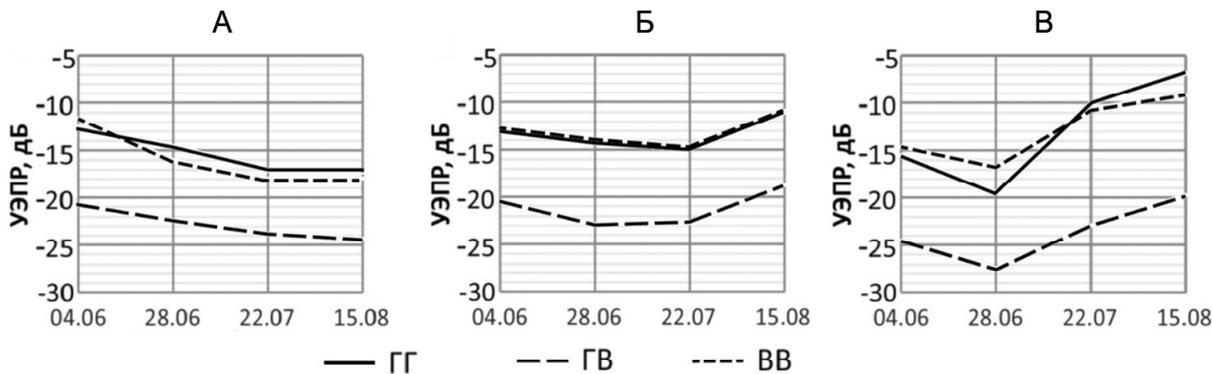


Рис.5. Сезонные изменения коэффициента обратного рассеяния на разных поляризациях (ГГ – согласованная горизонтальная, ГВ – перекрестная, ВВ – согласованная вертикальная) на участке заливного луга (А), посевов хлопчатника (Б), посевов риса (В)
 Fig. 5. Seasonal changes of the back-scatter coefficient for different polarizations (GG – coherent horizontal, GV – cross, VV – coherent vertical) for plots of floodplain meadow (А), cotton field (Б) and rice field (В)

песчаные поверхности, практически лишенные растительного покрова, и остальные участки с различной степенью эрозионного и озерно-термокарстового расчленения, преимущественно покрытые растительностью. При увеличении количества классов до пяти в западной и восточной частях острова выделяются равнинные участки с различным характером и степенью расчленения, заболоченные долины рек и термокарстовые котловины, возвышенные участки плато, в центральной части – нерасчлененная песчаная равнина и участки с преобладанием эрозионного расчленения, связанного с выходами прочных пород. Определение тематического содержания выделенных кластеров осуществлялось при опоре на графики сезонной изменчивости УЭПР эталонных участков с привлечением доступных литературных и картографических источников. Итоговая карта представляет природно-территориальные комплексы острова, характеризующиеся разным ходом сезонной изменчивости интенсивности обратного рассеяния радиосигнала, обусловленной различными сочетаниями рельефа, растительного покрова и грунтов [Балдина с соавт., 2017].

Выполненная интерферометрическая обработка РЛИ в сочетании с анализом материалов съемки в оптическом диапазоне позволила оценить возможность выявления и картографирования динамики рельефа в зонах вулканической активности. Таблица 2 представляет перечень показателей динамики рельефа вулканических районов для их картографического отображения.

Сформированный перечень картографируемых показателей (см. табл. 2) характеризует динамику рельефа вулканических областей с двух сторон: 1) нарастание самих лавовых полей в процессе извержения (формирование мезорельефа вулканического района), 2) изменение их поверхности после извержения (формирование микрорельефа лавовых

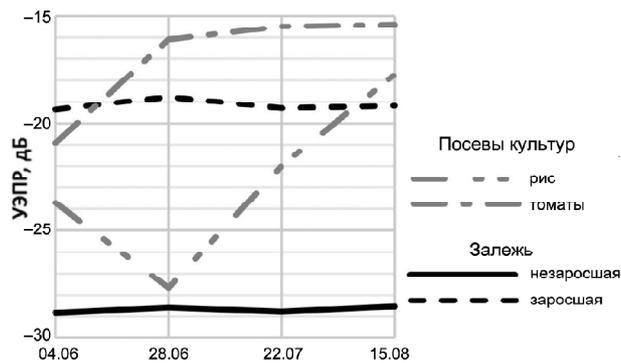


Рис. 6. Сезонные изменения коэффициента обратного рассеяния ГВ поляризации для сельскохозяйственных культур и неиспользуемых сельскохозяйственных угодий (залежей)

Fig. 6. Seasonal changes of the back-scatter coefficient of GV polarization for agricultural crops and fallow lands

