

## **Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала VolSatView**

**Е.И. Гордеев<sup>1</sup>, О.А. Гирина<sup>1</sup>, Е.А. Лупян<sup>2</sup>, В.Ю. Ефремов<sup>2</sup>, А.А. Сорокин<sup>3</sup>,  
Д.В. Мельников<sup>1</sup>, А.Г. Маневич<sup>1</sup>, И.М. Романова<sup>1</sup>, С.П. Королев<sup>3</sup>, Л.С. Крамарева<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия  
E-mail: evgeny@iki.rssi.ru*

<sup>3</sup> *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск 680000, Россия  
E-mail: alsor@febras.net*

<sup>4</sup> *ДЦ НИЦ «Планета», Хабаровск 680673, Россия  
E-mail: kramareva@dvrspod.ru*

На Камчатке ежегодно происходят сильные эксплозивные извержения с выбросом пеплов на 8-15 км над уровнем моря, которые представляют реальную угрозу для современной реактивной авиации. Для снижения опасности столкновения самолетов с пепловыми облаками в северной части Тихоокеанского региона, группа KVERT ИВиС ДВО РАН проводит ежедневный спутниковый мониторинг камчатских вулканов. В 2011 году специалистами ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДЦ НИЦ "Планета" был создан и введен в опытную эксплуатацию информационный сервис "Мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил" (VolSatView), позволяющий работать с различными спутниковыми данными, в том числе и гиперспектральными, а также метео- и наземной информацией, для обеспечения вулканологам возможности непрерывного мониторинга и исследования вулканической активности Камчатки и Курил. В работе приводятся примеры использования в VolSatView данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для анализа различных вулканических процессов.

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

### **Введение**

На Камчатке находятся 30 действующих вулканов, сильные эксплозивные извержения, при которых пеплы поднимаются на 8-15 км над уровнем моря, происходят здесь ежегодно. Наиболее существенную опасность эксплозивные извержения представляют для полетов современной реактивной авиации (Гирина, 2012; Гирина, Гордеев, 2007; Miller, Casadevall, 2000). Для уменьшения риска столкновения самолетов с пепловыми облаками в северной части Тихоокеанского региона с помощью своевременного обнаружения повышения активности вулканов, распознавания и отслеживания облаков вулканического пепла, и оперативного оповещения администраций авиакомпаний о появлении опасности, связанной с вулканическим пеплом, 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; Гирина, Гордеев, 2007; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009).

Необходимость спутникового мониторинга вулканов Камчатки и Курил обусловлена несколькими причинами: расположение многих активных вулканов в труднодоступных районах, далеко от населенных пунктов; отсутствие сейсмических станций на большинстве активных вулканов (например, на Камчатке сейсмостанции имеются только на десяти из тридцати активных вулканов); необходимость получения ежедневной оперативной информации по состоянию вулканов и авиатрасс, пролегающих в Курило-Камчатском регионе (пепловые выбросы могут распространяться на тысячи километров в различных направлениях от вулканов) и т.д. Кроме этого, спутниковые системы сегодня позволяют детально исследовать вулканогенные продукты и определять их параметры (распространение лавовых потоков в течение извержения, изменение структуры отложений пирокластических потоков после формирования, площади и объемы вулканогенных образований и т.д.) для оценки динамики активности вулканов с течением времени и возможной их будущей опасности для населения.

На протяжении более двадцати лет основным источником информации для оперативного мониторинга вулканической активности (отслеживания термальных аномалий на вулканах и пепловых шлейфов при их эксплозивных извержениях) во всем мире являются данные полярно-орбитальных спутников серии NOAA (Гирина, 2012; Glaze et al., 1989; Miller, Casadevall, 2000; Prata, 1989; Ramsey, Dehn, 2004; Schneider et al., 2000; Schneider, Rose, 1994; Watson et al., 2004; Wen et al., 1994). Кроме этого, используются данные спутников GOES, GMS, Terra и Aqua с датчиками MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и другие (Гирина, 2012; Гирина, Гордеев, 2007; Carter et al., 2000; Dehn et al., 2000; Kearney et al., 2008; Miller, Casadevall, 2000; Ramsey, Dehn, 2004; Schneider et al., 2000; Watson et al., 2004; Yu et al., 2002). В последние годы для детального изучения извержений и их последствий все шире применяются данные высокого пространственного разрешения, прежде всего данные спутников серии Landsat (Flynn et al., 1994, 2000, 2001; Harris et al., 1998; Lombardo et al., 2004; Oppenheimer, 1991). В настоящее время накоплен уже достаточно богатый опыт использования различных спутниковых данных для изучения вулканической активности различных регионов нашей планеты, в том числе и Камчатки. Следует отметить, что для создания условий работы с различными видами спутниковых данных, специалистами ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДЦ НИЦ "Планета" в 2011 году при поддержке РФФИ (проект 11-07-12026-офи\_м) был создан и введен в опытную эксплуатацию специализированный информационный сервис (геопортал) "Мониторинг активно-

сти вулканов Камчатки и Курил" (VolSatView), задачей которого является обеспечение специалистов-вулканологов оперативными и архивными спутниковыми данными и различными другими информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, для мониторинга и исследования вулканической активности Камчатки и Курил (Ефремов и др., 2012).

В связи с появлением в последние годы возможности массового использования данных спутниковых гиперспектрометров (ГС), они начали применяться в различных областях знаний, основными из которых на сегодняшний день являются сельское и лесное хозяйства, а также экология (Горюнова, 2013; Еремеев и др., 2003; Кондранин и др. 2012; Морозов, 2013; Griffin et al., 2005). В первую очередь это обусловлено тем, что ГС позволяют получить достаточно подробную информацию о спектральных характеристиках наблюдаемых объектов, другими словами, большое количество спектральных каналов гиперспектрометров дает возможность детализировать изображения на основе различных индексов и более точно анализировать и классифицировать изучаемые объекты.

Кроме вышеназванных областей знаний, появился также опыт применения данных ГС в вулканологии, например, для изучения лавовых потоков гавайских вулканов и вулкана Этна, лавового купола вулкана Шивелуч и др. (Abrams et al., 2013; Koeppen et al., 2013; Ramsey and Harris, 2013; Ramsey et al, 2012; Wright et al., 2010, 2011). Работы в этом же направлении проводятся и в ИВиС ДВО РАН. Камчатскими вулканологами анализировались данные гиперспектрометра EO-1 Hyperion по районам действующих вулканов Камчатки за период 2010-2013 гг. В частности, была проведена обработка гиперспектральных данных, полученных в течение извержений вулканов Ключевской, Кизимен, Шивелуч, Толбачик. Примеры обработки данных ГС приведены на *рис. 1*: на снимках хорошо выделяются наиболее свежие и высокотемпературные лавовые потоки, отражательная способность которых имеет максимальные значения в спектральном диапазоне 2,08–2,35 мкм. В ходе работы по исследованию спектральных характеристик поверхностей разных вулканогенных объектов (лавовые потоки, пирокластические отложения, лавовые куполы, лавовые озёра) было выяснено, что лавовые потоки являются наиболее легко опознаваемыми объектами; кроме этого, ГС данные позволяют проводить детальный анализ лавовых потоков - выявлять их морфологические и, в какой-то степени, реологические особенности. Кроме исследования других вышеназванных вулканогенных объектов, предполагается изучить возможности использования данных ГС для оценки повышения интенсивности активности вулканов, детализации карт вулканической опасности и т.д.

