На правах рукописи

МИХАЙЛЮКОВА Полина Геннадьевна

КОСМИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕЛЬЕФА В ЗОНАХ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

25.00.33 – картография

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный руководитель
Тутубалина Ольга Валерьевна
кандидат географических наук, доцент по специальности «Картография», ведущий научный сотрудник лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты
Захаров Александр Иванович
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиолокационных систем и методов Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Верещака Тамара Васильевна
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой картографии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Ведущая организация
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук

Защита состоится 16 марта 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета по геоморфологии и эволюционной географии, гляциологии и криологии Земли, картографии (Д-501.001.61) в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, МГУ, географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного Университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ломоносовский проспект, 27, А8.

Автореферат разослан _____ 201_ г. Отзывы на автореферат (в двух экземплярах на бланке организации, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д-501.001.61, e-mail: malyn2006@yandex.ru, факс +7(495)932-88-36.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Извержения на Дальнем Востоке России и в других районах активного вулканизма могут приводить к катастрофическому воздействию на природные процессы, населенные пункты и инфраструктуру. Они видоизменяют рельеф районов извержений, что имеет долговременные последствия для рельефообразующих и гидрологических процессов, развития растительного покрова, транспортной доступности территории, типов землепользования. Опасность вулканических процессов для человека ограничивает возможности их прямого наблюдения, и ведущую роль здесь обретают дистанционные аэрокосмические методы исследования. Наличие облачного покрова и обширных пепловых шлейфов во многих вулканически активных районах, низкая отражательная способность вулканических отложений ограничивают применение методов космической съемки в видимом и инфракрасном диапазонах. В связи с этим возникает необходимость привлечения другого источника для мониторинга динамики извержения – радиолокационных изображений (РЛИ), на которых облачность и пепловые шлейфы в значительной степени прозрачны. Определенный метод обработки РЛИ – радиолокационная интерферометрия – позволяет точно и детально исследовать динамику рельефа поверхности на основе пар снимков, полученных через фиксированные интервалы времени. Результаты исследований вулканических районов, проводимых на основе интерферометрической обработки РЛИ, в большинстве своем представляют аналитические карты, характеризующие один показатель – например, положение лавовых потоков разного возраста, мощность лав, величины смещений поверхности. При этом методы составления таких карт, оформление и тематическое содержание фактически не проработаны. Работы по картографированию формирования и динамики рельефа в вулканических районах практически отсутствуют, в то время как отображение комплекса рельефообразующих процессов на одной или нескольких картах позволит получить новую, многоаспектную, картину динамики рельефа для решения

фундаментальных и практических задач. Это делает актуальным разработку методов тематического картографирования и анализа результатов интерферометрической обработки РЛИ как источника для составления карт. Исследование возможностей такого картографирования выполнено для района Толбачинского Дола (Камчатка, Россия).

Цель диссертационной работы заключается в разработке методики картографирования динамики рельефа вулканических областей на основе метода радиолокационной интерферометрии.

Достижение сформулированной цели требует решения следующих **задач**:

1) формирование набора РЛИ для выполнения интерферометрической обработки и анализ его качества;

2) формирование набора снимков видимого и инфракрасного диапазонов для получения дополнительной информации о ходе извержения в те периоды, для которых отсутствуют РЛИ;

3) оценка точности метода радиолокационной интерферометрии;

4) анализ существующих и разработка новых методов картографирования на основе интерферометрической обработки РЛИ. Выявление преимуществ и недостатков результатов интерферометрической обработки как источника картографирования;

5) обоснование содержания и составление серии карт динамики рельефа вулканических областей;

6) изучение на основе созданных карт динамики рельефа Толбачинского Дола вследствие Трещинного Толбачинского извержения имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50).

Методологическая основа исследования и исходные материалы. В основе работы лежат научно-методические принципы картографирования, разработанные К.А.Салищевым, А.И.Спиридоновым А.М.Берлянтом, Т.В.Верещакой, С.А.Сладкопевцевым; методы географического дешифрирования и принципы обработки данных дистанционного зондирования, разработанные Ю.Ф.Книжниковым, В.И.Кравцовой,

Б.А.Новаковским, И.А.Лабутиной; методы геолого-геоморфологического анализа, разработанные Ю.Г.Симоновым, Г.И.Рычаговым, Е.К.Мархининым, А.А.Лукашовым, Г.С.Ананьевым, И.В.Мелекесцевым; методы радиолокационной интерферометрии, разработанные Г.Зебкером, Д.Массонетом, А.И.Захаровым; методы статистического анализа данных.

В основе диссертационной работы лежат исследования автора, проводимые с 2012 года, в том числе полевые работы в районе Толбачинского Дола. Основные исходные материалы – интерферометрические радиолокационные изображения, полученные радиолокатором космического аппарата Radarsat-2; материалы съемки в оптическом диапазоне, полученные системами EO1/ALI, Landsat-8/OLI, Terra/ASTER, SPOT6/NAOMI; цифровые модели рельефа SRTM, SRTM-X, ASTER GDEM; результаты полевых геодезических работ, проведенных автором в Толбачинском Долу в августе 2013 года.

Объектом картографирования являются процессы формирования лавовых полей в течение извержения и после его завершения. **Предметом** исследования – изучение возможностей применения результатов интерферометрической обработки РЛИ в качестве источника для составления карт динамики рельефа.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная методика картографирования динамики рельефа вулканических областей на основе радиолокационной интерферометрии обеспечивает составление тематических карт, на которых отображается пространственно-временна́я динамика рельефа вулканических областей.

2. Картографическое представление результатов интерферометрической обработки РЛИ предусматривает отображение динамики мезо- и микрорельефа: нарастание лавовых полей (изменение их площади и мощности с течением извержения) и процессов формирования поверхности лавовых полей (растрескивание поверхности при остывании лавы и ее просадки, положение лавоводов).

