

Изучение продуктов извержений вулканов Камчатки с помощью гиперспектральных спутниковых данных в информационной системе VolSatView

Е.И. Гордеев¹, О.А. Гирина¹, Е.А. Лупян², А.В. Кашницкий², И.А. Уваров²,
В.Ю. Ефремов², Д.В. Мельников¹, А.Г. Маневич¹, А.А. Сорокин³,
А.Л. Верхотуров³, И.М. Романова¹, Л.С. Крамарева⁴, С.П. Королев³

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: gordeev@kscnet.ru

²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: evgeny@iki.rssi.ru

³Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: alsor@febras.net

⁴ДЦ «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680673, Россия
E-mail: kramareva@dvrspod.ru

На Камчатке ежегодно от трех до восьми вулканов находятся в состоянии извержения или активизации. Для оценки динамики активности вулканов с течением времени и возможной их будущей опасности для населения необходимо комплексное изучение каждого извержения вулкана – от последовательности событий до оценки геологического эффекта, который включает детальное исследование вулканогенных продуктов. В 2010 г. совместными усилиями специалистов ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДЦ ФГУП НИЦ Планета создана и развивается информационная система «Мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru>), позволяющая работать с различными спутниковыми данными среднего и высокого разрешения, метео- и инструментальной информацией наземных сетей наблюдений, проводить совместный анализ различных данных. В настоящее время в VolSatView имеется развитый инструментарий для анализа гиперспектральных данных, который можно применять для решения различных задач исследования активности вулканов. В работе приводятся примеры применения VolSatView для изучения продуктов извержений Северной группы вулканов Камчатки (пирокластических и лавовых образований) по данным гиперспектральных спутниковых наблюдений. Выяснено, что при изучении спектральных характеристик пирокластических пород андезитового состава более показательной является спектральная отражательная способность, при изучении свежих горячих лавовых потоков – спектральная яркость. Базальтовые и андезитовые лавы отличаются по спектральным параметрам, например, по конфигурации профилей спектральной яркости и их величинам.

Ключевые слова: вулканы Камчатки, активность вулканов, вулканогенные продукты, гиперспектральные спутниковые данные, системы мониторинга, информационная система.

Введение

Из 30 действующих вулканов, расположенных на Камчатке, ежегодно от трех до восьми находятся в состоянии извержения или активизации (Гирина, Гордеев, 2007; Гордеев, Гирина, 2014). Также ежегодно происходит здесь от 4 до 20 эруптивных событий с выбросом пеплов до 7-15 км над уровнем моря (н.у.м.). Эксплозивные извержения вулканов наиболее опасны для любых сфер деятельности человека, в том числе для полетов современных реактивных самолетов (Гирина, 2012; Гирина, Гордеев, 2007; Гордеев, Гирина, 2014; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009). Для снижения вулканоопасности в северной части Тихоокеанского региона Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН с 2002 г. проводит ежедневный спутниковый мониторинг камчатских вулканов (Гирина, 2012; Гордеев, Гирина, 2014; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009). Причины необходимости проведения спутникового мониторинга

вулканов Камчатки и спутниковые данные, используемые для мониторинга вулканов, описаны в работах (Гирина, Гордеев, 2007; Гордеев, Гирина, 2014; Гордеев и др., 2014; Ефремов и др., 2012; и др.). Известно, что для более глубокого понимания природы вулканизма, оценки динамики активности вулканов с течением времени и возможной их будущей опасности для населения необходимо комплексное изучение каждого извержения вулкана – от последовательности эруптивных событий (начало – кульминация – окончание извержения) до оценки его геологического и энергетического эффекта. Оценка геологического эффекта извержения включает детальное исследование вулканогенных продуктов: определение параметров распространения лавовых потоков в течение извержения, роста экструзивных куполов вулканов, изменения структуры и литификации отложений пирокластических потоков с течением времени после их образования и т. д. В настоящее время в различных областях знаний широко применяются данные спутниковых гиперспектрометров, которые позволяют детализировать изображения на основе различных индексов и более внимательно анализировать и классифицировать изучаемые объекты. Для детального изучения извержений вулканов и их последствий с 90-х годов 20 века широко применяются данные высокого пространственного разрешения – данные спутников серии Landsat и Aster (Abrams, 2000; Carter et al., 2008; Flynn et al., 1994, 2000, 2001; Jay et al., 2013; Harris et al., 1998; Lombardo et al., 2004; Oppenheimer, 1991; Ramsey, Dehn, 2004; Urai et al., 1999; и др.). В последние несколько лет для этих же целей начали использоваться в вулканологии данные гиперспектрометра (ГС) EO-1 Hyperion (Гордеев и др., 2014; Abrams et al., 2013; Ramsey, Harris, 2013; Ramsey et al., 2012; Wright et al., 2010, 2011; и др.).

В 2011 г. совместными усилиями специалистов ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДЦ НИЦ Планета был создан, введен в опытную эксплуатацию и развивается при поддержке РФФИ (проекты 11-07-12026-офи_м, 13-07-12180_офи_м-2013) информационный сервис «Мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView), позволяющий работать с различными оперативными и архивными спутниковыми данными среднего и высокого разрешения и различными другими информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, а также метео- и наземной инструментальной информацией, для обеспечения вулканологам возможности непрерывного мониторинга и исследования вулканической активности Камчатки и Курил (Гирина и др., 2014; Гордеев и др., 2014; Ефремов и др., 2012). Технологии, реализованные в VolSatView, позволяют использовать в работе данные различных спутниковых систем. Благодаря этому, например, с помощью спутниковых гиперспектрометров, в частности EO-1 Hyperion, были получены и проанализированы некоторые данные по районам действующих вулканов Камчатки за период 2010-2014 гг. (Гордеев и др., 2014; Лупян и др., 2012).

Особенности информационного сервиса VolSatView

Информационный сервис VolSatView реализован на основе специализированного программного обеспечения и технологий, разработанных в ИКИ РАН, ориентированных

на создание различных специализированных систем дистанционного мониторинга (Андреев и др., 2004; Балашов и др., 2013; Егоров и др., 2004; Ефремов и др., 2004; Лупян и др., 2004, 2011; Толпин и др., 2011; Уваров и др., 2013, 2014;). На основе указанных технологий сегодня создано и функционирует значительное число специализированных информационных систем (ИС), обеспечивающих дистанционный мониторинг различных природных и антропогенных объектов (Лупян и др., 2011).