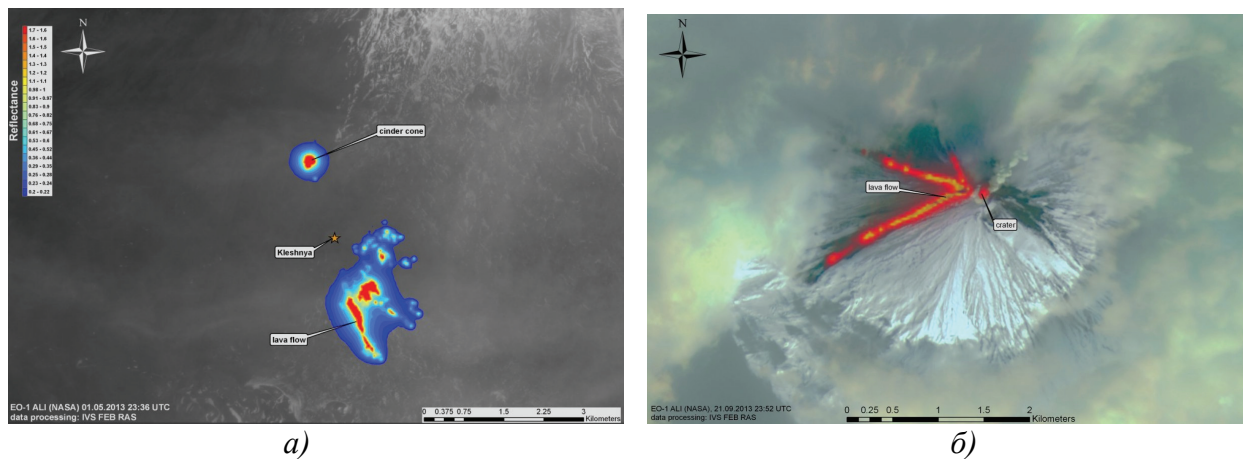


Рис. 1. Отражательная способность (reflectance) лавовых потоков Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в спектральном диапазоне 2,08–2,35 мкм на спутниковом снимке EO-1 ALI (NASA) от 23:36 UTC 01.05.2013. (а); лавовые потоки на вулкане Ключевской на спутниковом снимке EO-1 ALI (NASA) 21.09.2013. в ИК диапазоне (комбинация каналов 10, 9, 8) (б). Обработка данных Д.В. Мельникова, ИВиС ДВО РАН

Анализ выполненных исследований показывает, что в вулканологии ГС данные могут быть использованы в первую очередь для изучения:

- состояния и изменения по мере перемещения пепловых шлейфов (в том числе анализа их структуры);
- структуры лавовых потоков во время извержений вулканов;
- структуры отложений пирокластических потоков вулканов и ее изменения с течением времени после завершения извержений;
- структуры вулканогенных пород разного состава.

В то же время обеспечение массового использования данных ГС для решения задач изучения вулканов требует создания специальных инструментов, которые позволили бы проводить их анализ совместно с другой спутниковой, а также метео и наземной информацией, которые традиционно используются при мониторинге вулканической активности. Поэтому было решено в составе информационной системы VolSatView создать блок, обеспечивающий получение, обработку, архивацию и анализ данных ГС. Настоящая работа посвящена описанию основных возможностей данного блока. В ней также приводятся примеры использования данных ГС для проведения анализа различных вулканических процессов.

### Особенности информационного сервиса VolSatView

Описание возможностей информационного сервиса VolSatView (<http://volcanoes.smislab.ru>) дано в работе (Ефремов и др., 2012), поэтому здесь мы кратко остановимся только на основных его особенностях. Сервис автоматически собирает и ар-

хивирует спутниковые данные из различных центров приема и систем, обеспечивающих предоставление спутниковой информации и результатов ее обработки. Для оперативного мониторинга вулканов в системе используются данные, получаемые различными метеорологическими спутниковыми системами (NOAA, Terra, Aqua). Прием и обработка информации, поступающей от этих спутниковых систем, осуществляется в ДЦ НИЦ "Планета". В систему также автоматически поступают данные, получаемые со спутников Landsat (в настоящее время функционируют спутники Landsat 7 и 8). Кроме этого, пользователи системы имеют возможность работы с данными спутников Метеор М №1 и Канопус В, предоставляемыми НИЦ "Планета" и Геопорталом Роскосмоса (<http://gptl.ru/>). В сервис также поступают различные метеоданные. В нем имеется возможность работы с данными различных систем, осуществляющих слежение за вулканической и сейсмической активностью в регионе, в том числе с данными группы KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>), информационной системы "Вулканы Курило-Камчатской островной дуги" (<http://geoport.kscnet.ru/volcanoes/>) Геопортала ИВиС ДВО РАН и АИС "Сигнал" (<http://signal.febras.net>) (Ефремов и др., 2012; Романова, 2013; Романова и др., 2013; Ханчук и др., 2013). Это, в частности, позволяет непосредственно в системе получать доступ к данным видеонаблюдений за вулканами Шивелуч, Ключевской, Горелый и Авачинский.

В сервисе имеются архивы данных, охватывающие период с 2001 года по настоящее время. Все процессы сбора 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 сервисе VolSatView созданы различные интерфейсы, позволяющие пользователям производить поиск и анализ необходимой им информации. В частности, в системе имеются инструменты, обеспечивающие интерактивное и автоматическое детектирование термальных аномалий и анализ временных серий этих аномалий; позволяющие осуществлять выделение пепловых облаков и шлейфов и анализ их временных серий. Имеется также возможность работы с данными долговременных спутниковых наблюдений и результатами их обработки.

Информационный сервис VolSatView реализован на основе специализированного программного обеспечения и технологий, разработанных в ИКИ РАН, ориентированных на создание различных специализированных систем дистанционного мониторинга (Лупян и др., 2004, 2011; Толпин и др. 2011; Ефремов и др. 2004; Андреев и др. 2004; Егоров и др., 2004; Уваров и др., 2013; Балашов и др., 2013). Отметим, что на основе указанных технологий сегодня создано и функционирует значительное число специализированных ин-

формационных систем, обеспечивающих дистанционный мониторинг различных природных и антропогенных объектов (Лупян и др., 2011).