3. Составленная серия тематических карт ТТИ-50 позволяет количественно оценить пространственную и временную динамику рельефа Толбачинского Дола в результате извержения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнена оценка метода радиолокационной интерферометрии как самостоятельного источника картографирования динамики рельефа вулканических районов;

2. Обосновано использование метода радиолокационной интерферометрии для картографирования нарастания площади и объема лавовых полей в течение извержения, формирования поверхности лавовых полей во время извержения и после его окончания. Впервые определен широкий набор картографируемых показателей динамики мезо- и микрорельефа вулканических областей, который может быть получен на основе интерферометрической обработки РЛИ.

3. Предложены два новых типа карт динамики рельефа вулканических районов – карты нарастания лавовых полей и формирования их поверхности, обосновано содержание карт. Первый тип карт отображает процессы образования лавовых полей и включает положение их границ, пути перемещения лавового материала, участки увеличения мощности лав; второй тип карт характеризует динамику микрорельефа лавовых полей и показывает участки растрескивания поверхности лав и ее просадки, положение крупных лавоводов, мощности лавы. Составлены карты динамики рельефа для Толбачинского Дола на основе результатов интерферометрической обработки РЛИ с привлечением снимков оптического диапазона;

4. Отображенный на картах набор границ лавовых полей разных периодов извержения на текущий момент является наиболее детальной хронологической характеристикой изменения площади лав ТТИ-50, что позволило изучить динамику площади лавовых полей, выявить временные интервалы интенсивного увеличения площади и затишья. С привлечением

снимков оптического диапазона удалось установить периоды увеличения мощности лавовых полей.

Практическая значимость работы и внедрение. Материалы диссертационной работы использованы при создании геоинформационной системы «Голоценовый вулканизм Камчатки» и одноименного веб-сервиса Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН при участии автора. Методологическая часть используется в учебном курсе кафедры картографии и геоинформатики «Космическая картография». Материалы диссертации использованы в работах по договору между Географическим факультетом МГУ им. М.В.Ломоносова и ИТЦ «СканЭкс» 13/0520 от 20 мая 2013 г. по теме «Разработка методик дистанционного мониторинга и геоинформационного картографирования состояния окружающей среды и опасных природных процессов».

Результаты исследования имеют ценность при изучении динамики рельефа вулканических областей, особенно труднодоступных с точки зрения проведения полевых работ; при верификации результатов моделирования динамики лавовых полей.

Апробация. Результаты проведенных исследований были доложены на XII, XIII Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014, 2015); на конференции «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле (ITES-2014)» (Петропавловск-Камчатский, 2014); на 33 международном географическом конгрессе (IGC2016) (Пекин, 2016).

По теме диссертации опубликовано 10 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и получено свидетельство о регистрации базы данных «ГИС «Голоценовый вулканизм Камчатки»», №2016620587.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (108 наименований), содержит 148 страниц текста, 13 таблиц, 57 рисунков, 4 приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в подготовке диссертации: своему научному руководителю к.г.н. Тутубалиной О.В., всему коллективу кафедры картографии и геоинформатики, в особенности, заведующей кафедрой, д.г.н. Лурье И.К., д.г.н. Кравцовой В.И., к.г.н. Кошелю С.М., к.г.н. Балдиной Е.А., к.г.н. Прасоловой А.И., д.г.н. Новаковскому Б.А., к.г.н. Чистову С.В.; за помощь в организации, проведении полевых работ и консультации Сучилину А.А., Доронкину Ю.И., Деркачевой А.А., к.г.н. Черноморцу С.С.; за ценные консультации д.г.н. Лукашову А.А., д.г.н. Пономаревой В.В., к.арх.н. Кожевникову А.М., Мельникову Д.В., Зеленину Е.А.; компаниям: «СканЭкс» за предоставленные материалы дистанционного зондирования, «Совзонд» и «Hexagon» за предоставленные пробные версии программного обеспечения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Радиолокационная интерферометрия как метод изучения вулканических извержений. Характеристика района исследования

Приходящий к радиолокатору сигнал помимо амплитудной составляющей, характеризующей интенсивность отраженного объектами земной поверхности сигнала, содержит и фазовую компоненту, позволяющую извлекать информацию об абсолютных высотах рельефа поверхности или выявлять ее смещения методами радиолокационной интерферометрии.

Анализ существующих научных работ показал, что метод радиолокационной интерферометрии активно используется для оценки произошедших в результате извержения изменений форм рельефа, объемов изверженного материала, мониторинга деформаций поверхности вулканических построек. При этом картографирование рельефообразующих процессов на основе результатов интерферометрической обработки РЛИ практически не развито.

Первым вулканом, для изучения которого стали использовать методы радиолокационной интерферометрии, стала Этна (Италия) (Briole et al., 1997), (Lanari et al., 1998), (Massonnet et al., 1995). С запуском космического аппарата

ERS-1 в 1991 году были систематически изучены 198 вулканов (Biggs et al., 2014), что в 4 раза больше количества вулканов, для которых были проведены наземные геодезические измерения деформаций поверхности (Dvorak et al., 1997). Изучение и мониторинг вулканических массивов, расположенных на территории Российской Федерации, методами радиолокационной интерферометрии практически не проводились, в связи с этим возникает острая необходимость в систематическом мониторинге вулканов на основе интерферометрической обработки РЛИ.

Районом исследования стал Толбачинский Дол, где в 2012-2013 гг. произошло крупное трещинное извержение (ТТИ-50), основным продуктом которого являются лавы, существенно изменившие рельеф Дола. В связи с этим в дальнейшем в работе рассматривается динамика мезорельефа, связанная с образованием и развитием лавовых полей в течение извержения, и динамика микрорельефа лавовых полей. В результате ТТИ-50 образовались три обширных лавовых поля (Водопадное, Ленинградское, Толудское). В результате изучения спектральных характеристик объектов Толбачинского Дола установлено, что лавы разного возраста на снимках видимого и инфракрасного диапазонов плохо различимы между собой. Это обусловливает поиск дополнительных источников для картографирования и исследования распространения вулканических отложений. Такими источниками могут стать результаты интерферометрической обработки РЛИ.