Сервис VolSatView (<http://volcanoes.smislab.ru>) автоматически собирает и архивирует спутниковые данные из различных центров приема и систем, обеспечивающих предоставление спутниковой информации и результатов ее обработки, а также метеоданные (Ефремов и др., 2012). Например, в систему автоматически поступают данные, получаемые со спутников NOAA, NPP, Terra, Aqua, Landsat (4, 5, 7 и 8), EO-1 Hyperion, кроме этого, пользователи системы имеют возможность работы с данными спутников Метеор М № 1 и 2, Канопус В, Ресурс П, предоставляемыми системой доступа к объединенным информационным ресурсам центров НИЦ «Планета» (<http://moscow.planeta.smislab.ru/>) (Лупян и др. 2014) и Геопорталом Роскосмоса (<http://gptl.ru/>) (Носенко, Лошкарев 2010). Процессы сбора спутниковых данных и их обработки для получения различных продуктов автоматизированы. Для обеспечения сбора, обработки, архивации и анализа данных созданы узлы системы, установленные в ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), ИКИ РАН (г. Москва), ВЦ ДВО РАН (г. Хабаровск) и ДЦ НИЦ «Планета» (г. Хабаровск). В VolSatView разработаны специальные инструменты, обеспечивающие возможность работы с данными долговременных спутниковых наблюдений и оперативного получения результатов их обработки. Например, созданы инструменты анализа полей температуры, реализованные непосредственно в web-интерфейсе, позволяющие мгновенно просматривать значения температуры в каждой точке снимка, что значительно сокращает время анализа термальных аномалий в районах действующих вулканов; созданы инструменты, позволяющие выделять пепловые облака и шлейфы, анализировать их временные серии, заносить их в базу данных с автоматическим расчетом площади пеплового шлейфа или облака, визуализировать пепловые шлейфы и облака по отдельным или всем вулканам за определенный период времени.

В VolSatView реализована возможность работы с данными различных ИС, например, с данными группы KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>), ИС «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/>) Геопортала ИВиС ДВО РАН и АИС «Сигнал» (<http://signal.febras.net>) (Гордеев и др., 2014; Ефремов и др., 2012; Романова, 2013; Романова и др., 2012; Королев и др., 2014; Сорокин и др., 2010; Уваров и др., 2014; Ханчук и др., 2013; Sorokin et al., 2010). Это, например, позволяет непосредственно в системе получать доступ к данным видеонаблюдений за вулканами Шивелуч, Ключевской, Горелый и Авачинский; информации о пепловых шлейфах и Авиационных цветовых кодах опасности каждого из вулканов для авиации; результатам моделирования траектории распространения пепловых шлейфов (Гордеев, Гирина, 2014; Гордеев и др., 2014; Королев и др., 2014; Ханчук и др., 2013).

Возможности работы с данными гиперспектральных спутниковых наблюдений в информационном сервисе VolSatView

В составе VolSatView была создана специальная подсистема, обеспечивающая получение, обработку, архивацию и анализ данных Hyperion (EO-1). Специалистами ИКИ РАН и Филиала института радиоэлектроники (ФИРЭ) РАН разработана технология, позволяющая проводить совместный анализ ГС данных с данными других спутниковых систем (Уваров и др., 2014). Технология позволяет: организовать автоматическое получение данных ГС из различных центров, обеспечивающих их распространение, проводить автоматическую обработку данных и преобразовывать их в вид, позволяющий осуществлять быстрый выбор необходимой для анализа информации (как пространственной, так и спектральной), осуществлять автоматическое ведение архивов данных ГС, создавать интерфейсы для удаленного анализа данных ГС совместно с информацией, получаемой от других систем наблюдения. Эта технология была использована при создании в VolSatView блока работы с данными гиперспектрометра Hyperion EO-1 (<http://EO1.usgs.gov>), который позволяет получать информацию в 242 спектральных каналах в диапазоне 0,4-2,5 мкм (видимый + ближний ИК-диапазоны) со спектральным разрешением 10 нм и пространственным разрешением 30 м. Hyperion обеспечивает съемку в полосе 7,5 кадрами протяженностью до 100 км. Прибор обладает достаточно высокой радиометрической точностью и обеспечивает хорошую географическую привязку.

В узле системы VolSatView, расположенном в ИКИ РАН, организовано автоматизированное постоянное поступление данных Hyperion из архивов (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), их обработка и архивация. Для обеспечения более быстрого доступа к этим данным специалистов KVERT, они также помещаются в архивы узла системы в ИВиС ДВО РАН (Ефремов и др., 2012; Уваров и др., 2014). По состоянию на декабрь 2014 года в архиве системы имеется около 1300 сцен по районам расположения вулканов Камчатки и Курил. В архиве имеются данные за период с июля 2002 года по настоящее время. Разработанная система работы с данными рассчитана также на информацию, которая может поступать и от других гиперспектральных приборов наблюдения Земли.

Для работы с ГС данными в VolSatView, созданы специальные инструменты, ориентированные на проведение анализа ГС данных для изучения вулканической активности, которые, в частности, позволяют визуализировать в картографическом интерфейсе системы ГС данные из архива; анализировать изображения, полученные в различных спектральных каналах; проводить совместный анализ данных гиперспектрометров с информацией других спутниковых систем (Terra, Aqua, NOAA, Landsat, Канопус В и др.) и метеоданными, имеющимися в геопортале; выполнять в произвольных точках анализ спектральной яркости и отражательной способности изучаемой поверхности в различных каналах гиперспектрометров. Разработанная в ИКИ РАН технология распределенной обработки данных (Кашницкий и др., 2015), позволяет производить в системе достаточно сложные операции анализа информации. Так, например, в VolSatView реализован инструмент классификации ГС данных с использованием произвольного набора кана-

лов. Это дает возможность с использованием алгоритмов обучаемой и необучаемой классификации выделять на изображениях классы, соответствующие различным типам поверхности, и изучать их. Кроме этого в VolSatView, создана система работы с векторными объектами, позволяющая, в частности, формировать наборы опорных данных для проведения классификации. Также с помощью этой системы возможно построение спектральных и временных профилей в заданных точках объектов, анализ спектральных характеристик различных образований, построение временных профилей изменения параметров по годам в любых заданных точках. Эти возможности могут использоваться для построения спектральных и временных профилей, характерных для различных типов наблюдаемых объектов и явлений.

Примеры анализа ГС данных с помощью средств и возможностей ИС VolSatView

Несколько примеров анализа ГС данных с использованием VolSatView для изучения продуктов вулканической деятельности были показаны в статье (Гордеев и др., 2014). Исследования в этом направлении были продолжены, созданные за последнее время новые инструменты и возможности для изучения продуктов вулканов с помощью VolSatView, позволили начать работы по созданию банка данных их спектральных характеристик. Рассмотрим два направления использования ГС данных: построение спектральных портретов различных вулканогенных объектов и анализ структуры лавовых потоков.

Анализ структуры пирокластических отложений на склонах вулканов

Одним из достаточно широких направлений использования ГС данных является анализ и картирование различных горных пород (Тронин и др., 2011; Ninomiya et al., 2005; Rowan et al., 2004; Vaughan et al., 2003; и др.), средства, реализованные в VolSatView, также позволяют это делать. Можно создавать наборы точек на различных видах горных пород, выбирать и анализировать спектральные профили пород в отдельных точках или же осредненные профили по группам точек. В результате можно получить осредненные спектральные портреты различных горных пород.

Необходимо отметить, что условия освещенности солнцем горных пород, особенно в случае сложного пересеченного рельефа, оказывают заметное влияние на формирование профиля их спектральной отражательной способности (СОС). Например, изменение условий освещенности поверхности вулканогенных образований может приводить не только к изменению абсолютных значений их СОС, но и к изменению их спектрального профиля (*рис. 1*). В данном случае различия значений спектральных профилей поверхностей одинаковых пирокластических пород с различной освещенностью особенно выражены в диапазоне 400-800 нм: участок солнечного блика, склоны вулкана под солнцем и в тени (*рис. 1*). При построении спектральных портретов различных типов поверхностей горных пород необходимо учитывать условия их освещенности солнцем.

