

УДК 551.21.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ
ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В ИС VOLSATVIEW

*Е.И. Гордеев¹, О.А. Гирина¹, Е.А. Лунян², А.А. Сорокин³, Д.В. Мельников¹,
А.Г. Маневич¹, И.М. Романова¹, Л.С. Крамарева⁴, В.Ю. Ефремов², Д.А. Кобец²,
А.В. Кашицкий², С.П. Королев³, М.А. Бурцев², С.Б. Самойленко¹*

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

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997

³ Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000

⁴ Дальневосточный центр «Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии Планета», Хабаровск, 680673

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными в мире в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и их непредсказуемостью. Для обеспечения безопасности населения при извержениях необходимо проведение вулканологами комплексного мониторинга вулканов с использованием данных всех доступных видов наблюдений (дистанционных и наземных инструментальных средств, метеоинформации). Созданная в 2011-2015 гг. совместными усилиями специалистов ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДВ НИЦ Планета ИС «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)» ориентирована на непрерывный мониторинг вулканической активности Камчатки и Курил и анализ влияния извержений на окружающую среду.

Введение

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными в мире в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и их непредсказуемостью. Такие извержения представляют наибольшую опасность для населения. Процессы, связанные с извержениями, протекают быстро, для их изучения и парирования возникающих угроз (в том числе для полетов авиации) необходим постоянный мониторинг вулканов. Для обеспечения не только наблюдений, но и прогнозов процессов, связанных с извержениями вулканов (например, распространение лавовых потоков, пепловых облаков и шлейфов) необходимо проведение комплексного мониторинга вулканов с использованием данных всех доступных видов наблюдений (дистанционных и наземных инструментальных средств, метеорологической информации и т.д.).

На Камчатке расположено 30 активных вулканов. По данным Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) [1, 3], в 21 веке здесь ежегодно происходят умеренной силы извержения 3-6 вулканов, а также от 5 до 20 сильных эксплозивных событий с выбросом пеплов до 7-15 км н.у.м.

В последние годы разработаны новые технологии, позволившие создать автоматизированные информационные системы (ИС), направленные на постоянное получение и обработку данных о различных природных явлениях, ведение долговременных архивов данных различных видов наблюдений и проведение анализа больших объемов информации. Такая ИС «Ди-

станционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)”, ориентированная на непрерывный мониторинг вулканической активности региона, создана в 2011-2015 гг. совместными усилиями специалистов ИВиС ДВО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДВ НИЦ Планета [4-9]. ИС VolSatView предоставляет различные инструменты для анализа информации, получаемой на основе методов ДЗЗ. Кроме того, она позволяет работать как с оперативно поступающими данными, так и с данными долговременных архивов. По разнообразию доступной в системе информации, степени автоматизации процессов обработки и хранения данных, инструментам анализа данных и возможности их развития ИС VolSatView не только не уступает своим зарубежным аналогам, но и превосходит их. Разработанные новые методы комплексного анализа данных ДЗЗ и наземных инструментальных наблюдений, в том числе моделирование различных вулканогенных процессов, направленные на оценку опасности взрывных извержений вулканов, позволят контролировать повышение активности вулканов и оценивать воздействия вулканической деятельности на окружающую природу.

Возможности ИС VolSatView

Для обеспечения оперативного мониторинга и исследования вулканической активности Камчатки оперативными и архивными спутниковыми и метеорологическими данными и информационными продуктами, получаемыми на их основе, а также для комплексной обработки и анализа этой информации совместно с данными, поступающими из других ИС (“Вулканы Курило-Камчатской островной дуги” (VOKKIA) Геопортала ИВиС ДВО РАН (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/>) и автоматизированной ИС (АИС) Сигнал (<http://signal.febras.net>)) [6, 10, 11], в системе VolSatView:

а) организованы доступ пользователей к различным спутниковым данным и возможность автоматического формирования на их основе базовых информационных продуктов, использующихся при решении задач мониторинга и изучения вулканической активности;

б) реализована возможность совместной обработки оперативной и ретроспективной спутниковой информации, сопоставление ее с видеоинформацией, выполнение моделирования распространения пепловых шлейфов, классифицирование различных вулканогенных объектов;

в) организовано поступление спутниковой информации непосредственно из центра приема и обработки спутниковых данных ДЦ НИЦ Планета (<http://www.dvrcpod.ru/>) для повышения оперативности получения данных;