Глава 2. Методика интерферометрической обработки РЛИ. Характеристика материалов исследования

Метод радиолокационной интерферометрии предусматривает извлечение информации о высотах местности или смещениях земной поверхности на основе фазовой составляющей отраженного радиолокационного сигнала и предъявляет строгие требования к исходным данным и условиям выполнения космической съемки (Захаров и др., 2012). Выделяют несколько видов интерферометрической обработки, различающихся главным образом по количеству используемых РЛИ (Pinel et al., 2014). В диссертационной работе

обработка выполнялась методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии (в программном обеспечении SARScape), использующим пару РЛИ и цифровую модель рельефа (ЦМР). Исходными данными послужили РЛИ Radarsat-2 и ЦМР SRTM. Схема, отражающая основные этапы обработки, приведена на рисунке 1.

Рисунок 1. Этапы интерферометрической обработки

В результате рассчитаны значения вертикальных смещений для двух пар, полученных при съемке с восходящей орбиты (26.06.2013–19.07.2013, 12.08.2013 – 05.09.2013), и двух пар с нисходящей (29.06.2013–23.07.2013, 16.08.2013–09.09.2013). Наличие РЛИ с восходящей и нисходящей орбит практически на одни и те же даты позволило выполнить оценку точности значений смещений на основе сопоставления июньско-июльских пар (26.06.2013–19.07.2013 и 29.06.2013–23.07.2013) и августовско-сентябрьских (12.08.2013 – 05.09.2013 и 16.08.2013–09.09.2013). Прямое сравнение (путем вычисления разности значений вертикальных смещений) показало, что для июньско-июльских пар значения разности достигают 9 см, а для августовско-сентябрьских меняется от 1-2 см (Ленинградское лавовое поле) и до более, чем 5 см (участки Водопадного и Толудского лавовых полей, где проявляется влияние резкого перепада абсолютных высот). Анализ стабильных объектов Толбачинского Дола, лав предыдущих извержений, выявил наличие систематической компоненты в значениях смещений. После ее вычитания и введения поправочных коэффициентов на основе регрессионного анализа

(устраняющих ошибки, связанные с разной геометрией съемки) точность определения смещений для Ленинградского и большей части Водопадного лавовых полей достигла 2 см, однако для участков лавовых полей, которые расположены на больших абсолютных высотах, точность составила 5-6 см (из-за влияния атмосферы), что обусловило исключение таких районов из картографирования и дальнейшей тематической интерпретации.

Глава 3. Дешифрирование материалов интерферометрической обработки РЛИ Radarsat-2 и космических снимков в оптическом диапазоне для картографирования динамики рельефа вулканических областей

Интерферометрическая обработка РЛИ – многоступенчатый процесс, результаты промежуточных этапов которого могут быть использованы для изучения тех или иных характеристик явления. Однако РЛИ, пригодные для интерферометрической обработки, получены только на заключительные месяцы ТТИ-50 (июнь-октябрь), поэтому для изучения и картографирования извержения в предыдущие месяцы был сформирован набор снимков видимого, инфракрасного (EO1/ALI, Landsat-8/OLI, Terra/ASTER, SPOT6/NAOMI) и радиодиапазонов (Radarsat-1), необходимый для изучения пространственно-временной динамики ТТИ-50 на всем его протяжении.

Дешифрирование границ лавовых полей в разные периоды извержения. Принцип выделения границ лав в разные периоды извержения по результатам интерферометрической обработки РЛИ основан на контрасте лавового поля с окружающей местностью. В зависимости от географического района и текущих природных условий, возможны два случая:

А) Если значения когерентности окружающей местности низкие, то дешифрирование границы лавового поля становится возможным после завершения активного формирования его поверхности, когда значения когерентности лав максимальны. Примером служит граница Ленинградского лавового поля, четко выделяемая на фоне окружающей его местности (рисунок 2; показано красной линией).

Б) Если окружающая местность имеет высокие значения когерентности (например, лавовые поля предыдущих извержений), то активный лавовый поток, чья поверхность еще только формируется, имеет низкие значения когерентности и достаточно четко выделяется на фоне окружающей местности (рисунок 2, Толудское лавовое поле).

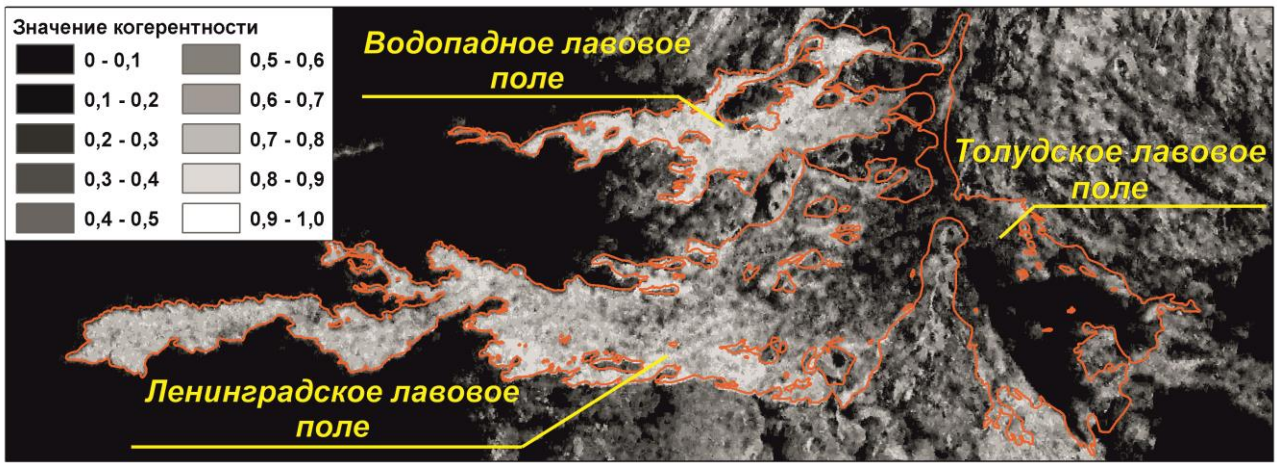


Рисунок 2. Выделение границ лавовых полей ТТИ-50 на основе значений когерентности по паре РЛИ 29.06.2013 -23.07.2013