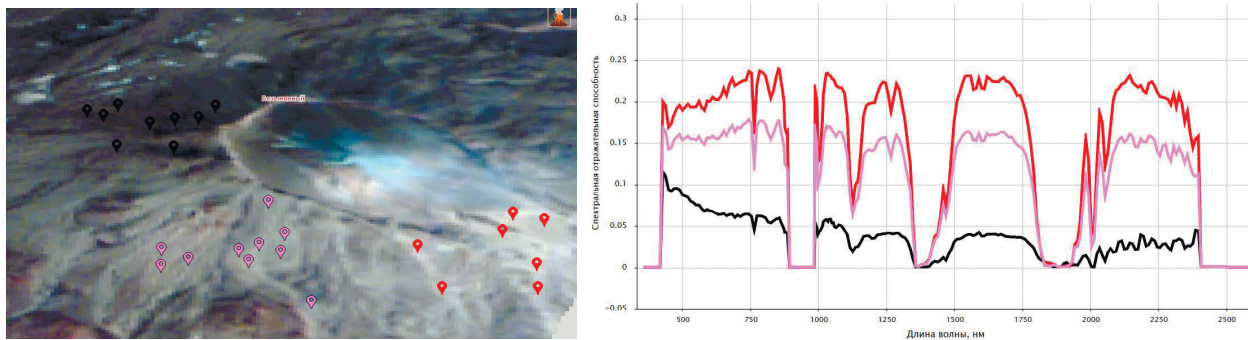


Рис. 1. Пример осредненных спектральных профилей пирокластических отложений на склонах вулкана Безымянный при различных условиях освещенности солнцем на снимке Hyperion 3.08.2006., 00:28 UTC; красный – прямые лучи солнца на восточном склоне вулкана (лучшая освещенность солнцем); розовый – косые лучи солнца на южном склоне вулкана (средняя освещенность), черный – западный склон вулкана в тени (плохая освещенность)

На снимке, полученном прибором Hyperion, на участках с одинаковой освещенностью солнцем были проанализированы три вида пирокластических образований на склонах вулкана Безымянный: свежие подвижные (недавно изверженные) на склонах вулкана, переотложенные водными потоками в ручье у подножия вулкана, стабилизированные – на отложениях пирокластиков образовался слой дерна (рис. 2). Отметим, что осредненные кривые СОС трех видов пирокластиков похожи по конфигурации, но если величины СОС свежей и переотложенной пирокластиков во всех диапазонах длин волн примерно одинаковы и составляют, соответственно, 0,15 и 0,10, то осредненная величина СОС пирокластиков, заросшей травой, в разных диапазонах длин волн варьируется от 0,13 до 0,30 (рис. 2б). То есть спектральный портрет в данном случае пирокластической породы состоит из двух компонент – конфигурации осредненной кривой СОС и ее величины.

Анализ структуры лавовых образований вулканов

Извержения вулканов мира многообразны, главные роли в их различиях играют состав магматического вещества и его газонасыщенность. Существует три основных типа извержений вулканов: взрывной, во время которого на поверхность земли поступает пирокластический материал; экструзивный и эффузивный, поставляющие на поверхность земли лавовый материал. Экструзивный тип извержений характерен для андезитовых и дацитовых вулканов, их лаве присущи высокая газонасыщенность и вязкость, их лавовые образования представляют собой преимущественно экструзивные (выдавленные) обелиски или куполы. Эффузивный тип извержений (образование лавовых потоков и покровов) широко распространен в мире, по составу лавовые потоки могут быть различными - от базальтов до риолитов. Например, при извержениях базальтовых вулканов, в зависимости от состава, температуры, газонасыщенности поступающего на поверхность земли вещества, могут формироваться лавовые реки, быстро растекающиеся по различным склонам вулкана; или же агломератовые потоки (а-а лавы), медленно передвигающиеся по понижениям на склонах

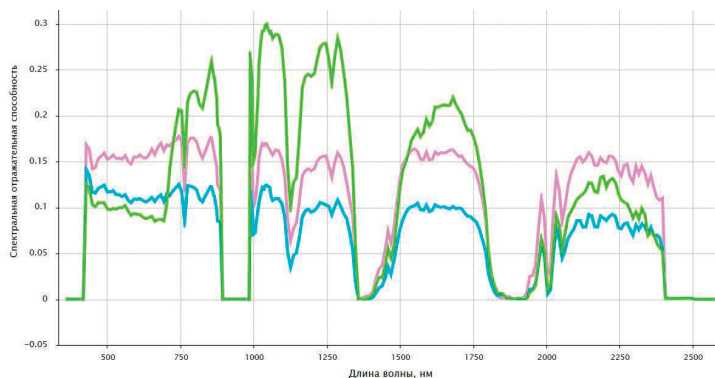
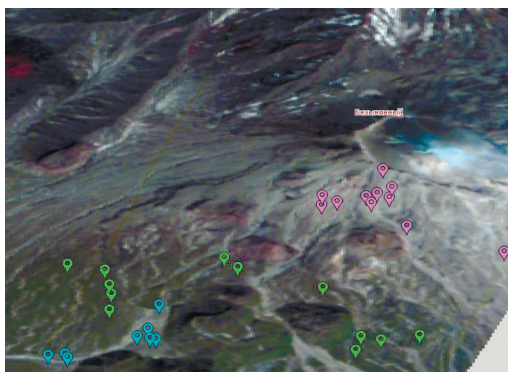


Рис. 2. Пример осредненных спектральных профилей трех видов пирокластических отложений на склонах вулкана Безымянный на снимке Nuregion 3.08.2006., 00:28 UTC; розовый – свежие (недавно изверженные), голубой – переотложенные водными потоками, зеленый – стабилизированные (на отложениях пирокластики образовался слой дерна)

вулкана постоянно увеличивающуюся шлако-глыбовую массу. Температура лавовых рек достигает 1200°C , агломератовых потоков – $600\text{-}700^{\circ}\text{C}$, т. к. в таких потоках «лавовая река» скрыта под навалом разноразмерных остывших обломков лавы. По мере удаления от кратера вулкана (от источника лавы), лавовый поток все больше перекрывается остывающей коркой или агломератовым чехлом и температура его понижается.

Приведем примеры применения в системе VolSatView инструментов анализа ГС данных для исследования лавовых потоков. Поскольку при наблюдении изливающейся лавы мы в основном имеем дело не с отраженным, а с собственным излучением поверхности, разумно проводить анализ спектральной яркости (СЯ) потоков, а не СОС. Так как лавовый поток неоднороден по мощности, структуре, плотности, температуре и другим параметрам, в рамках имеющихся в VolSatView возможностей, в частности, может быть реализована следующая схема его анализа:

- на основе изучения изменения СЯ в зависимости от длины волны для различных участков лавового потока (например, горячих и остывших) могут быть выбраны спектральные диапазоны, значения СЯ в которых значительно различаются;

- с использованием выбранных каналов осуществляется классификация ГС данных, при этом, на наш взгляд, более разумно использовать классификацию без обучения, поскольку для каждого конкретного изображения мы не можем иметь достаточного количества надежных опорных данных в первую очередь из-за того, что структура потока может быстро меняться;

- выбираются классы, относящиеся к лавовому потоку, и для каждого класса строятся осредненные по его точкам спектральные профили;

- изучая такие осредненные профили СЯ, в дальнейшем можно анализировать особенности лавовых потоков различных вулканов на разных стадиях их развития.