полей). Это обусловило целесообразность создания двух видов карт – нарастания лавовых полей в течение извержения и формирования поверхности лавовых полей (которые могут относиться к разным временным интервалам извержения, и поэтому карт данного вида может быть несколько). Для карты нарастания лавовых полей выбрано следующее содержание: общие границы лав на ряд дат, участки увеличения мощности лавовых полей, направления движения лавовых потоков в периоды увеличения мощности, положение активных конусов ТТИ-50. Такой набор показателей позволяет наглядно передать динамику извержения. Карты формирования поверхности лавовых полей содержат следующую информацию: участки растрескивания и просадки поверхности лавовых полей, мощность лав, положение лавоводов (их проекций на поверхность). Представленный набор показателей наглядно отражает процессы формирования поверхности лавовых полей,

Таблица 2

Перечень картографируемых показателей динамики рельефа вулканических районов по материалам интерферометрической обработки РЛИ

Процесс формирования лавового поля	Картографируемый показатель	Этап интерферометрической обработки РЛИ	Возможность получения информации по снимкам в оптическом диапазоне
Динамика площади лавовых полей	Границы лавовых полей на разные даты	Расчет значений когерентности	Возможно, с ограничениями
Движение лавового материала	Направление движения лавовых потоков; положение лавоводов	Картина вертикальных просадок поверхности лавового поля	Возможно, непосредственно в период извержения
Нарастание мощности лавовых полей	Мощность лавовых полей	Цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные до и после извержения	Возможно, по ЦМР, построенным до и после извержения
Активное формирование поверхности лавовых полей	Растрескивание поверхности лавовых полей	Расчет когерентности	Невозможно
Термодинамическая усадка лавового материала	Просадки поверхности	Расчет вертикальных смещений	Невозможно

являющейся основой дальнейшего развития ландшафтов вулканических областей [Балдина с соавт., 2017].

Экспериментальные работы по созданию карт на основе радиолокационных данных позволили прийти к следующим рекомендациям:

1. Выбор радиолокационных данных для картографических задач осуществляется двумя путями: заказ новых съемок или поиск и отбор из архива. Критерии выбора материалов съемки зависят от решаемой географической задачи, особенностей картографируемой территории и предполагаемых методов обработки данных. Наряду с выбором радиолокационных данных необходим сбор дополнительных источников, причем их состав может значительно отличаться в зависимости от тематики картографирования и степени изученности исследуемой территории. В большинстве случаев важно наличие сведений о погоде (особенно об осадках и температуре воздуха).

2. Предварительная обработка радиолокационных данных необходима для их преобразования в снимки и последующего дешифрирования, поскольку в исходном виде их использовать затруднительно ввиду присущих им геометрических и радиометрических искажений, наличия спекл-шума и др. Выбор способов преобразования зависит от вида данных (от съемочного 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 способов их 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). При уверенном знании местности, наличии материалов наземных обследований возможно проведение контролируемой классификации РЛИ, в противном случае – неконтролируемой.

4. Выбор результата классификации из нескольких, полученных при разных параметрах (количество классов и собственно метод классификации), основывается на визуальной оценке дробности классов, их сопоставлении с дополнительными источниками, в частности, с материалами наземных обследова-

ний. 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 участков, выделенных в результате классификации, с реальными объектами местности на основе известных законов взаимодействия радиоволн с зондируемой поверхностью и сведений из дополнительных источников. Уточнение положения границ объектов выполняется на основе визуального дешифрирования с привлечением соответствующих производных радиолокационных изображений.

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

Выводы:

– благодаря гарантированному получению снимков с высокой периодичностью независимо от облачности и солнечного освещения радиолокационная съемка является ценным источником информации для картографирования изменчивых и труднодоступных районов. Радиолокационные данные, объем и качество которых быстро растут, при обработке специализированными методами предоставляют информацию, обеспечивающую создание тематических карт нового содержания. Так, в результате интерферометрической обработки можно получить не только количественные показатели динамики рельефа (например, смещения земной поверхности), но и качественные, характеризующие стабильность поверхности объекта в течение анализируемого периода;

– сложность восприятия исходных радиолокационных данных обуславливает необходимость создания из них преобразованных изображений, пригодных для визуального и автоматизированного дешифрирования;

– отображение местности на радиолокационных снимках зависит от множества факторов, ввиду чего необходимо использовать при их анализе снимки в оптическом диапазоне, детальные сведения о картографируемой местности и погодных условиях в момент съемки;