г) обеспечена унификация представления разнотипных данных, поступающих из различных информационных систем и ресурсов, а также подбор необходимых наборов данных, их обработка и анализ на основе технологии GeoSmis [13];

д) создан широкий набор инструментов для работы с рядами наблюдений, с картографической информацией, позволяющих:

- представлять данные в различных проекциях;

- анализировать поля температуры, мгновенно просматривая значения температуры (в градусах Цельсия или Кельвина) в каждой точке снимка, что важно для оперативного анализа изменения температур и размеров термальных аномалий в районах вулканов, в частности для предсказания будущей активности вулканов и оценки вулканоопасности для их окрестностей;
- выделять пепловые облака и шлейфы, определять и сохранять их характеристики в базе данных (высота, протяженность, азимут распространения от вулкана, размер и площадь облака), анализировать временные серии пепловых облаков, визуализировать пепловые шлейфы и облака по отдельным или всем вулканам за определенный период времени;
- анализировать спектральные характеристики вулканогенных объектов, получаемых с использованием гиперспектральных данных;
- сравнивать разновременные данные и анализировать данные совместно с другой информацией, имеющейся в системе;
- проводить классификации данных;
- представлять информацию о пепловых шлейфах, наблюдаемых на спутниковых снимках, совместно с результатами численного моделирования распространения этих шлейфов.

Примеры комплексного анализа данных об эксплозивных извержениях вулканов

Камчатки в ИС VolSatView

1. Вулкан Шивелуч. Рассмотрим одно из эксплозивных событий вулкана, эруптивная активность которого, начавшаяся в 1980 г., продолжается до настоящего времени. Происходит рост экструзивного купола вулкана - выжимаются лавовые блоки, этот процесс сопровождается умеренной силы эксплозиями, раскаленными лавинами, свечением лавы и раскаленных лавин в темное время суток, сильной и умеренной парогазовой деятельностью.

28 февраля 2015 г. По видеоданным KVERT и Weathernews Inc., в 01:08 UTC с купола вулкана начала подниматься пепловая колонна, через минуту она достигла 5,5 км над уровнем моря (н.у.м.) (рис. 1а), в следующую минуту вершинная часть колонны исчезла за кромкой кадра (рис. 1б). Максимальный подъем колонны пепла был оценен по видеоданным Камчатского филиала геофизической службы (КФ ГС) РАН – в 01:12 UTC она поднялась до 10 км н.у.м. (рис. 2а) и затем начала снижаться (рис. 2б). По данным ИС VolSatView, первый снимок, на котором отмечался пепловый шлейф от вулкана, поступил со спутника TERRA MODIS в 01:17 UTC, то есть во время снижения пепловой колонны. Пепловый шлейф был выделен по разности радиояркостных температур в каналах 11-12 мкм (31m32), были измерены его протяженность (59 км) и направление перемещения от вулкана (азимут 72 градуса) (рис. 3а). Также по температуре пеплового облака (рис. 3б) и атмосферному профилю была определена высота его головной части, составившая 9 км н.у.м. Снижение пепловой колонны и трансформация ее верхней части в шлейф отмечается по видеоданным КФ ГС РАН (рис. 2б) и спутниковому снимку Suomi NPP (рис. 4). Комплексный анализ изображений с двух видеокамер (KVERT и Weathernews Inc. и КФ ГС РАН) и спутниковых данных ИС VolSatView, позволил оценить высоту пепловой колонны и направление смещения пеплового шлейфа и

выпустить Volcano Observatory Notice for Aviation (VONA) с корректными данными об эксплозивном событии и прогнозе опасности вулкана для авиатранспорта [15]. Результаты моделирования перемещения пеплового шлейфа, полученные с помощью АИС Сигнал [11, 12] и ИС VolSatView, показали хорошую сопоставимость с конкретными спутниковыми данными (рис. 5, 6).