По такой схеме нами был проведен тестовый анализ свежих лавовых образований на Толбачинском долу и вулканов Ключевской и Молодой Шивелуч. Для проведения классификации были выбраны каналы 1750, 2100 и 2385 нм, результаты анализа приведены на рис. 3б.

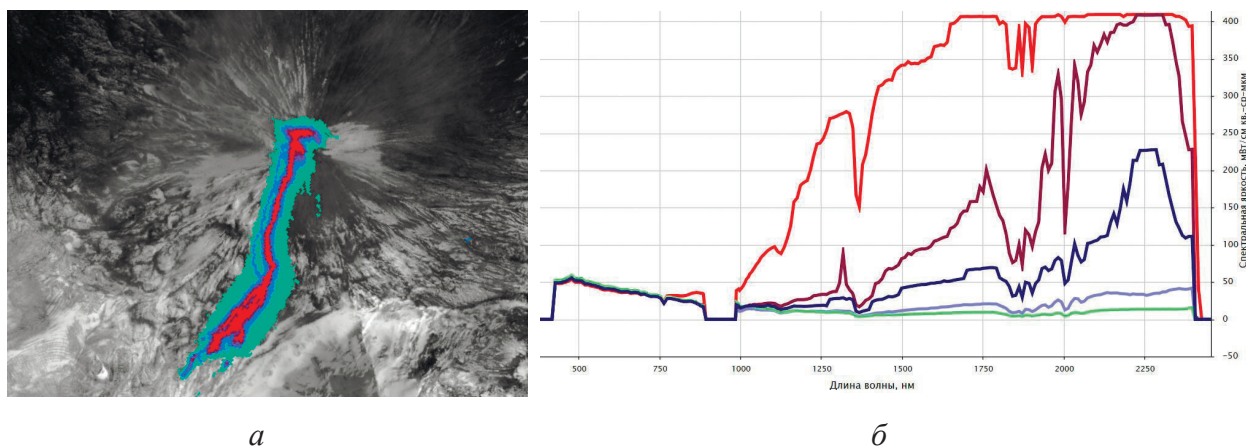


Рис. 3. а) Результаты классификации изображения лавового потока во время извержения вулкана Ключевской, полученного прибором Hyperion 17.10.2013 (черно-белая подложка выполнена на основе данных панхроматического канала прибора OLI). б) Осредненные профили спектральной яркости различных участков лавового потока: красный – горячий поток, фиолетовый и синий – части потока на разных стадиях остывания, голубой и зеленый – зоны опосредованного воздействия лавового потока на окружающие его породы

Состав пород вулкана Ключевской – базальты и андезибазальты, для него более характерны агломератовые лавовые потоки, но при непрерывном поступлении лавы на поверхность земли, тем более изливающейся по крутым склонам вулкана, могут относительно долго существовать узкие лавовые реки, величина СЯ которых может превышать 400 мВт/см^2 в диапазоне длин волн от 1750 до 2250 нм (рис. 3б). Отмечается неравномерность растекания по склону вулкана лавового потока и его остывания, связанные с проплавлением потоком нижележащих пород и захороненных в них линз ледников и снежников. В нижней части склона вулкана наблюдается изменение направления движения и конфигурации лавового потока, связанные с внедрением его в ледник Богдановича, проплавлением ледника и неравномерным накоплением толщи потока. Также наблюдается обширная зона влияния лавового потока на окружающие его породы, превышающая в несколько раз площадь самого потока, СЯ этой зоны в диапазоне длин волн от 1750 до 2250 нм не превышает 15 мВт/см^2 (рис. 3б).

В 2013 г. во время Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН на поверхность земли изливались глиноземистые базальты, отличавшиеся высокой текучестью. На рис. 4. на обширном покрове остывших лав черного цвета выделяются участки лавовых рек, движущихся по поверхности лавового покрова и внутри него (их движение можно было наблюдать в провалы лавоводов, на поверхности лавового покрова на рис. 4 они выделяются как локальные высокотемпературные зоны), СЯ которых в диапазоне длин волн от 2000 до 2250 нм превышает 360 мВт/см^2 . Зоны воздействия свежих лавовых потоков Толбачинского дола на окружающие породы на поверхности покрова выражены слабо, в отличие от вулкана Ключевской. Связано это в первую очередь с тем, что лавовые реки двигались по поверхности и внутри лавоводов продолжая формироваться в течение нескольких месяцев горячей толщи лав, относительно однородной по мощности в десятки метров и на большой площади. С другой стороны, на свежем потоке лавы, попадающем на поверхность земли, быстро формировалась корка, благодаря которой воздействие на окру-

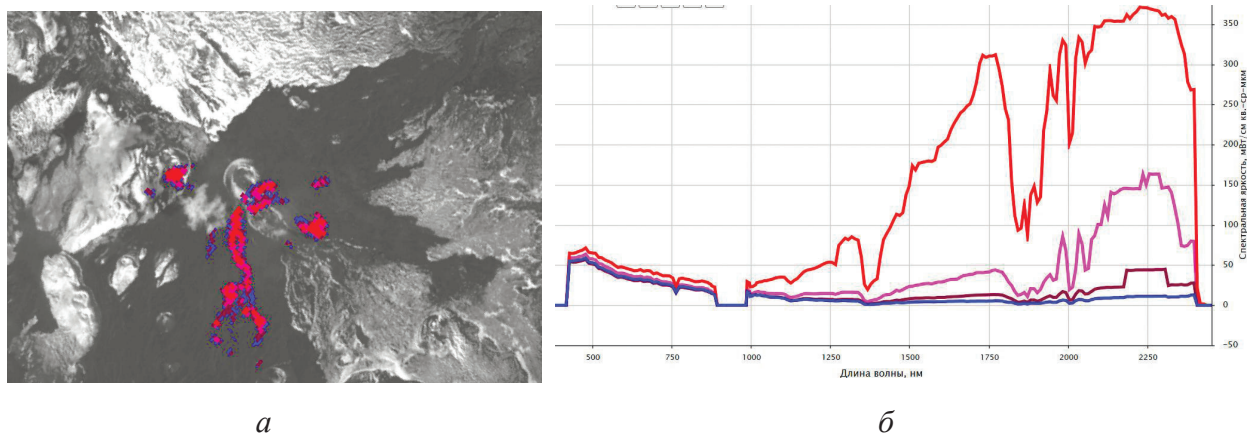


Рис. 4. а) Результаты классификации изображения лавового потока во время Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (на Толбачинском долу), полученного прибором Hyperion 09.09.2013 (черно-белая подложка выполнена на основе данных панхроматического канала прибора OLI). б) Осредненные профили спектральной яркости различных участков лавового потока: красный – горячий лавовый поток, фиолетовый и коричневый – части потока на разных стадиях остывания, синий – зона опосредованного воздействия лавового потока на окружающие его породы

жающие породы и растительность значительно сокращались, например, в 20 см от остановившегося фронта лавового потока растительность уже не выгорала. СЯ зоны воздействия на окружающие породы в диапазоне длин волн от 2000 до 2250 нм, также как для Ключевского, не превышает 15 мВт/см^2 (рис. 4б).