### **Возможности работы с данными гиперспектральных спутниковых наблюдений в информационном сервисе VolSatView**

Поскольку, как уже говорилось выше, данные ГС могут использоваться для решения достаточно широкого круга задач, специалистами ИКИ РАН и ФИРЭ РАН (Филиал института радиоэлектроники Российской Академии наук) была разработана специализированная технология, позволяющая в различные информационные системы дистанционного мониторинга, создающиеся на основе разработок ИКИ РАН (Лупян и др., 2011), реализовывать блоки, обеспечивающие возможность работы с данными ГС совместно с другими данными, используемыми в конкретных системах. Достаточно подробно эта технология описана в работе (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. Именно эта технология была использована при создании блока работы с данными ГС в информационном сервисе VolSatView.

Созданный блок ориентирован на работу в основном с данными гиперспектрометра Hyperion (High Resolution Hyperspectral Imager), установленного на спутнике EO-1 (Еремеев и др., 2003; Abrams and Hook, 2013; Chang, 2004; Griffin et al., 2000, 2005; <http://EO1.usgs.gov>). Данный прибор 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. Выбор этого прибора для использования его в сервисе VolSatView во многом определялся доступностью его данных. Значительное количество информации, получаемой прибором Hyperion, свободно распространяется Геологической службой США (USGS). Это позволило организовать автоматизированное поступление данных в VolSatView из архивов службы (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Данные ГС, поступающие в систему, аннотируются, преобразуются в формат GeoTiff с пирамидой разрешений, что позволяет в дальнейшем

осуществлять достаточно быстрый поиск и выбор как пространственной, так и спектральной информации. Обработанные данные архивируются в узле системы VolSatView, расположенном в ИКИ РАН, информация о них автоматически заносится во все другие информационные узлы системы. В дальнейшем, для обеспечения более быстрого доступа к ним специалистов ИВиС ДВО РАН, данные также помещаются в архивы узла системы, расположенном в Петропавловске-Камчатском. После помещения данных в архивы системы они автоматически становятся доступны в Web-интерфейсах информационного сервиса VolSatView (Ефремов и др., 2012).

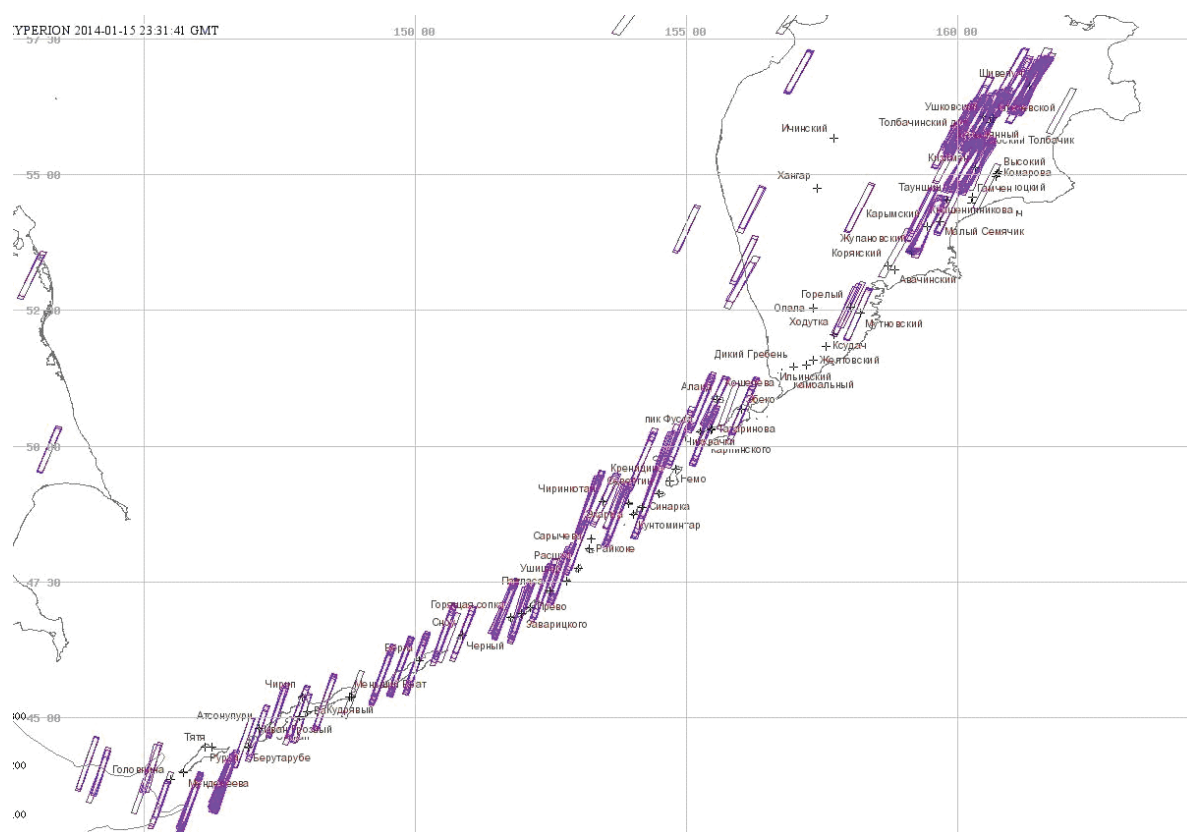


Рис. 2. Покрытие сценами прибора Hyperion территории Камчатки и Курил, доступными для анализа в информационной системе VolSatView по состоянию на январь 2014 года

В настоящее время (на январь 2014 года) в системе сформирован архив данных с 2002 года, в который входит более 800 сцен по районам Камчатки и Курил. Архив продолжает оперативно пополняться. Покрытие сценами ГС, доступными в VolSatView, приведено на рис. 2. Общий объем архива ГС, сформированный в системе, приближается к 300 Гб. Нельзя также не отметить, что, поскольку вулканы являются одними из наиболее интересных объектов, для изучения которых могут использоваться данные ГС, съемка их осуществляется достаточно регулярно. Поэтому в системе для многих вулканов имеются данные многократной съемки, например, в табл. приведена информация о наличии данных для наиболее активных вулканов Камчатки.

Для работы с данными ГС в VolSatView была проведена доработка web-интерфейсов, отвечающих за анализ спутниковых данных и результатов их обработки. Модифицированные интерфейсы позволяют проводить как пространственный анализ данных ГС с использованием картографических интерфейсов сервиса, так и анализ спектральных профилей тех или иных объектов.

Картографический интерфейс обеспечивает возможность поиска данных в архиве, выборку данных по произвольному региону за заданный период времени. Он также позволяет выбирать и просматривать произвольные каналы прибора Hyperion, формировать цветосинтезы с использованием различных каналов прибора, осуществлять контрастирование различных каналов, в том числе при построении цветосинтезов, для выбора оптимального вида представления информации. Интерфейс также обеспечивает возможность сравнения разновременных данных и проведения анализа данных ГС совместно с другой информацией, имеющейся в информационном сервисе VolSatView.

В системе также созданы специальные интерфейсы для анализа спектров, наблюдаемых в различных точках. Эти интерфейсы позволяют указать точки, в которых необходимо построить спектры, выбрать необходимую информацию и отобразить полученные спектры и их характеристики. Интерфейс также позволяет проводить одновременный анализ спектров, полученных в одной точке в различное время или в различных точках. Возможен так же экспорт полученных спектров из системы для проведения их дальнейшего детального анализа.