Охарактеризованными выше методами восстановлены границы лавовых полей на заключительные месяцы извержения (июнь – август). Выделение границ лав на ранние периоды ТТИ-50 выполнялось по снимкам видимого, инфракрасного (EO1/ALI, Landsat-8/OLI, Terra/ASTER, SPOT6/NAOMI) и радиодиапазонов (Radarsat-1). Развитие ТТИ-50 в снежный период обеспечило дешифрирование положения кромки лавовых полей на основе контраста «снег – горячий лавовый поток» (рисунок 3, желтый контур). Излившиеся в первые месяцы извержения лавы имеют более низкую температуру поверхности по сравнению с последующими порциями лав, которые четко видны на снимках видимого диапазона (рисунок 3, показано

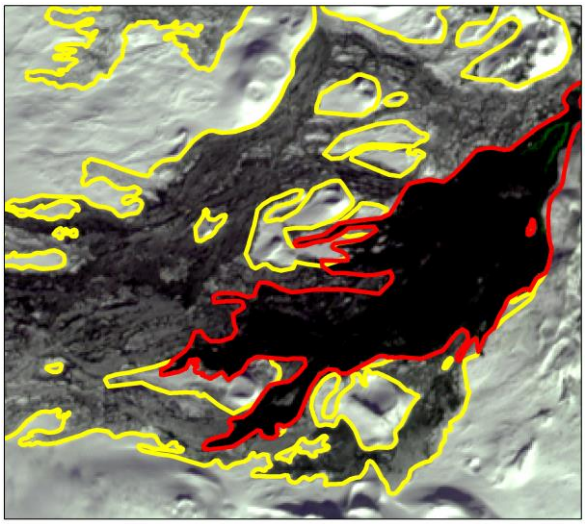


Рисунок 3. Лавовые потоки ТТИ-50 на фоне окружающей заснеженной местности. Terra/ASTER, 28.02.2013

красным контуром). Таким образом становится возможно установить периоды увеличения мощности лавовых полей.

В результате обработки всех доступных на период ТТИ-50 космических снимков были получены контуры лавовых полей на 15 дат.

Определение мощности лавовых полей. Одним из возможных результатов интерферометрической обработки РЛИ являются цифровые модели рельефа. Анализ значений абсолютных высот до и после извержения позволяет определять мощность изверженных лав и вычислять их объемы. РЛИ на район ТТИ-50, пригодные для построения ЦМР методом радиолокационной интерферометрии, отсутствовали, поэтому для вычисления мощности лавовых полей использована модель рельефа, находящаяся в открытом доступе и характеризующая рельеф до извержения (SRTM-X) и ЦМР, построенная по оптическим стереопарам SPOT-6/NAOMI (после ТТИ-50). Оценка точности выбранных ЦМР на Толбачинский Дол (на основе геодезических измерений, проведенных автором в ходе полевых геодезических работ в августе 2013 года) показал, что среднеквадратическая ошибка определения абсолютных высот по ЦМР SRTM-X и SPOT 6 не превышает 5 м для относительно равнинных участков. Полученные результаты оценки точности ЦМР SRTM-X и SPOT-6 обеспечили расчет мощности лав и объемов извержения на основе вычисления разности их абсолютных высот.

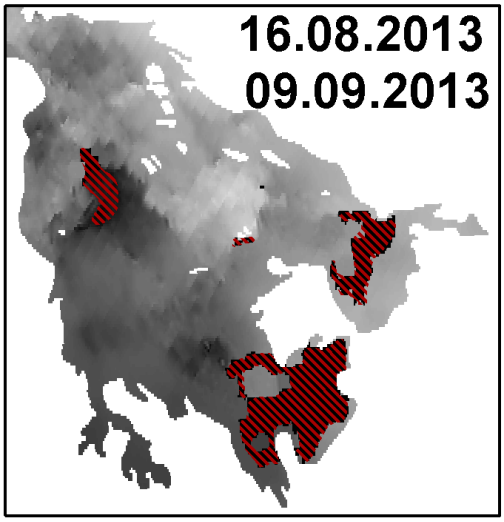


Рисунок 4. Выделение участков растрескивания поверхности лавовых полей на основе значений когерентности

Дешифрирование участков растрескивания поверхности лавовых полей. В разные этапы развития лавового поля его микрорельеф меняется. При остывании только что излившегося лавового потока, происходит растрескивание его поверхности, что приводит к нарушению согласованности отраженного сигнала и невозможности рассчитать значения когерентности в этой точке. Дешифрирование

картин когерентности, полученных в результате интерферометрической обработки, позволило выявить положение участков растрескивания поверхности лавовых полей (рисунок 4, показано красной штриховкой).

Вертикальные смещения поверхности лавовых полей. В результате интерферометрической обработки (Глава 2) получены смещения поверхности лавовых полей на июнь-июль 2013 года и август-сентябрь 2013 года.

Дешифрирование путей движения лавового материала (лавоводов). Лавоводы, по которым происходит поступление жидкой лавы от кратера извержения к периферии, представляют собой естественные полые трубы, скрытые под поверхностью на глубине от первых метров до 10-15 метров. Установить их проекцию на поверхность (положение) можно лишь косвенным путем. Для тех участков лавовых полей, по которым еще недавно передвигался поток лавы, развитие термодинамических процессов происходит интенсивнее и, следовательно, идут активные процессы усадки материала. Это отражается в картине просадок, которые соответствуют положению недавних, действующих путей перемещения лавового материала (рисунок 5, А). По снимкам теплового инфракрасного диапазона выделение лавоводов возможно в случае, когда движение жидкой лавы происходит в момент получения космического снимка (Francis and Rothery, 2014) (рисунок 5, Б).