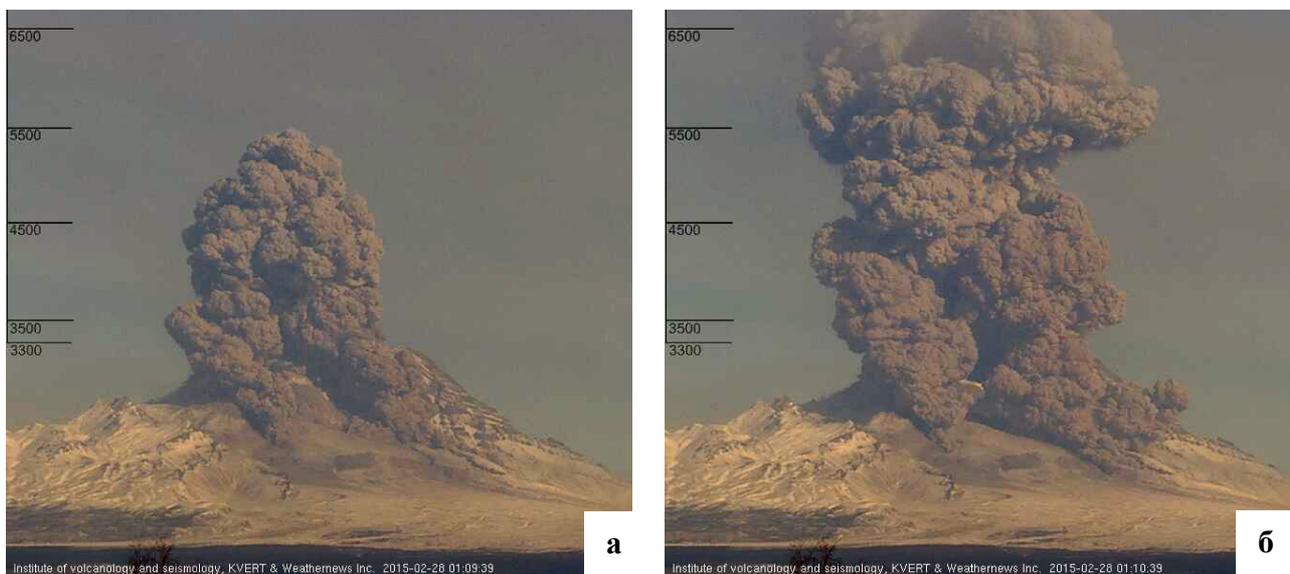


Рис. 1. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г., подъем эруптивной колонны до 5,5 км н.у.м. в 01:09 UTC (а), выше 7 км н.у.м. в 01:10 UTC (б) по данным видеокамеры KVERT и Weathernews Inc.

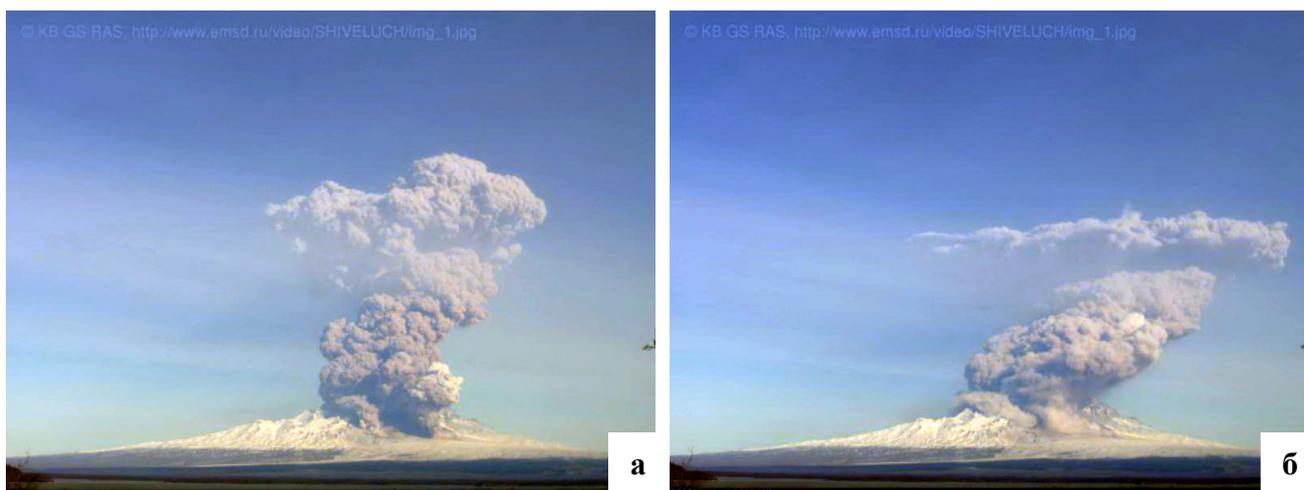


Рис. 2. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г., подъем эруптивной колонны до 10 км н.у.м. в 01:12 UTC (а), снижение ее до 9 км н.у.м. в 01:15 UTC (б), видеоданные КФ ГС РАН