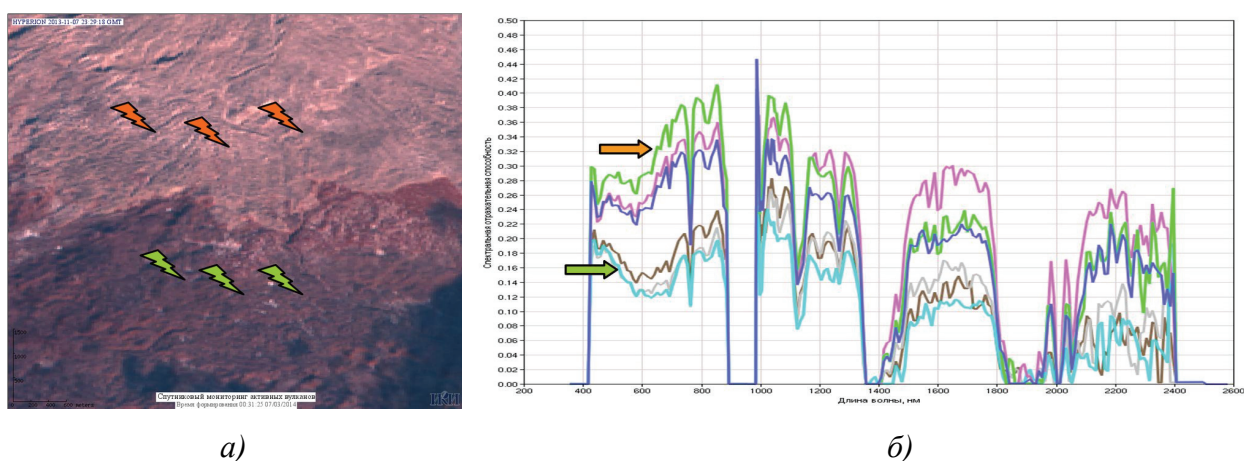
### **Примеры возможностей геопортала VolSatView с использованием ГС данных для решения задач, связанных с изучением вулканической активности**

#### *Анализ структуры отложений пирокластических потоков вулканов*

Анализ спектральной яркости и спектральной отражательной способности поверхностей вулканогенных объектов позволяет выделять и анализировать вулканогенные образования одного типа, но различного возраста. Например, в южной части вулкана Шивелуч в голоцене накоплены мощные толщи пирокластических отложений. В 1964 г. произошло очередное катастрофическое извержение вулкана, и отложения пирокластических потоков залили весь южный сектор вулкана (Горшков, Дубик, 1965). С 1980 г. начался рост лавового купола в эксплозивном кратере 1964 г., с 1984 г. до сегодняшнего дня время от времени происходят мощные эксплозии в районе лавового купола, раскаленные лавины и пирокластические потоки при таких событиях наращивают толщу современной пирокластики на отложениях 1964 г. Возможность разделения современных рыхлых пирокласти-



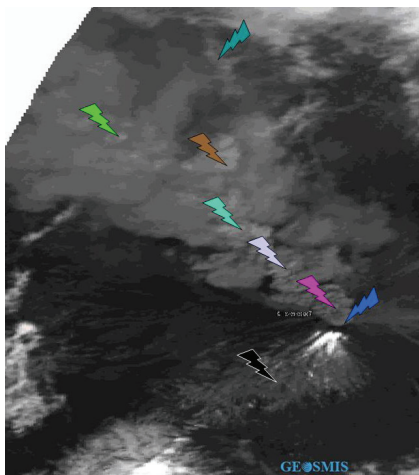
ческих отложений и древних, возникших в результате извержений в 1854 г. и ранее, показана на *рис. 3*. Интересно то, что современные и древние вулканогенные образования сильно различаются в спектральных диапазонах 400–900 нм и 1400–1800 нм, в то время как в спектральных областях 1000–1300 нм и 2000–2400 нм их отличия не так заметны. Это позволяет надеяться, что появится возможность в одних спектральных диапазонах (например, 1000-1300 нм) выделять вулканические продукты одного генезиса, вне зависимости от его возраста, в то время как использование других диапазонов (например, 400–900 нм), позволит классифицировать образования по возрасту. Такая информация может обеспечить более точное восстановление динамики активности каждого из вулканов, и, следовательно, точнее прогнозировать развитие каждого вулкана в будущем и степень его опасности для населения.



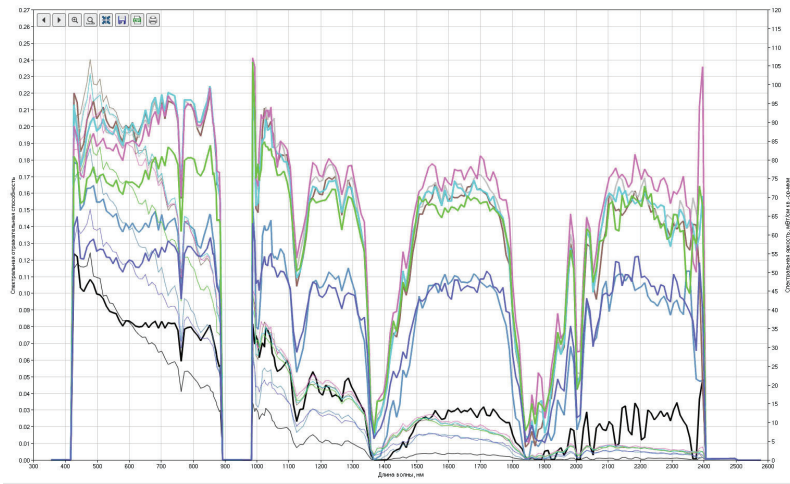
*Рис. 3. Поверхности отложений пирокластических потоков в районе вулкана Шивелуч: современных (светлый тон окраски), древних - покрытые лесом (темный тон окраски) (а); кривые спектральной отражательной способности для светлых и тёмных областей в спектральном диапазоне (б). Данные прибора Hyperion от 07.11.2013*

#### *Анализ пепловых шлейфов*

При сильных эксплозивных извержениях вулканов эруптивные колонны выносят пепел и в стратосферу, кроме тропосферы. Выше уже говорилось об опасности пепловых шлейфов для авиации, главной же проблемой для вулканологов и пилотов остается до настоящего времени оценка степени насыщенности пеплом таких шлейфов, а также определение порога количества в них пепла, ниже которого такие шлейфы будут относительно безопасны для авиации. Нужно сказать, что некоторые шаги в направлении решения этой проблемы сделаны и делаются, например (Wen, Rose, 1994).