– появление и все более широкое распространение общедоступных материалов радиолокационных съемок Sentinel-1 обуславливает особую значимость работ, направленных на более активное использование этих данных в географических исследованиях и при создании карт.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-05-60221 и № 18-07-00816.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балдина Е.А.* Использование многовременных радиолокационных снимков со спутников ERS, ENVISAT для изучения сезонных и многолетних изменений в дельте Волги // Геоинформатика. 2005. № 2. С. 3–11.
- Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А.* Исследование возможностей применения радиолокационных данных для тематического картографирования // Вопросы географии. Сб. 144: Картография в цифровую эпоху / Отв. ред. В.М. Котляков и др. М.: Кодекс, 2017. С. 342–357.
- Балдина Е.А., Чеснокова О.А.* Радиолокационное зондирование Земли для географических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 1. С. 16–21.
- Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Волынец А.О., Мельников Д.В., Двигало В.Н.* Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
- Захаров А.И., Ковалевский Н.П., Синило В.П.* Особенности методов обработки радиолокационной космической информации // Космонавтика и ракетостроение. 2014. Т. 5. Вып. 78. С. 108–113.
- Книжников Ю.Ф.* Дистанционное зондирование и проблемы аэрокосмической подготовки университетских географов-картографов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 5. С. 80–82.
- Кравцова В.И.* Изучение изменений береговой зоны Калмыцкого побережья Каспия в связи с колебаниями уровня моря по радиолокационным снимкам со спутников ERS, ENVISAT // Геоинформатика. 2006. № 1. С. 30–41.
- 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.
- Никольский Д.Б.* Основные направления использования радиолокационных данных // Геоматика. 2008. № 1. С. 47–50.
- Трошко К.А., Балдина Е.А.* Сезонная изменчивость коэффициента обратного рассеяния по данным Sentinel-1 в применении к исследованию острова Котельный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 123–137.
- Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D.* Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 299. P. 19–34.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B.* Persistent scatterer interferometry: a review // ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing. 2016. Vol. 115. P. 78–89.
- Kucheryavenkova I.L., Zakharov A.I., Kravtsova V.I., Baldina E.A., Labutina I.A.* Observation of seasonal variations of the north Caspian coast vegetation covers based on ERS-2 SAR multitemporal data received in 1999 year // European Space Agency (Special Publication) ESA SP. Gothenburg, 2000. P. 1608–1615.
- Lee J., Pottier E.* Polarimetric Radar Imaging. From basics to applications. CRC Press, 2009. 398 p.
- 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. 2012. Vol. 169(8). P. 1463–1482. DOI:10.1007/s00024-011-0403-2
- Massonnet D., Feigl K.L.* Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // Reviews of Geophysics. 1998. Vol. 36(4). P. 441–500.
- 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(1). P. 6–43.
- Ouchi K.* Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. Vol. 5(2). P. 716–807.

Поступила в редакцию 12.01.2019

После доработки 21.03.2019

Принята к публикации 15.04.2019

Е.А. Baldina¹, P.G. Mikhaylyukova², K.A. Troshko³

**EXPERIENCE OF USING RADAR SATELLITE IMAGERY DATA
TO CREATE THEMATIC MAPS**

Despite more than 30-year history of acquisition and application the radar images of the Earth are not so widely used for thematic mapping as images in the optical range. This fact is explained by their less availability until recently, and the complexity of visual analysis and processing. The rapid increase of the open radar data amount after the launch of Sentinel-1 satellites determines the timeliness of studies aimed at developing the techniques of radar data use for thematic mapping. The results of studies carried out recently at the Laboratory of Aerospace Methods involving the radar data from the Radarsat-2 and Sentinel-1 satellites are presented. Several case studies covering different territories and areas of research, such as agricultural lands in the Volga River delta, dynamics of relief of the Tolbachinsky Dol (Kamchatka), modern natural-territorial complexes of the Kotelny Island (the New Siberian Islands), demonstrate the possibility of obtaining new characteristics of the objects. The variety of radar data types, including multi-

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Laboratory of Aerospace Methods and Remote Sensing, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: baldinaea@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Laboratory of Aerospace Methods and Remote Sensing, Leading Engineer, PhD. in Geography; *e-mail*: polinam_20@mail.ru

³ Institute of Geography, RAS, Laboratory of Cartography, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: k.a.troshko@igras.ru

polarization and multi-temporal, as well as interferometric data, makes it possible to use the variability of objects state and the geometric properties of the surface for describing and mapping of territories. Techniques for radar data processing have been developed, aimed at creating the thematic maps. The possibility of creating maps on the basis of proposed methods is validated.

Key words: radar imagery, image processing, multi-temporal data, polarimetry, interferometry, thematic maps

Acknowledgements. The study was in part financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects № 18-05-60221 and 18-07-00816).