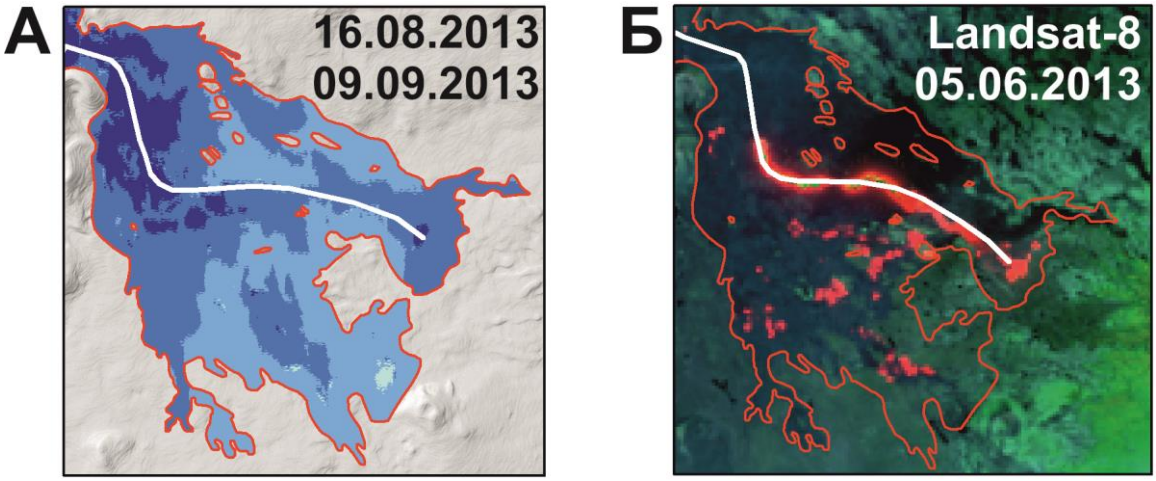


Рисунок 5. Дешифрирование лавоводов (показаны белой линией). А –на основе анализа картины смещений, Б – на основе дешифрирования снимка Landsat-8/OLI

Глава 4. Картографирование динамики рельефа в зонах вулканической активности на основе метода радиолокационной интерферометрии

В результате анализа и дешифрирования результатов интерферометрической обработки установлено, что можно сформировать набор картографируемых показателей, характеризующий динамику рельефа в зонах вулканической активности (таблица 1).

Таблица 1. Перечень картографируемых показателей динамики рельефа по материалам интерферометрической обработки РЛИ

Процесс формирования лавового поля	**Картографируемый показатель**	**Этап интерферометрической обработки РЛИ**	**Возможность получения информации по оптическим снимкам**
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	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

Картографирование динамики рельефа вулканических областей

Сформированный перечень картографируемых показателей (таблица 1) характеризует динамику рельефа вулканических областей с двух сторон – с одной стороны это нарастание самих лавовых полей в процессе извержения (формирование мезорельефа вулканического района), а с другой – изменение их

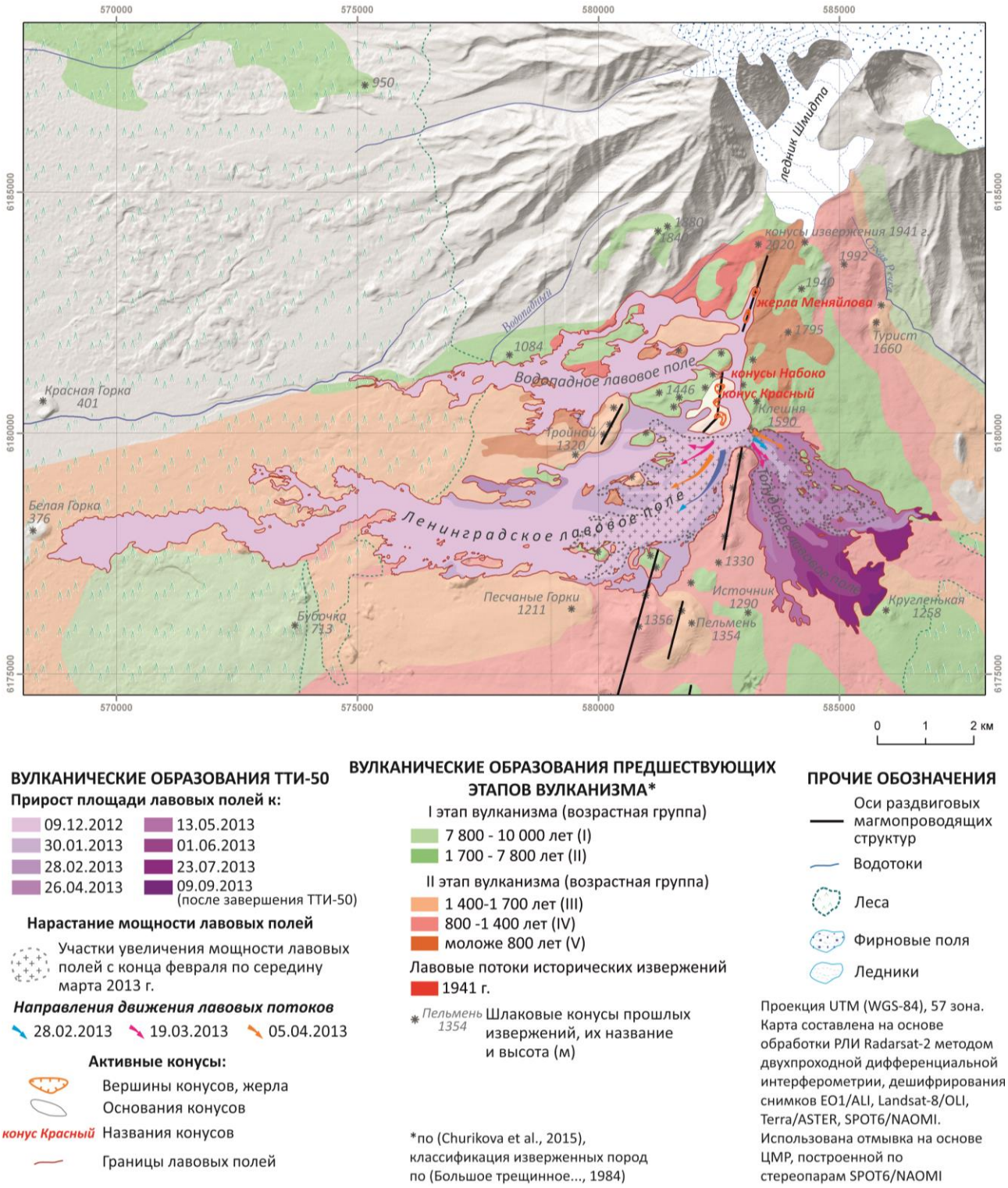
поверхности после извержения (формирование микрорельефа лавовых полей). Это обусловливает необходимость создания карт двух видов – карты нарастания лавовых полей в течение извержения и карты формирования поверхности лавовых полей (которые могут относиться к разным временным интервалам извержения, и поэтому карт данного вида может быть несколько).