а)



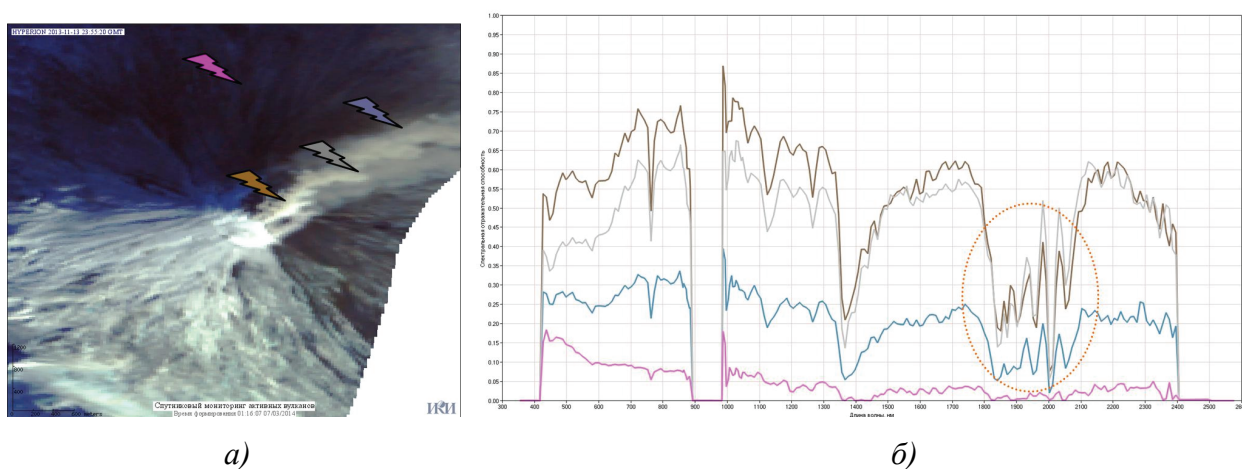
б)

Рис. 4. Пепловый шлейф вулкана Ключевской 08.07.2007., "молниями" показаны точки, в которых восстанавливались спектральные профили (а); кривые спектральной отражательной способности для различных участков пеплового шлейфа (синяя и зелено-голубая – на краях шлейфа; остальные – по оси шлейфа; черная - вне шлейфа) (б). Данные прибора Hyperion

На рис. 4 показан пепловый шлейф вулкана Ключевской при извержении в 2007 г. Кульминационная стадия извержения с подъемом пепловых шлейфов до 10–12 км над уровнем моря отмечалась с 19 июня по 4 июля, затем активность вулкана стала постепенно снижаться - до середины июля пепловые колонны поднимались до 5–7 км над уровнем моря (Гирина и др., 2009). Для характеристики пеплового шлейфа были получены кривые спектральной отражательной способности в нескольких точках по его оси (наибольшее количество пепла) и на его краях. Можно отметить, что в диапазонах 1000–1300 нм, 1500–1800 нм и 2100–2300 нм спектральные характеристики краевых и осевой частей шлейфа хорошо различаются (рис. 4). Точки, взятые на оси пеплового шлейфа (протяженность его на снимке - примерно 3,5 км от вулкана), показывают сближенные значения, хотя просматривается и некоторая зависимость - самый высокий показатель спектральной отражательной способности принадлежит точке в районе кратера вулкана, то есть наибольшему количеству пепла. Заметим, что хотя расстояние между двумя точками на краях шлейфа около 3 км, значения их спектральной отражательной способности почти совпадают (0,10–0,11), но они ниже, чем параметры точек на оси шлейфа (0,15–0,17). Необходимо сказать, что отложения на склоне вулкана Ключевской и пеплы в шлейфе имеют один состав (базальты - андезибазальты), характер их спектральных кривых похож, но величина спектральной отражательной способности отложений значительно меньшая (0,03), чем насыщенного пеплом шлейфа. Возможно, гиперспектральные данные помогут выделять в пепловых шлейфах зоны с различной концентрацией пепла.

### Анализ парогазовых шлейфов

В периоды между эксплозивными извержениями активные вулканы, как правило, находятся в состоянии мощной или умеренной парогазовой деятельности. Пример кривых спектральной яркости различных участков парогазового шлейфа вулкана Ключевской 13.11.2013 приведен на *рис. 5*. Хотя точки взяты достаточно близко от вершины, хорошо видно, что и на таком расстоянии, судя по характеру кривых, плотность шлейфа на выбранных участках меняется. Особо следует отметить, что в диапазоне 1800–2100 нм, в котором находятся линии поглощения водяного пара и  $\text{CO}_2$ , кривые спектральной яркости изучаемых участков сближены, что подтверждает преобладание в шлейфе водяного пара.

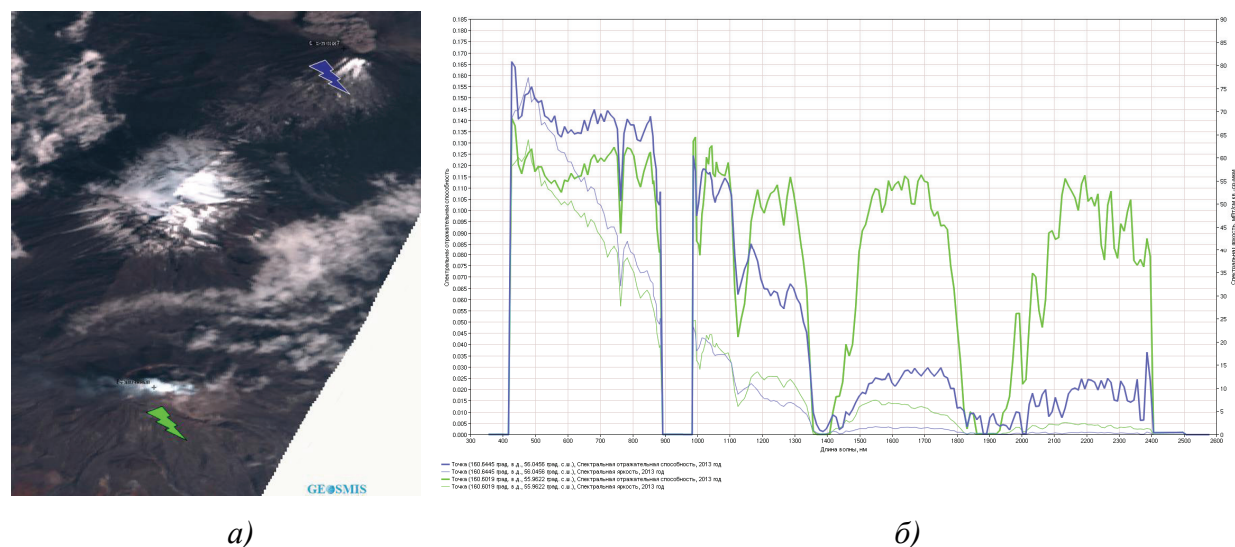


*Рис. 5. Парогазовый шлейф вулкана Ключевской 13.11.2013.: "молниями" показаны точки, в которых восстанавливались спектральные профили (а); кривые спектральной отражательной способности для различных участков шлейфа и точка вне шлейфа (б). Данные прибора Hyperion*