REFERENCES

- Baldina E.A.* Ispol'zovanie mnogovremennykh radiolokacionnykh snimkov so sputnikov ERS, ENVISAT dlya izucheniya sezonnykh i mnogoletnih izmenenij v del'te Volgi [Applying multitemporal SAR images acquired by ERS and Envisat satellites to study seasonal and long-term changes in the Volga delta] // *Geoinformatika*. 2005. № 2. P. 3–11. (In Russian)
- Baldina E.A., Chesnokova O.A.* Radiolokacionnoe zondirovanie Zemli dlya geograficheskikh issledovanij [Radar sensing of the Earth for geographical research] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2011. № 1. P. 16–21. (In Russian)
- Baldina E.A., Mihajlyukova P.G., Troshko K.A.* Issledovanie vozmozhnostej primeneniya radiolokacionnykh dannykh dlya tematiceskogo kartografirovaniya [Study of the possibility of using radar data for thematic mapping] // *Voprosy geografii. Sb. 144: Kartografiya v cifrovuyu epohu / Otv. red. V.M. Kotlyakov i dr. M.: Kodeks, 2017. P. 342–357. (In Russian)*
- Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D.* Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. Vol. 299. P. 19–34.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B.* Persistent scatterer interferometry: a review // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*. 2016. Vol. 115. P. 78–89.
- Gordeev E.I., Murav'ev YA.D., Samojlenko S.B., Volynech A.O., Mel'nikov D.V., Dvigalo V.N.* Treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie v 2012–2013 gg. Pervye rezul'taty [Crack Tolbachik eruption in 2012–2013. First results] // *Doklady Akademii Nauk*. 2013. T. 452. № 5. P. 562–566. (In Russian)
- Knizhnikov Yu.F.* Distancionnoe zondirovanie i problemy aerokosmicheskoy podgotovki universitetskikh geografov-kartografov [Remote sensing and the problems of aerospace training of the university students specializing in cartography] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2014. № 5. P. 80–82. (In Russian)
- Kravcova V.I.* Izuchenie izmenenij beregovoj zony Kalmyckogo poberezh'ya Kaspiya v svyazi s kolebaniyami urovnya morya po radiolokacionnym snimkam so sputnikov ERS, ENVISAT [Study of changes in the coastal zone of the Kalmyk coast of the Caspian Sea due to sea level fluctuations based on SAR images from ERS, ENVISAT] // *Geoinformatika*. 2006. № 1. P. 30–41. (In Russian)
- Kucheryavenkova I.L., Zakharov A.I., Kravtsova V.I., Baldina E.A., Labutina I.A.* Observation of seasonal variations of the north Caspian coast vegetation covers based on ERS-2 SAR multitemporal data received in 1999 year / European Space Agency (Special Publication) ESA SP. Gothenburg, 2000. P. 1608–1615.
- Lee J., Pottier E.* Polarimetric Radar Imaging. From basics to applications. CRC Press, 2009. 398 p.
- 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*. 2012. Vol. 169(8). P. 1463–1482. DOI:10.1007/s00024-011-0403-2
- Massonnet D., Feigl K.L.* Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // *Reviews of Geophysics*. 1998. Vol. 36(4). P. 441–500.
- Mihajlyukova P.G., Tutubalina O.V.* Kartografirovanie vulkanicheskikh izverzhenij na osnove radiolokacionnoj interferometrii [Mapping of volcanic eruption based on InSAR] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. № 2. P. 153–163. (In Russian)
- 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(1). P. 6–43.
- Nikol'skij D.B.* Osnovnye napravleniya ispol'zovaniya radiolokacionnykh dannykh [The main uses of SAR data] // *Geomatika*. 2008. № 1. P. 47–50. (In Russian)
- Ouchi K.* Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5(2). P. 716–807.
- Troshko K.A., Baldina E.A.* Sezonnaya izmenchivost' koefficienta obratnogo rasseyaniya po dannym Sentinel-1 v primeneni k issledovaniyu ostrova Kotel'nyj [Seasonal variability of backscattering coefficient based on Sentinel-1 radar images: a case study of Kotelny Island] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 15. № 1. P. 123–137. (In Russian)
- Zaharov A.I., Kovalevskij N.P., Sinilo V.P.* Osobennosti metodov obrabotki radiolokacionnoj kosmicheskoy informacii [Method Particularities of a Radar Space Information Processing] // *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2014. T. 5. Vyp. 78. P. 108–113. (In Russian)

Received 12.01.2019

Revised 21.03.2019

Accepted 15.04.2019