Географическая основа таких карт должна содержать информацию о геолого-геоморфологических условиях развития извержения, которая включает в себя отображение на картах склонов вулканического массива Толбачик (путем использования светотеневой отмывки рельефа на базе ЦМР SPOT-6/NAOMI), положения осей раздвиговых магмопроводящих структур, возраста лавовых покровов прошлых извержений и шлаковых конусов.

Масштаб составленных карт – 1:70 000, проекция UTM (WGS-84), 57 зона.

Для *карты нарастания лавовых полей* обосновано 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. Составленная карта приведена на рисунке 6.

На карте прирост площади лавовых полей показан цветовым фоном в лилово-фиолетовой гамме, направления движения лавовых потоков – стрелками разного цвета, участки нарастания мощности лавовых полей – фигурной штриховкой. Выбор цветовой гаммы для отображения прироста площади лавовых полей осложнялся тем, что общепринятым цветом для изображения вулканического рельефа на картах является красный и его оттенки. Однако географическая основа уже включает в содержание карты возрасты лавовых покровов Толбачинского Дола, представленные в том числе и в красной цветовой гамме. Для того, чтобы подчеркнуть объект исследования, лавовые поля ТТИ-50, автором принято решение отразить их в отличных от общепринятых цветах – лилово-фиолетовых.



ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТТИ-50

Прирост площади лавовых полей к:

- 09.12.2012
- 30.01.2013
- 28.02.2013
- 26.04.2013
- 13.05.2013
- 01.06.2013
- 23.07.2013
- 09.09.2013 (после завершения ТТИ-50)

Нарастание мощности лавовых полей

Участки увеличения мощности лавовых полей с конца февраля по середину марта 2013 г.

Направления движения лавовых потоков

28.02.2013 19.03.2013 05.04.2013

Активные конусы:

Вершины конусов, жерла

Основания конусов

конус Красный Названия конусов

Границы лавовых полей

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ЭТАПОВ ВУЛКАНИЗМА*

I этап вулканизма (возрастная группа)

- 7 800 - 10 000 лет (I)
- 1 700 - 7 800 лет (II)

II этап вулканизма (возрастная группа)

- 1 400-1 700 лет (III)
- 800 -1 400 лет (IV)
- моложе 800 лет (V)

Лавовые потоки исторических извержений

- 1941 г.

Пельмень 1354 Шлаковые конусы прошлых извержений, их название и высота (м)

*по (Churikova et al., 2015), классификация изверженных пород по (Большое трещинное..., 1984)

ПРОЧИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Оси раздвиговых магмопроводящих структур
- Водотоки
- Леса
- Фирновые поля
- Ледники

Проекция UTM (WGS-84), 57 зона. Карта составлена на основе обработки РЛИ Radarsat-2 методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии, дешифрирования снимков EO1/ALI, Landsat-8/OLI, Terra/ASTER, SPOT6/NAOMI. Использована отмывка на основе ЦМР, построенной по стереопарам SPOT6/NAOMI

Рисунок 6. Карта нарастания лавовых полей в течение ТТИ-50

Карты формирования поверхности лавовых полей должны содержать следующую информацию: участки растрескивания и просадки поверхности лавовых полей, мощность лав, положение лавоводов. Представленный набор показателей наглядно отражает процессы формирования поверхности лавовых полей, являющейся основой дальнейшего развития ландшафтов вулканических

областей. Составленная карта приведена на рисунке 7. На ней штриховкой разного цвета изображены просадки и участки растрескивания поверхности лавовых полей, при помощи послойной окраски отображена мощность лав. Положение лавоводов показано пунктирной линией красного цвета.