### Анализ пород на склонах вулканов

Одной из уникальных особенностей Ключевской группы вулканов является, например, то, что вулканы, извергающие магматическое вещество контрастного состава, находятся практически рядом. Вулкан Ключевской извергает базальты и андезибазальты, вулкан Безымянный – типичные андезиты, хотя расстояние между их вершинами всего 10 км. Это позволяет на одном снимке Hyperion рассмотреть спектральные характеристики вулканогенных пород различного состава (*рис. 6*). Для склонов вулканов примерно с одной освещенностью отмечается следующее: если в спектральном диапазоне 400–900 нм величина спектральной отражающей способности базальтов Ключевского несколько выше, чем андезитов Безымянного, то в диапазонах 1500–1800 нм и 2100–2400 нм ее значение в 3–3,5 раза ниже таковой андезитов вулкана Безымянный. Полученные данные в диапазонах 1500–1800 нм и 2100–2400 нм согласуются с характеристиками базальтов и андезитов,

имеющимися в базах спектральных данных (Clark et al., 2007; Wright et al., 2013; <http://gis-lab.info/projects/spectra/>). Возможно, анализ вулканогенных пород с помощью гиперспектральных данных поможет более детально рассмотреть соотношения толщ разного состава в районе Ключевской группы вулканов и позволит выявить последовательность их образования.



*Рис. 6. Спектры пород на склонах вулканов Ключевской и Безымянный 08.07.2007; "молниями" показаны места, в которых восстанавливались спектральные профили (а); зеленый график - андезиты на склоне вулкана Безымянный, синий - базальты на склоне вулкана Ключевской (б)*

### Заключение

Приведенные выше примеры показывают, что возможности, реализованные в спутниковом сервисе VolSatView, позволяют проводить анализ ГС данных для детального изучения особенностей различных процессов, связанных с вулканической активностью. К сожалению, в настоящее время данные ГС для конкретной территории поступают достаточно редко, что не позволяет использовать их для проведения постоянного мониторинга быстроменяющихся вулканогенных процессов, но применение их в комплексе с другими видами спутниковой информации открывает новые возможности для более глубокого понимания природы вулканизма.

Работа выполнена при поддержке Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук и РФФИ (проекты 11-07-12026-офи\_м, 13-07-12180-офи\_м).

## Литература

1. Андреев М.В., Ефремов В.Ю., Лупян 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. Выпуск 1. С. 514–520.
2. Балашов И.В., Халикова О.А., Бурцев М.А., Лупян 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. Гирина О.А., Ушаков С.В., Малик Н.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В., Котенко Л.В. Действующие вулканы Камчатки и о. Парамушир Северных Курил в 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 3–20.
6. Горюнова В.Н. Инновационный подход к комплексной тематической обработке материалов ДЗЗ // Научно-техническая конференция «Гиперспектральные приборы и технологии» (17–18 января 2013 г.). [http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya\\_kontenant/konferencii/gsa/sekciya\\_4\\_5\\_part1/Goryunova.pdf](http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya_kontenant/konferencii/gsa/sekciya_4_5_part1/Goryunova.pdf).
7. Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян 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. Выпуск 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., Лупян 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., Лупян 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. Выпуск 1. С. 437–443.
11. Кондранин Т.В., Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В., Николенко А.А. Автоматизация обработки данных самолетного гиперспектрального зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 312–319.
12. 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. Выпуск 1. С. 81–88.
13. 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.
14. Морозов С.А. Гиперспектральная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П»: направления модернизации и перспективы развития // Научно-техническая конференция «Гиперспектральные приборы и технологии» (17–18 января 2013 г.). [http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya\\_kontenant/konferencii/gsa/sekciya\\_1\\_part2/Morozov\\_1.pdf](http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya_kontenant/konferencii/gsa/sekciya_1_part2/Morozov_1.pdf).
15. Романова И.М. Геопортал ИВиС ДВО РАН как единая точка доступа к вулканологическим и сейсмологическим данным // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 46–54.
16. 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. Выпуск 33. С. 179–187. [http://ics.khstu.ru/media/2012/N33\\_19.pdf](http://ics.khstu.ru/media/2012/N33_19.pdf).
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Ханчук, А.И. Сорокин А.А., Смагин С.И., Королёв 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.
  21. Abrams, M. and Hook S. NASA's Hyperspectral Infrared Imager (HypIRI), in Kunzer and Dech (eds.), Thermal Infrared Remote Sensing: sensors, methods and applications // Remote Sensing and Digital Image Processing Springer. 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6\_6.
  22. Abrams M., Pieri D., Realmuto V., Wright R. Using EO-1 Hyperion data as HypIRI preparatory data sets for volcanology applied to Mt. Etna, Italy // J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. № 6. P. 375–385.
  23. 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.
  24. Chang G., Mahoney K., Briggs-Whitmire A., Kohler D., Lewis M., Mobley C., Moline M., Boss E., Kim M., Philpot W., Dickey T. The new age of hyperspectral oceanography // Oceanography. 2004. Vol. 17 (2). P. 16–23.
  25. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. (2007) USGS Digital Spectral Library splib06a, U.S. Geological Survey, Data Series 231. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>.
  26. Flynn L.P., Harris A.J., Rothery D.A., 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.
  27. Flynn L.P., Harris A.J., Wright R. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+ // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 78 (1). P. 180–193.
  28. Flynn L.P., Mougins-Mark P.J., 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.
  29. Glaze L., Francis P.W., Rothery D.A. Measuring thermal budgets of active volcanoes by Satellite remote sensing // Nature. 1989. Vol. 338. P. 144–146.
  30. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln laboratory journal. 2005. Vol. 15. No. 2. P. 271–298.
  31. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Snow J.W. Characterization and Delineation of Plumes, Clouds and Fires in Hyperspectral Images // SPIE 4049. 2000. P. 24–28.
  32. Harris A.J., Flynn L.P., Keszthelyi L., Mougins-Mark P.J., Rowland S.K., Resing J.A. Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data // Bulletin of Volcanology. 1998. Vol. 60 (1). P. 52–71.
  33. Kearney C.S., Dean K., Realmuto V.J., I.M. Watson, J. Dehn, F. Prata Observations of SO<sub>2</sub> production and transport from Bezymianny volcano, Kamchatka using the MODerate resolution Infrared Spectroradiometer (MODIS) // Int. J. Rem. Sens. 2008. Vol. 29. No. 22. P. 6647–6665.
  34. Koeppen W.C., Patrick M., Orr T., Sutton J., Dow D., Wright R. Constraints on the partitioning of Kilauea's lavas between surface and tubed flows, estimated from infrared satellite data, sulfur dioxide flux measurements, and field observations // Bulletin of Volcanology. 2013. Vol. 75. Doi:10.1007/s00445-013-0716-3.
  35. Lombardo V., Buongiorno M.F., Pieri D., 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.
  36. Miller T.P., Casadevall T.J. Volcanic ash hazards to aviation // Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press. San Diego. California. 2000. P. 915–930.
  37. 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.
  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. Prata A.J. Observation of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances // Int. Journal of Remote Sensing. 1989. Vol. 10 (4). P. 751–761.
  40. Ramsey M., Dehn J. Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER into near real-time monitoring using AVHRR // Journal of Volcanology and Geothermal research. 2004. Vol. 135. P. 127–146.
  41. Ramsey M.S., 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.
  42. Ramsey M.S., Wessels R.L., 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.
  43. Schneider D.J., Dean K.G., Dehn J., Miller T.P., Kirianov V.Yu. Monitoring and Analyses of Volcanic Activity Using Remote Sensing Data at the Alaska Volcano Observatory: Case Study for Kamchatka, Russia, December 1997 // Remote Sensing of Active Volcanism. Geophysical Monograph. 2000. Vol. 116. P. 65–85.