Осенью 1980 г. в эксплозивной воронке, образовавшейся во время катастрофического извержения вулкана Молодой Шивелуч 12 ноября 1964 г., начал расти экструзивный купол, формирование его продолжается до настоящего времени. Лавы андезидацитового состава вулкана обладают высокой газонасыщенностью и вязкостью, рост купола время от времени сопровождается мощными эксплозивными событиями с выбросом пепла до 8-10 км над уровнем моря. В проработанный взрывом канал поступает новая порция вязкой лавы, и объем купола постепенно увеличивается. В связи с перемежением эксплозивных и экструзивных событий, структура купола очень сложна: плотные лавы обелисков соседствуют с ранее выжатыми порциями лавы и пирокластическим или агломератовым материалом, образовавшимся при взрывах частей лавового купола и частично заполнивших взрывные воронки и т. д. В связи с неравномерностью взрывных событий, участки свежесжатой лавы постоянно меняют свое положение в пределах купола. На рис. 5 видно, что высокотемпературная лава экструзивного купола вулкана занимает достаточно небольшую площадь, по температуре выделяются три участка лавы, СЯ наиболее нагретого из них в диапазоне длин волн от 600 до 700 нм и 2250 нм варьируется от 40 до 30 мВт/см^2 , соответственно; СЯ наименее нагретого участка лавы в диапазоне длин волн от 2150 нм до 2250 нм равна $7,5 \text{ мВт/см}^2$. Зона воздействия свежей андезидацитовой лавы на окружающие породы, в отличие от базальтов, не отмечается. Вероятно, это связано с относительно быстрым остыванием верхних частей лавы локально выжатого небольшого по объему лавового обелиска по проработанному каналу внутри долгоживущего высокотемпературного неоднородного тела экструзивного купола вулкана Молодой Шивелуч.

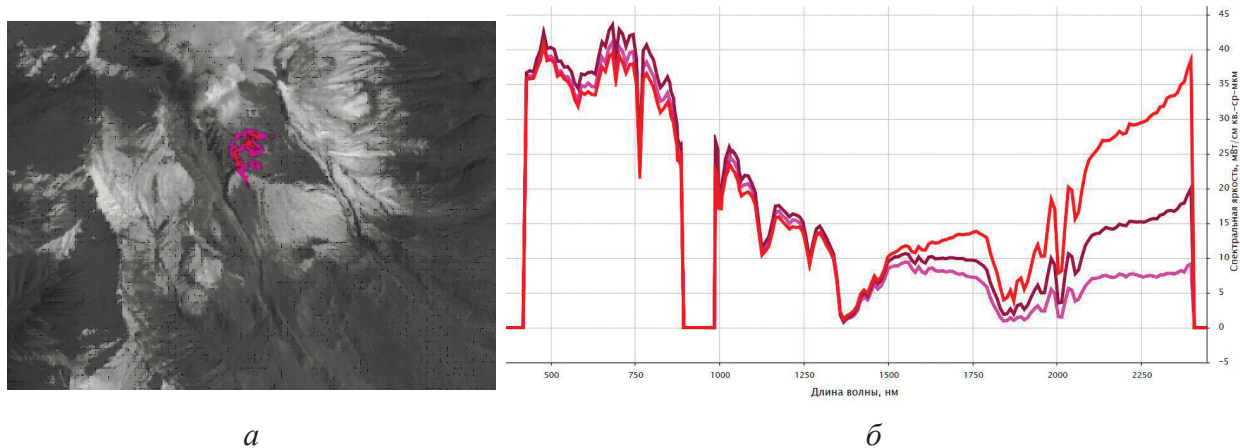


Рис. 5. а) Результаты классификации изображения части лавового купола вулкана Молодой Шивелуч, полученного прибором Hyperion 08.12.2014. (черно-белая подложка выполнена на основе данных панхроматического канала прибора OLI). б) Осредненные профили спектральной яркости различных участков лавового купола: красный – наиболее горячая часть купола, фиолетовый и коричневый – менее горячие его участки

Если сравнить спектральные характеристики изученных базальтовых лавовых потоков (вулкана Ключевской и трещинного извержения на Толбачинском долу) между собой, выясняется, что общий вид их профилей СЯ очень похож (т. к. породы одного состава – базальты); с другой стороны, по мере остывания рассматриваемых лавовых потоков конфигурация их профилей СЯ существенно меняется, при этом на разных стадиях остывания потоков хорошо выделяются пики в диапазонах 1350, 1750 и 2250 нм (рис. 3-4). Там, где лава окончательно остывает, или изначально представляет собой старые холодные породы базальтового состава, пики на профилях СЯ не отмечаются. Несмотря на сходство профилей СЯ рассмотренных базальтовых потоков вулкана Ключевской и Толбачинского дола, во время классификации их ГС данных были выделены разные классы, что, с одной стороны, является отражением действительности (состав базальтов этих двух потоков не одинаков, существуют различия в структурах этих образований), с другой стороны, говорит о преимуществах созданной информационной системы VolSatView, с помощью которой можно детализировать анализ похожих природных объектов.

Спектральные характеристики лавовых образований вулканов Ключевской и Молодой Шивелуч отличаются по всем параметрам: конфигурации профилей СЯ, выделенными классами во время классификации их ГС данных, величинами СЯ (рис. 3, 5). В первую очередь это объясняется разным составом пород этих объектов (базальты и андезидациты, соответственно), а также различиями в эруптивных процессах, поставляющих на поверхность земли лавовый материал (эффузивный и экструзивный).

Заключение

Проведенные исследования показали, что на сегодняшний день в VolSatView имеется достаточно много хорошо развитых инструментов для анализа ГС данных, которые можно

применять для решения различных задач изучения вулканической активности. В VolSatView накоплен уникальный набор информации по вулканам Камчатки и Курил, она находится в непосредственном доступе пользователей, может быть применена для проведения исследований как текущей деятельности вулканов, так и десятилетней давности, при этом анализ ГС данных может проводиться совместно с данными других информационных систем.

В работе показаны некоторые возможности анализа ГС данных пирокластических и лавовых пород разного состава Северной группы вулканов Камчатки, выяснены их характерные особенности. Отмечено, что при изучении спектральных характеристик пирокластических пород андезитового состава более показательной является СОС, при изучении свежих горячих лавовых потоков – СЯ. Базальтовые и андезидацитовые лавы отличаются по всем спектральным параметрам: конфигурации профилей СЯ, выделенными классами во время классификации их ГС данных, величинами СЯ. Базальты разного состава, слагающие лавовые потоки, во время классификации их ГС данных разделяются на различные классы. Это также говорит о достаточно больших возможностях созданной ИС VolSatView, с помощью которой можно детализировать анализ различных природных объектов.

Работа выполнялась при поддержке Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук, проектов РФФИ (11-07-12026-офи-м-2011, 13-07-12180_офи_м-2013) и грантов по Программе фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (15-И-4-0о, 15-И-4-072, 15-И-4-071).