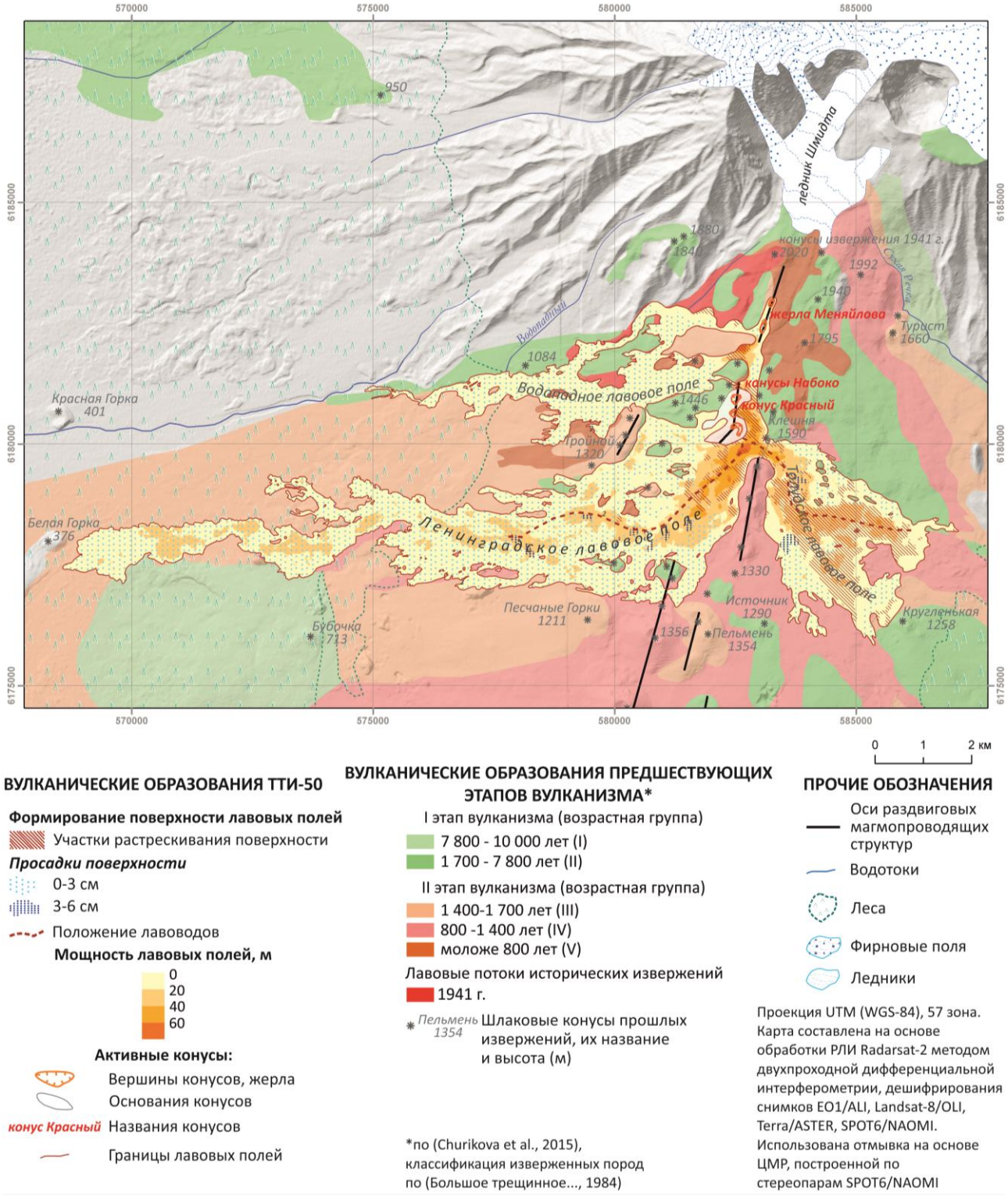


Рисунок 7. Карта формирования поверхности лавовых полей в период 29.06.2013-23.07.2013

Особенности применения результатов интерферометрической обработки для картографирования динамики рельефа. Радиолокационные изображения как основной источник тематического картографирования в силу сложности обработки, характерных искажений и восприятия информации используются крайне мало. В результате интерферометрической обработки открывается возможность получить две характеристики рельефа местности – значения абсолютных высот (построение ЦМР) и величины смещений поверхности при их наличии. Если в первом случае цифровую модель рельефа возможно построить для глобального, регионального и локального уровней картографирования, то во втором случае – это практически всегда крупномасштабное картографирование на локальном уровне. Также следует отметить, что географические особенности территории (например, наличие лесной растительности или большие перепады абсолютных высот) и состояние атмосферы в период выполнения съемки могут ограничивать сплошное картографирование смещений земной поверхности.

Необходимо учитывать, что на масштаб составляемых карт влияет пространственное разрешение исходного космического снимка. С этой точки зрения РЛИ имеют свою особенность – любая тематическая обработка, в том числе и интерферометрическая, приводит к ухудшению пространственного разрешения в несколько раз. Соответственно, становится и более мелким масштаб картографирования.

Зависимость результатов вычисления смещений от множества факторов, изменчивых во времени (например, наличие облачного покрова в момент выполнения съемки и тд.), обусловливает необходимость выполнения анализа точности и достоверности значений смещений перед их использованием в картографировании и географических исследованиях.

В работе продемонстрированы возможности получения как качественных, так и количественных характеристик рельефообразующих процессов вулканических районов. Карты нарастания лавовых полей наглядно отражают динамику мезорельефа вулканических районов. Карты формирования

поверхности лавовых полей отражают развитие микрорельефа лав. Два вида карт дают полное представление о динамике рельефа, позволяют получать новую информацию об этапах и текущих процессах рельефообразования вулканических областей, выявлять пространственные закономерности.

Изучение ТТИ-50 на основе составленных карт. Анализ прироста площади лавовых полей в течение ТТИ-50 показал, что можно выделить три периода активного увеличения площади – рост в начале извержения (конец ноября–начало декабря), стабильный рост в декабре 2012–феврале 2013 гг. и в мае–июне 2013 г., а также два периода относительной стабилизации – в феврале–апреле и июле–октябре 2013 г. Однако видимое отсутствие нарастания площади лавовых полей может сопровождаться увеличением их мощности. Итоговые площади лавовых полей по данным автора составили: для Водопадного– 6,47 км^2, для Ленинградского – 21,30 км^2, для Толудского – 8,11 км^2. Итоговая общая площадь лавовых полей – 35,88 км^2.

В результате изучения пространственного распределения мощности лавовых полей установлено, что максимальные значения приходятся на район конуса Клешня и немногим превышают 80 м. Средняя мощность лав – 13 м. Полученные значения использованы для вычисления объема излившейся лавы, величина которого составила 0,521 км^3±0,25 км^3. Значительная итоговая погрешность вычисления объема лав обусловлена погрешностями исходных ЦМР и большой площадью распространения лавовых полей при незначительной средней мощности.

Совмещение на одном графике высотных профилей исходного рельефа до ТТИ-50, мощности лавовых полей и величин просадок их поверхности выявило, что развитие лавовых полей и накопление их мощности происходит по существующим эрозионным врезам, а максимальные значения величин просадок, достигающие 6 см, соответствуют участкам с максимальной мощностью лавовых полей.

Сравнительный анализ объемов лав ТТИ-50 с объемами предыдущего извержения (Южный прорыв, Большое Трещинное Толбачинское Извержение

(БТТИ) 1975-1976 гг.) показал, что по площади лавовых полей эти извержения практически совпадают, при этом объем лав Южного прорыва БТТИ 1975-1976 гг. больше почти в 2 раза.