44. *Schneider D.J., Rose W.I.* Observations of the 1989–1990 Redoubt volcano eruption clouds using AVHRR satellite imagery // US Geological Survey Bull. 1994. Vol. 2047. P. 405–418.
45. *Watson I.M., Realmuto V.J., Rose W.I., Prata A.J., Bluth G.J.S., Gu Y., Bader C.E., Yu T.* Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging Spectroradiometer // Journal of Volcanology and Geothermal research. 2004. Vol. 135 (1–2). P. 75–89.
46. *Wen S., Rose W.I.* Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5 // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99 (D3). P. 5421–5431.
47. *Wright R., H. Garbeil, Davies A.G.* Cooling rate of some active lavas determined using an orbital imaging spectrometer // Journal of Geophysical Research (Solid Earth). 2010. Vol. 115. P. B06205. Doi:10.1029/2009JB006536.
48. *Wright R., Glaze L., Baloga S.M.* Constraints on determining the eruption style and composition of terrestrial lavas from space // Geology. 2011. Vol. 39. P. 1127–1130.
49. *Wright R., Lucey P., Crites S., Horton K., Wood M., Garbeil H.* BBM/EM design of the thermal hyperspectral imager: An instrument for remote sensing of earth's surface, atmosphere and ocean, from a microsatellite platform // Acta Astronautica. 2013. Vol. 87. P. 182–192. Doi:10.1016/j.actaastro.2013.01.00.
50. *Yu T., Rose W.I., Prata A.J.* Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107 (D16). DOI: 10.1029/2001JD000706.

## **Using satellite hyperspectral data to study the activity of Kamchatka volcanoes on the basis of the VolSatView geoportal**

**E.I. Gordeev<sup>1</sup>, O.A. Girina<sup>1</sup>, E.A. Lupian<sup>2</sup>, V.Yu. Efremov<sup>2</sup>, A.A. Sorokin<sup>3</sup>, D.V. Melnikov<sup>1</sup>, A.G. Manevich<sup>1</sup>, I.M. Romanova<sup>1</sup>, S.P. Korolev<sup>3</sup>, L.S. Kramareva<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS  
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia*

*E-mail: gordeev@kscnet.ru*

<sup>2</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: evgeny@iki.rssi.ru*

<sup>3</sup>*Computing Center, Far Eastern Branch RAS, Khabarovsk 680000, Russia*

*E-mail: alsor@febras.net*

<sup>4</sup>*Far Eastern Center of “Planeta” Research Center for Space Hydrometeorology  
Khabarovsk 680673, Russia*

*E-mail: kramareva@dvrpod.ru*

Annual Kamchatkan strong explosive eruptions with ash emissions of 8–15 km above the sea level represent a real threat to modern jet aviation. To reduce the risk of aircraft encounters with volcanic ash clouds in the North Pacific region, the KVERT team of the Institute of Volcanology and Seismology of Far Eastern Branch RAS (IVS FEB RAS) conducts daily satellite monitoring of Kamchatkan volcanoes. In 2011, experts of IVS FEB RAS, Space Research Institute RAS, Computing Center of Far Eastern Branch RAS and Far Eastern Center of “Planeta” Research Center for Space Hydrometeorology created and put into trial operation an information service “Monitoring of volcanic activity of Kamchatka and the Kurile Islands” (VolSatView). This service allows working with different satellite data, including hyperspectral data, as well as meteorological and ground information. VolSatView will be able to provide volcanologists with the possibility of continuous monitoring and study of volcanic activity in Kamchatka and the Kurile Islands. The paper presents examples of hyperspectral satellite data use in the VolSatView environment to analyze different volcanic processes.

**Keywords:** volcanoes of Kamchatka and Kuriles, activity of volcanoes, volcanogenic products, hyperspectral satellite data, remote sensing systems, information system.

### **References**

1. Andreev M.V., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Mazurov A.A., Naglin Yu.F., Proshin A.A., Flitman E.V., Postroenie interfeisov dlya organizatsii raboty s arhivami sputnikovyyh dannyyh udalennyh polzovatelei (Development of

- interfaces for remote user work with satellite data archives), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 1, pp. 514–520.
2. Balashov I.V., Halikova O.A., Burtsev M.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Organizatsiya avtomaticheskogo polucheniya naborov informatsionnykh produktov iz tsentrov arhivatsii i rasprostraneniya sputnikovyyh 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 predvestnikh 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 izverzheniyah 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. Girina O.A., Ushakov S.V., Malik N.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Demyanchuk Yu.V., Kotenko L.V., Deistvuyushchie vulkany Kamchatki i o. Paramushir Severnykh Kuril v 2007 g. (The Active Volcanoes of Kamchatka and Paramushir Island, North Kurils in 2007), *Vulkanologiya i seismologiya*, 2009, No. 1, pp. 3–20.
  6. Goryunova V.N., available at: [http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya\\_kontenant/konferencii/gsa/sekciya\\_4\\_5\\_part1/Goryunova.pdf](http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya_kontenant/konferencii/gsa/sekciya_4_5_part1/Goryunova.pdf).
  7. Egorov V.A., Iliin V.O., Lupyan E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Vozmozhnosti postroeniya avtomatizirovannykh system obrabotki sputnikovyyh dannykh na osnove programmnoy kompleksa XV\_SAT (Construction feasibility of computer-aided systems for satellite data processing based on XV\_SAT software complex), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 431–436.
  8. Ereemov V.A., Mordvintsev I.N., Platonov N.G. Sovremennye giperspektralnye sensory i metody obrabotki giperspektralnykh 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., Lupyan E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Melnikov 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., Lupyan E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Flitman E.V., Tehnologiya postroeniya avtomatizirovannykh system hraneniya sputnikovyyh dannykh (Technology of construction of computer-aided systems for satellite data storage), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 437–443.
  11. Kondranin T.V., Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Egorov V.D., Borzyak V.V., Nikolenko A.A., Avtomatizatsiya obrabotki dannykh samoletnogo giperspektralnogo zondirovaniya (Automated airborne hyperspectral remote sensing data processing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 312–319.
  12. Lupyan E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V., Tehnologiya postroeniya avtomatizirovannykh informatsionnykh system sbora, obrabotki, hraneniya i rasprostraneniya sputnikovyyh dannykh dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach (Development technology for automated systems of collection, processing, storage and distribution of satellite data for scientific and application purposes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 81–88.
  13. Lupyan E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V., Krashennikova Yu.C., Tehnologiya postroeniya informatsionnykh system distantsionnogo monitoringa (Technologies for building remote monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26–43.
  14. Morozov S.A., available at [http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya\\_kontenant/konferencii/gsa/sekciya\\_1\\_part2/Morozov\\_1.pdf](http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/kmz/akademiya_kontenant/konferencii/gsa/sekciya_1_part2/Morozov_1.pdf).
  15. Romanova I.M., Geoportal IVS 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.
  16. Romanova I.M., Girina O.A., Maksimov A.P., Melekestsev I.V., Sozdanie kompleksnoy informatsionnoy web-sistemy "Vulkany Kurilo-Kamchatskoy ostrovnoy 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. [http://ics.khstu.ru/media/2012/N33\\_19.pdf](http://ics.khstu.ru/media/2012/N33_19.pdf).
  17. Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V., Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh system distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (The GEOSMIS system: Developing interfaces to operate data in modern remote monitoring systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108.