Литература

1. Андреев М.В., Ефремов В.Ю., Лузян Е.А., Мазуров А.А., Наглин Ю.Ф., Прошин А.А., Флитман Е.В. Построение интерфейсов для организации работы с архивами спутниковых данных удаленных пользователей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 514-520.
2. Балашов И.В., Халикова О.А., Бурцев М.А., Лузян Е.А., Матвеев А.М. Организация автоматического получения наборов информационных продуктов из центров архивации и распространения спутниковых и метеоданных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С.9-20.
3. Гирина О.А. О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 14–22.
4. Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2 (132). С. 100-109.
5. Гордеев Е.И., Гирина О.А. Вулканы и их опасность для авиации // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. № 2. С. 134-142. doi: 10.7868/S0869587314020121.
6. Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лузян Е.А., Сорокин А.А., Ефремов В.Ю., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Романова И.М., Королев С.П., Крамарева Л.С. Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 267-284.
7. Егоров В.А., Ильин В.О., Лузян Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В. Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 431-436.
8. Еремеев В.А., Мордвинцев И.Н., Платонов Н.Г. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 80-90.
9. Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лузян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В. Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155-170.
10. Ефремов В.Ю., Лузян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Флитман Е.В. Технология построения автоматизированных систем хранения спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 437-443.
11. Кашицкий А.В., Балашов И.В., Лузян Е.А., Толтин В.А., Уваров И.А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156-170.

12. Королев С.П., Сорокин А.А., Верхотуров А.Л., Коновалов А.В., Шестаков Н.В. Автоматизированная информационная система для работы с инструментальными данными региональной сети сейсмологических наблюдений ДВО РАН // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 3. С. 30-41.
13. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 81-88.
14. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В., Крашенинникова Ю.С. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26-43.
15. Лупян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. 2. С. 251-262.
16. Лупян Е.А., Милехин О.Е., Антонов В.Н., Крамарева Л.С., Бурцев М.А., Балашов И.В., Толпин В.А., Соловьев В.И. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ “ПЛАНЕТА” // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89-97.
17. Носенко Ю.И., Лошкарев П.А. Единая территориально-распределенная информационная система ДЗЗ – проблемы, решения, перспективы (часть 1) // Геоматика. 2010. № 3. С. 35-42.
18. Романова И.М. Геопортал ИВиС ДВО РАН как единая точка доступа к вулканологическим и сейсмологическим данным // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 46-54.
19. Романова И. М., Гирина О. А., Максимов А. П., Мелекесцев И. В. Создание комплексной информационной веб-системы «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (VOKKIA) // Информатика и системы управления. 2012. № 3. Вып. 33. С. 179-187.
20. Сорокин А.А., Королев С.П., Михайлов К.В., Коновалов А.В. Автоматизированная информационная система оценки состояния сети инструментальных сейсмологических наблюдений “Сигнал-С” // Информатика и системы управления. 2010. № 4 (26). С. 161-167.
21. Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93-108.
22. Троицкая А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 23-36.
23. Уваров И.А., Матвеев А.М., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Саворский В.П., Суднева О.А. Организация распределенной работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. №. 1. С.322-333.
24. Уваров И.А., Халикова О.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Платонов А.Е., Прошин А.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 2. С.30-45.
25. Ханчук, А.И. Сорокин А.А., Смагин С.И., Королев С.П., Макогонов С.В., Тарасов А.Г., Шестаков Н.В. Развитие информационно-телекоммуникационных систем в ДВО РАН // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 45-57.
26. Abrams M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA’s Terra platform // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21 (5). P. 847-859. doi: 10.1080/014311600210326
27. Abrams, M., Pieri, D., Realmuto, V., Wright, R. Using EO-1 Hyperion data as HypSPRI preparatory data sets for volcanology applied to Mt. Etna, Italy // J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. Vol. 6. P. 375-385.
28. Carter A.J., Girina O.A., Ramsey M.S., Demyanchuk Y.V. ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezymianny Volcano, Russia // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 2569–2577.
29. Flynn, L.P., Harris, A. J., Rothery, D.A., and Oppenheimer, C. High-spatial-resolution thermal remote sensing of active volcanic features using Landsat and hyperspectral data // Geophysical Monograph Series. 2000. Vol. 116. P. 161-177.
30. Flynn, L. P., Harris, A. J., and Wright, R. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+ // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 78 (1). P. 180-193.
31. Flynn, L.P., Mouginis-Mark, P.J., and Horton, K.A. Distribution of thermal areas on an active lava flow field: Landsat observations of Kilauea, Hawaii, July 1991. Bulletin of Volcanology. 1994. Vol. 56 (4). P. 284-296.
32. Jay J. A., Welch M., Pritchard M. E., Mares P. J., Mnich M. E., Melkonian A. K., Aguilera F., Naranjo J. A., Sunagua M., Clavero J. Volcanic hotspots of the central and southern Andes as seen from space by ASTER and MODVOLC between the years 2000 and 2010 // Geological Society, London, Special Publications. 2013. Vol. 380, P. 161-185. doi: 10.1144/SP380.1
33. Harris, A.J., Flynn, L.P., Keszthelyi, L., Mouginis-Mark, P.J., Rowland, S. K., and Resing, J.A. Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data // Bulletin of Volcanology. 1998. Vol. 60 (1). P. 52-71.
34. Lombardo, V., Buongiorno, M.F., Pieri, D., and Merucci, L. Differences in Landsat TM derived lava flow thermal structures during summit and flank eruption at Mount Etna // Journal of Volcanology and Geothermal research. 2004. Vol. 134 (1). P. 15-34.
35. Miller T.P., Casadevall T.J. Volcanic ash hazards to aviation. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press. San Diego, California. 2000. P. 915-930.
36. Neal Ch., Girina O., Senyukov S., Rybin A., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G. Russian eruption warning systems for aviation // Natural Hazards. Springer Netherlands. 2009. Vol. 51. No. 2. P. 245-262.
37. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Directing lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multi-spectral thermal infrared ‘radiance-at-sensor’ data // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 99. 1-2. P. 127-139.

38. *Oppenheimer C.* Lava flow cooling estimated from Landsat Thematic Mapper infrared data: the Lonquimay eruption (Chile, 1989) // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012). 1991. Vol. 96 (B13), P. 21865-21878.
39. *Ramsey, M.S. and Harris, A.J.L.*, Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade // *Journal of Volcanology and Geothermal research*. 2013. Vol. 249. P. 217-233.
40. *Ramsey M., and Dehn J.* Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER data into near real-time monitoring using AVHRR // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. Vol. 135 (1–2). P. 127–146. doi:10.1016/j.jvolgeores.2003.12.014
41. *Ramsey, M.S., Wessels, R.L. and Anderson, S.W.* Surface textures and dynamics of the 2005 lava dome at Shiveluch Volcano, Kamchatka // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2012. doi:10.1130/B30580.1
42. *Rowan L.C., Simpson C. J., Mars J. C.* Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 91. 3-4. P. 419-431.
43. *Wright, R., H. Garbeil, and Davies, A.G.* Cooling rate of some active lavas determined using an orbital imaging spectrometer. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2010. Vol. 115. B06205, doi:10.1029/2009JB006536.
44. *Sorokin A.A., Korolev S.P., Mikhaylov K.V., Kononov A.V.* «SIGNAL-S» – Automated information system for seismological data processing // *First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RussiaPacificComputer 2010)*, 6-9 September, 2010; Vladivostok: FEB RAS. 2010. P. 283-284.
45. *Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M., Taranik J.V.* Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 99. 1-2. P. 140-158.
46. *Wright, R., Glaze, L., and Baloga, S.M.* Constraints on determining the eruption style and composition of terrestrial lavas from space // *Geology*. 2011. Vol. 39. P. 1127-1130.
47. *Urai M., Fukui K., Yamaguchi Y., Pieri D.C.* Volcano observation potential and global volcano monitoring plan with ASTER // *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*. 1999. Vol. 44. P. 131–141.