Заключение

Проведенная работа позволила сформулировать следующие основные выводы:

1. Недоступность некоторых вулканических районов Земли для полевых исследований делает актуальным применение методов дистанционного зондирования для их изучения. Развитие радиолокационной космической съемки обеспечивает возможность изучения вулканических районов независимо от погодных условий и наличия пепловых шлейфов, которые ограничивают использование материалов съемки в оптическом диапазоне. Детальную информацию о состоянии рельефа вулканических областей и этапах его формирования дает метод радиолокационной интерферометрии, позволяющий вычислять объемы изверженных материалов, оценивать деформации поверхности вулканических построек, выявлять участки растрескивания поверхности лавовых полей. В результате анализа научных работ установлено, что методы картографирования динамики рельефа вулканических областей, сочетающие отображение изменения рельефа, характера поверхности и площади распространения лавовых потоков, на основе радиолокационной интерферометрической съемки практически не развиты.

2. Собранный массив интерферометрических радиолокационных изображений, а также космических снимков разного типа и цифровых моделей рельефа на период Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) позволил разработать методику составления карт динамики рельефа вулканических областей и оценить метод радиолокационной интерферометрии как самостоятельный источник картографирования. Выявлены преимущества и недостатки метода. К преимуществам можно отнести слабую зависимость от облачного покрова, всевозрастающую доступность данных, получение целого

ряда характеристик извержения на основе обработки пары изображений. В то же время существенными ограничениями являются строгие требования к исходным данным, участвующим в обработке, сложность обработки. Выполненный анализ точности метода выявил, что определять величины смещений поверхности возможно с погрешностью 1-2 см. Оценку точности необходимо проводить для каждой пары РЛИ отдельно, поскольку такие факторы, как атмосферные неоднородности и геометрия съемки, в разные моменты времени оказывают разное влияние на итоговую точность рассчитываемых величин.

3. В результате интерферометрической обработки удается получить следующие характеристики изменения мезо- и микрорельефа – положение границ лавовых полей, мощность лав, участки растрескивания поверхности лав, просадки их поверхности, положение лавоводов. Показано, что полученный набор характеристик может служить основным материалом для картографирования динамики рельефа в вулканических районах и обеспечивать составление карт двух типов – нарастания лавовых полей и формирования поверхности лавовых полей в разные периоды извержения.

4. Составленные карты на район Толбачинского Дола демонстрируют возможности применения результатов интерферометрической обработки для тематического картографирования и позволяют проанализировать формирование мезо- и микрорельефа вулканических областей, проследить его временную и пространственную динамику.

5. Изучение ТТИ-50 на основе полученных карт позволило измерить ряд ключевых параметров извержения. Рассчитаны итоговые площади лавовых полей, которые составили для Водопадного– 6,47 км^2, для Ленинградского – 21,30 км^2, для Толудского – 8,11 км^2, суммарная – 35,88 км^2. В результате сравнения объемов лав ТТИ-50 с объемами предыдущего извержения (БТТИ 1975-1976 гг.) установлено, что площади лавовых полей ТТИ-50 и Южного прорыва БТТИ практически совпадают, при этом объем лав Южного прорыва больше почти в 2 раза. Выполненный совместный анализ форм рельефа Дола до ТТИ-50, мощности лав и величин просадок их поверхности продемонстрировал,

что развитие лавовых полей и накопление их мощности происходит по существующим эрозионным врезам, а максимальные значения величин просадок (достигают значений до 6 см в конце ТТИ-50) соответствуют участкам с максимальной мощностью лав, которая составляет почти 80 м в районе конуса Клешня.

Основные научные результаты изложены в следующих изданиях из списка ВАК:

1. **П. Г. Михайлюкова**, О. В. Тутубалина, Д. В. Мельников, Е. А. Зеленин. Количественная оценка параметров Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН и динамики вулканогенного рельефа на основе данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4.с. 351–359.

2. И. М. Романова, Е. А. Зеленин, **П. Г. Михайлюкова**, В. В. Пономарева. Геопортал Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и геосервис Голоценовый вулканизм Камчатки // Геодезия и картография. 2015. № 8. с. 17–23.

3. **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.

В прочих научных изданиях:

4. **P. G. Mikhaylyukova,** O. V. Tutubalina, E. A. Zelenin, D. V. Melnikov . Study of the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption using InSAR//Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле: Материалы Международной конференции, Петропавловск-Камчатский, 8-13 сентября 2014 г. Владивосток: Дальнаука. 2014. С. 61.

5. Zelenin E. A., Ponomareva V. V., **Mikhaylyukova P. G**. The geospatial database of Kamchatka holocene volcanism: structure and implementation using Postgresql/Postgis //Современные информационные технологии для

фундаментальных научных исследований в области наук о Земле: Материалы Международной конференции, Петропавловск-Камчатский, 8-13 сентября 2014. Владивосток: Дальнаука. 2014. С. 158.

6. **П. Г. Михайлюкова**, О. В. Тутубалина, Д. В. Мельников, Е. А. Зеленин Количественная оценка Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на основе ДДЗ // XII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тезисы докладов (Москва, 10-14 ноября 2014 года). Москва: ИКИ РАН. 2014. С. 330.

7. **Михайлюкова П. Г.** Обзор программного обеспечения для интерферометрической обработки радиолокационных снимков // Геоматика. 2015. № 2. С. 37–42.

8. **Михайлюкова П. Г**., Тутубалина О. В. Применение радиолокационной интерферометрии для комплексного картографирования вулканических извержений // XIII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тезисы докладов (Москва, 16-20 ноября 2015 года). Москва: ИКИ РАН. 2015. С. 357.

9. **Mikhaylyukova P. G.,** Sazonov A. A., Tutubalina O. V. Mapping of volcanic eruption based on InSAR // European Geosciences Union General Assembly 2016. Vol. 18 of Geophysical Research Abstracts. Germany: Germany. 2016. P.15653.

10. **Mikhaylyukova P. G.,** Tutubalina O. V., Sazonov A. A. Study of landscape changes after the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption (Kamchatka, Russia) based on remote sensing data // 33rd International Geographical Congress: Book of Abstracts. Beijing, China. 2016. P.2912