18. Uvarov I.A., Halikova O.A., Balashov I.V., Burtsev M.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Platonov A.E., Proshin A.A., Tolpin V.A., Krasheninnikova Yu.C., Organizatsiya raboty s meteorologicheskoy informatsiei v informatsionnyh sistemah distantsionnogo monitoringa (Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45.
19. Uvarov I.A., Matveev A.M., Burtsev M.A., Lupyan E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Savorskii V.P., Sudneva O.A., Organizatsiya raspredelennoy raboty s dannymi sputnikovyyh giperspektralnyh nablyudenii dlya resheniya nauchnyh i prikladnyh 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.
20. Hanchuk A.I., Sorokin A.A., Smagin S.I., Korolev S.P., Makogonov S.V., Tarasov A.G., Shestakov N.V., Rasvitie informatsionno-telekommunikatsionnyh system v DVO RAN (Development of information and telecommunication systems in the Far Eastern Branch of RAS), *Informatsionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy*, 2013, No. 4, pp. 45–57.
21. Abrams M., Hook S., NASA's Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI), in Kunzer and Dech (eds.), Thermal Infrared Remote Sensing: sensors, methods and applications, *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Springer, 2013, DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6\_6.
22. Abrams M., Pieri D., Realmuto V., Wright R., Using EO-1 Hyperion data as HyspIRI preparatory data sets for volcanology applied to Mt. Etna, Italy, *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, No. 6, pp. 375–385.
23. 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.
24. Chang G., Mahoney K., Briggs-Whitmire A., Kohler D., Lewis M., Mobley C., Moline M., Boss E., Kim M., Philpot W., Dickey T., The new age of hyperspectral oceanography, *Oceanography*, 2004, Vol. 17 (2), pp. 16–23.
25. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J., USGS Digital Spectral Library splib06a, *U.S. Geological Survey*, 2007, Data Series 231, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>.
26. Flynn L.P., Harris A.J., Rothery D.A., 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.
27. Flynn L.P., Harris A.J., Wright R., Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+ , *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 78 (1), pp. 180–193.
28. Flynn L.P., Mougini-Mark P.J., 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.
29. Glaze L., Francis P.W., Rothery D.A., Measuring thermal budgets of active volcanoes by Satellite remote sensing, *Nature*, 1989, Vol. 338, pp. 144–146.
30. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A., Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis, *Lincoln laboratory journal*, 2005, Vol. 15, No. 2, pp. 271–298.
31. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Snow J.W., Characterization and Delineation of Plumes, Clouds and Fires in Hyperspectral Images, *SPIE 4049*, 2000, pp. 24–28.
32. Harris A.J., Flynn L.P., Keszthelyi L., Mougini-Mark P.J., Rowland S.K., Resing J.A., Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data, *Bulletin of Volcanology*, 1998, Vol. 60 (1), pp. 52–71.
33. Kearney C.S., Dean K., Realmuto V.J., I.M. Watson, J. Dehn, F. Prata, Observations of SO<sub>2</sub> production and transport from Bezymianny volcano, Kamchatka using the MODerate resolution Infrared Spectroradiometer (MODIS), *Int. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, No. 22, pp. 6647–6665.
34. Koeppen W.C., Patrick M., Orr T., Sutton J., Dow D., Wright R., Constraints on the partitioning of Kilauea's lavas between surface and tubed flows, estimated from infrared satellite data, sulfur dioxide flux measurements, and field observations, *Bulletin of Volcanology*, 2013, Vol. 75, doi:10.1007/s00445-013-0716-3.
35. Lombardo V., Buongiorno M.F., Pieri D., 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.
36. Miller T.P., Casadevall T.J., Volcanic ash hazards to aviation, *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, San Diego, California, 2000, pp. 915–930.
37. 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.
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. Prata A.J., Observation of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances, *Int. J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10 (4), pp. 751–761.

40. Ramsey M., Dehn J., Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER into near real-time monitoring using AVHRR, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 2004, Vol. 135, pp. 127–146.
41. Ramsey M.S., 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.
42. Ramsey M.S., Wessels R.L., 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.
43. Schneider D.J., Dean K.G., Dehn J., Miller T.P., Kirianov V.Yu., Monitoring and Analyses of Volcanic Activity Using Remote Sensing Data at the Alaska Volcano Observatory: Case Study for Kamchatka, Russia, December 1997, *Remote Sensing of Active Volcanism. Geophysical Monograph*, 2000, Vol. 116, pp. 65–85.
44. Schneider D.J., Rose W.I., Observations of the 1989–1990 Redoubt volcano eruption clouds using AVHRR satellite imagery, *US Geological Survey Bull.*, 1994, Vol. 2047, pp. 405–418.
45. Watson I.M., Realmuto V.J., Rose W.I., Prata A.J., Bluth G.J.S., Gu Y., Bader C.E., Yu T., Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging Spectroradiometer, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 2004, Vol. 135 (1–2), pp. 75–89.
46. Wen S., Rose W.I., Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5, *Journal of Geophysical Research*, 1994, Vol. 99 (D3), pp. 5421–5431.
47. Wright R., H. Garbeil, Davies A.G., Cooling rate of some active lavas determined using an orbital imaging spectrometer, *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2010, Vol. 115, p. B06205, doi:10.1029/2009JB006536.
48. Wright R., Glaze L., Baloga S.M., Constraints on determining the eruption style and composition of terrestrial lavas from space, *Geology*, 2011, Vol. 39, pp. 1127–1130.
49. Wright R., Lucey P., Crites S., Horton K., Wood M., Garbeil H., BBM/EM design of the thermal hyperspectral imager: An instrument for remote sensing of earth's surface, atmosphere and ocean, from a microsatellite platform, *Acta Astronautica*, 2013, Vol. 87, pp. 182–192, Doi:10.1016/j.actaastro.2013.01.00.
50. Yu T., Rose W.I., Prata A.J., Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR, *Journal of Geophysical Research*, 2002, Vol. 107 (D16), DOI: 10.1029/2001JD000706.