Studies of Kamchatka volcanic eruptions products using hyperspectral satellite data in VolSatView information system

**E.I. Gordeev¹, O.A. Girina¹, E.A. Loupian², A.V. Kashnitsky², I.A. Uvarov²,
V.Yu. Efremov², D.V. Melnikov¹, A.G. Manevich¹, A.A. Sorokin³, A.L. Verkhoturov³,
I.M. Romanova¹, L.S. Kramareva⁴, S.P. Korolev³**

*¹Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: gordeev@kscnet.ru*

*²Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: evgeny@iki.rssi.ru*

*³Computing Center, Far Eastern Branch RAS, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: alsor@febras.net*

*⁴Far Eastern Center of Planeta Research Center for Space Hydrometeorology
Khabarovsk 680673, Russia
E-mail: kramareva@dvrpod.ru*

Annually in Kamchatka from three to eight volcanoes are in eruptions or in a state of unrest. Multidisciplinary study of each eruption encompassing the history and evaluation of geological effect with the detailed examination of volcanogenic products is needed to assess the dynamics of volcanic activity and hazard to population. The combined efforts of experts from IVS FEB RAS, IKI RAS, CC FEB RAS and FEC FSI RASH “Planeta” led to the development of the information system called Monitoring of Activity of Kamchatkan Volcanoes (VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru>). The system allows working with various satellite data of mid to high resolution, meteorological and instrumental information from on-ground observation networks and to conduct combined analyses of diverse data. Currently, the VolSatView features an advanced instrumental base for the analyses of hyperspectral data that could be applied for the examination of volcanic activity. This paper illustrates application of the VolSatView in studying eruptive products of the Northern group of Kamchatka volcanoes (ex. pyroclastic and lava formations) based on hyperspectral satellite data. It is found that spectral reflectivity is indicative of pyroclastic rocks of andesitic composition, whereas spectral brightness is more informative in examination of fresh hot lava. Basaltic and andesitic lavas differ in spectral parameters, for example, in profile configurations of spectral brightness and their values.

Key words: volcanoes of Kamchatka, activity of volcanoes, volcanogenic products, hyperspectral satellite data, remote sensing systems, information system.

References

1. Andreev M.V., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Mazurov A.A., Naglin Yu.F., Proshin A.A., Flitman E.V. Postroenie interfeisov dlya organizatsii raboty s arkhivami sputnikovyykh dannykh udalennykh pol'zovatelei (The construction of interfaces for work of remote users with satellite data archives), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 1, pp. 514-520.
2. Balashov I.V., Khalikova O.A., Burtsev M.A., Loupian E.A., Matveev A.M. Organizatsiya avtomaticheskogo polucheniya naborov informatsionnykh produktov iz tsentrov arkhivatsii i rasprostraneniya sputnikovyykh i meteodannykh (Organization of automatic data acquisition from satellite and meteorological data archiving and distribution centers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol.10, No. 3, pp. 9-20.
3. Girina O.A. O predvestnikakh izverzhenii vulkanov Kamchatki, osnovannom na dannykh sputnikovogo monitoringa (On precursor of Kamchatkan volcanoes eruptions based on data from satellite monitoring), *Vulkanologiya i seismologiya*, 2012, No. 3, pp. 14-22.
4. Girina O.A., Gordeev E.I. Proekt KVERT – snizhenie vulkanicheskoi opasnosti dlya aviatsii pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril (KVERT project: reduction of volcanic hazards for aviation from explosive eruptions of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes), *Vestnik DVO RAN*, 2007, Vol. 132, No. 2, pp. 100-109.
5. Gordeev E.I., Girina O.A. Vulkany i ikh opasnost' dlya aviatsii (Volcanoes and their hazard to Aviation), *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, Vol. 84, No. 2, pp. 134-142, doi: 10.7868/S0869587314020121.
6. Gordeev E.I., Girina O.A., Loupian E.A., Sorokin A.A., Efremov V.Yu., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Romanova I.M., Korolev S.P., Kramareva L.S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh giperspektral'nykh sputnikovyykh nablyudenii dlya izucheniya aktivnosti vulkanov Kamchatki s pomoshch'yu geoportala VolSatView (Possibility of using hyperspectral data from satellite observations to study activity of Kamchatka volcanoes on the basis of the VolSatView geoportal), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 267-284.
7. Egorov V.A., Il'in V.O., Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V. Vozmozhnosti postroeniya avtomatizirovannykh sistem obrabotki sputnikovyykh dannykh na osnove programmnoy kompleksa XV_SAT (Possibility of construction of computer-aided systems for processing satellite data with help XV_SAT), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, No. 1, pp. 431-436.
8. Ereemeev V.A., Mordvintsev I.N., Platonov N.G. Sovremennye giperspektral'nye sensory i metody obrabotki giperspektral'nykh dannykh (Modern hyperspectral sensors and method of processing hyperspectral data), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 6, pp. 80-90.
9. Efremov V.Yu., Girina O.A., Kramareva L.S., Loupian E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Mel'nikov D.V., Proshin A.A., Sorokin A.A., Flitman E.V. Sozdanie informatsionnogo servisa "Distantsionnyi monitoring aktivnosti vulkanov Kamchatki i Kuril" (Creating an information service "Remote monitoring of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 155-170.
10. Efremov V.Yu., Loupian E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Flitman E.V. Tekhnologiya postroeniya avtomatizirovannykh sistem khraneniya sputnikovyykh dannykh (The Technology of construction of computer-aided systems for satellite data storage), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, No. 1, pp. 437-443.
11. Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Loupian E.A., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Sozdanie instrumentov dlya udalenoj obrabotki sputnikovyykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Creating tools for remote processing of satellite data in modern information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156-170.
12. Korolev S.P., Sorokin A.A., Verkhoturov A.L., Kononov A.V., Shestakov N.V. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema dlya raboty s instrumental'nymi dannymi regional'noi seti seismologicheskikh nablyudenii DVO RAN (Automated information system for instrument data processing of regional seismic observation network FEB RAS), *Seismicheskie pribory*, 2014, Vol. 50, No 3, pp. 30-41.
13. Loupian E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V. Tekhnologiya postroeniya avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem sbora, obrabotki, khraneniya i rasprostraneniya sputnikovyykh dannykh dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach (The technology of automated information systems for collecting, processing, storage and dissemination of satellite data for scientific and applied problems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, No. 1, pp. 81-88.
14. Loupian E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V., Krashenninnikova Yu.S. Tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Technology of construction of remote monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26-43.
15. Loupian E.A., Matveev A.M., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. Sputnikovyi servis See the Sea – instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (The Satellite Service See the Sea - a tool for the study of oceanic phenomena and processes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251-262.
16. Loupian E.A., Milekhin O.E., Antonov V.N., Kramareva L.S., Burtsev M.A., Balashov I.V., Tolpin V.A., Solov'ev V.I. Sistema raboty s ob'edinennymi informatsionnymi resursami, poluchaemyimi na osnove sputnikovyykh dannykh v tsentrakh NITs "Planeta" (The system works with the combined information resources derived from satellite data centers SIC "Planeta"), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 89-97.
17. Nosenko Yu.I., Loshkarev P.A. Edinaya territorial'no-raspredeleennaya informatsionnaya sistema DZZ - problemy, resheniya, perspektivy (chast' 1) (Single geographically distributed information system of remote sensing - problems, solutions, prospects (part 1)), *Geomatika*, 2010, No. 3, pp. 35-42.
18. Romanova I.M. Geoportal IViS DVO RAN kak edinaya tochka dostupa k vulkanologicheskim i seismologicheskim dannym (IVS FEB RAS Geoportal as a single point of access to volcanological and seismological data), *Geoinformatika*, 2013, No. 1, pp. 46-54.

19. Romanova I.M., Girina O.A., Maksimov A.P., Melekestsev I.V. Sozdanie kompleksnoi informatsionnoi veb-sistemy "Vulkany Kurilo-Kamchatskoi ostrovnnoi dugi (VOKKIA)" (Creation of complex information web system "Volcanoes of the Kurile-Kamchatka Island Arc (VOKKIA)"), *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, Vol. 33, No. 3, pp. 179-187.
20. Sorokin A.A., Korolev S.P., Mikhailov K.V., Konovalov A.V. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema otsenki sostoyaniya seti instrumental'nykh seismologicheskikh nablyudenii "Signal-S" (SIGNAL-S – Automated information system for seismological data processing), *Informatika i sistemy upravleniya*, 2010, No. 4 (26), pp. 161-167.
21. Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V. Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (Creation of interfaces for work with moderate remote monitoring systems data (GEOSMIS)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93-108.
22. Tronin A.A., Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh. Spektral'nye metody distantsionnogo zondirovaniya v geologii. Obzor (Spectral remote sensing for mineral exploration. A review), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 23-36.
23. Uvarov I.A., Matveev A.M., Burtsev M.A., Loupian E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Savorskii V.P., Sudneva O.A. Organizatsiya raspredelennoi raboty s dannymi sputnikovyykh giperspektral'nykh nablyudenii dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach (Distributed data management of hyperspectral remote sensing data for scientific purposes and applications), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 322-333.
24. Uvarov I.A., Khalikova O.A., Balashov I.V., Burtsev M.A., Loupian E.A., Matveev A.M., Platonov A.E., Proshin A.A., Tolpin V.A., Krashennnikova Yu.S. Organizatsiya raboty s meteorologicheskoi informatsiei v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa (Organization of work with a meteorological information in remote monitoring information systems), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30-45.
25. Khanchuk A.I., Sorokin A.A., Smagin S.I., Korolev S.P., Makogonov S.V., Tarasov A.G., Shestakov N.V. Rasvitie informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem v DVO RAN (Development of information and telecommunication systems in the Far Eastern Branch of RAS), *Informatsionnye tehnologii i vychislitelnyye sistemy*, 2013, No. 4, pp. 45-57.
26. Abrams M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform, *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21 (5), pp. 847-859. doi: 10.1080/014311600210326
27. Abrams, M., Pieri, D., Realmuto, V., Wright, R. Using EO-1 Hyperion data as HypsIRI preparatory data sets for volcanology applied to Mt. Etna, Italy, *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, Vol. 6, pp. 375-385.
28. Carter A.J., Girina O.A., Ramsey M.S., Demyanchuk Y.V. ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezymianny Volcano, Russia, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 2569–2577.
29. Flynn, L.P., Harris, A. J., Rothery, D.A., and Oppenheimer, C. High-spatial-resolution thermal remote sensing of active volcanic features using Landsat and hyperspectral data, *Geophysical Monograph Series*, 2000, Vol. 116, pp. 161-177.
30. Flynn, L. P., Harris, A. J., and Wright, R. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 78 (1), pp. 180-193.
31. Flynn, L.P., Mouginiis-Mark, P.J., and Horton, K.A. Distribution of thermal areas on an active lava flow field: Landsat observations of Kilauea, Hawaii, July 1991, *Bulletin of Volcanology*, 1994, Vol. 56 (4), pp. 284-296.
32. Jay J. A., Welch M., Pritchard M. E., Mares P. J., Mnich M. E., Melkonian A. K., Aguilera F., Naranjo J. A., Sunagua M., Clavero J. Volcanic hotspots of the central and southern Andes as seen from space by ASTER and MODVOLC between the years 2000 and 2010, *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, Vol. 380, pp. 161-185. doi: 10.1144/SP380.1
33. Harris, A.J., Flynn, L.P., Keszthelyi, L., Mouginiis-Mark, P.J., Rowland, S. K., and Resing, J.A. Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data, *Bulletin of Volcanology*, 1998, Vol. 60 (1), pp. 52-71.
34. Lombardo, V., Buongiorno, M.F., Pieri, D., and Merucci, L. Differences in Landsat TM derived lava flow thermal structures during summit and flank eruption at Mount Etna, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 2004, Vol. 134 (1), pp. 15-34.
35. Miller T.P., Casadevall T.J., *Volcanic ash hazards to aviation. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, California*, 2000, pp. 915-930.
36. Neal Ch., Girina O., Senyukov S., Rybin A., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G. Russian eruption warning systems for aviation, *Natural Hazards. Springer Netherlands*, 2009, Vol. 51, No. 2, pp. 245-262.
37. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Directing lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multi-spectral thermal infrared 'radiance-at-sensor' data, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 99, No. 1-2, pp. 127-139.
38. Oppenheimer C. Lava flow cooling estimated from Landsat Thematic Mapper infrared data: the Lonquimay eruption (Chile, 1989), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 1991, Vol. 96 (B13), pp. 21865-21878.
39. Ramsey, M.S. and Harris, A.J.L., Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 2013, Vol. 249, pp. 217-233.
40. Ramsey M., and Dehn J. Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER data into near real-time monitoring using AVHRR, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, Vol. 135 (1–2), pp. 127–146. doi:10.1016/j.jvolgeores.2003.12.014
41. Ramsey, M.S., Wessels, R.L. and Anderson, S.W. Surface textures and dynamics of the 2005 lava dome at Shiveluch Volcano, Kamchatka, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2012, doi:10.1130/B30580.1
42. Rowan L.C., Simpson C. J., Mars J. C. Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 91, No. 3-4, pp. 419-431.
43. Wright, R., H. Garbeil, and Davies, A.G. Cooling rate of some active lavas determined using an orbital imaging spectrometer, *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2010, Vol. 115, B06205. doi:10.1029/2009JB006536.

44. Sorokin A.A., Korolev S.P., Mikhaylov K.V., Konovalov A.V. "SIGNAL-S" – Automated information system for seismological data processing, *First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RussiaPacificComputer 2010)*, 6-9 September, 2010, Vladivostok: FEB RAS, 2010, pp. 283-284.
45. Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M., Taranik J.V. Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 99, No. 1-2, pp. 140-158.
46. Wright, R., Glaze, L., and Baloga, S.M. Constraints on determining the eruption style and composition of terrestrial lavas from space, *Geology*, 2011, Vol. 39, pp. 1127-1130.
47. Urai M., Fukui K., Yamaguchi Y., Pieri D.C. Volcano observation potential and global volcano monitoring plan with ASTER, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 1999, Vol. 44, pp. 131–141.