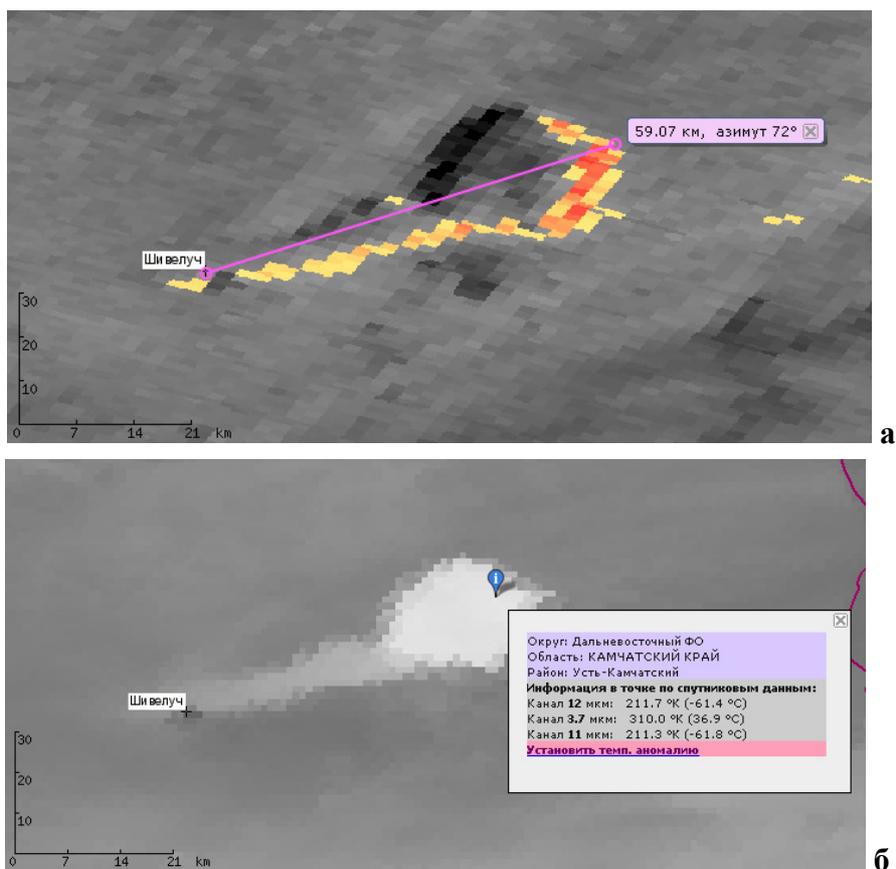


Рис. 3. Измерение параметров пеплового шлейфа вулкана Шивелуч на спутниковом снимке TERRA MODIS от 01:17 UTC 28 февраля 2015 г., по данным ИС VolSatView: протяженность и направление распространения шлейфа (а), температура шлейфа для определения его высоты по атмосферному профилю (б)

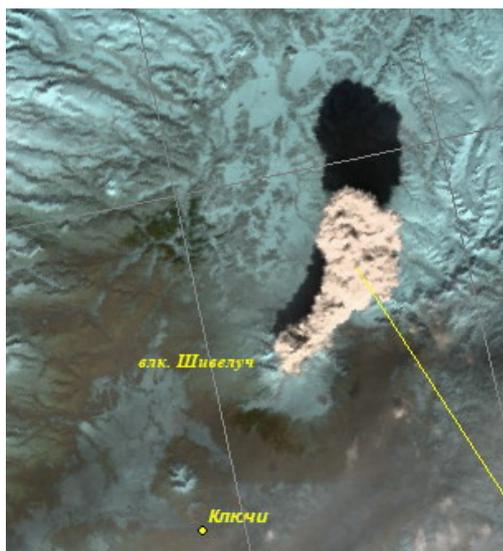


Рис. 4. Трансформация верхней части пепловой колонны вулкана Шивелуч в шлейф на спутниковом снимке Suomi NPP от 01:15 UTC 28 февраля 2015 г., по данным ИС VolSatView

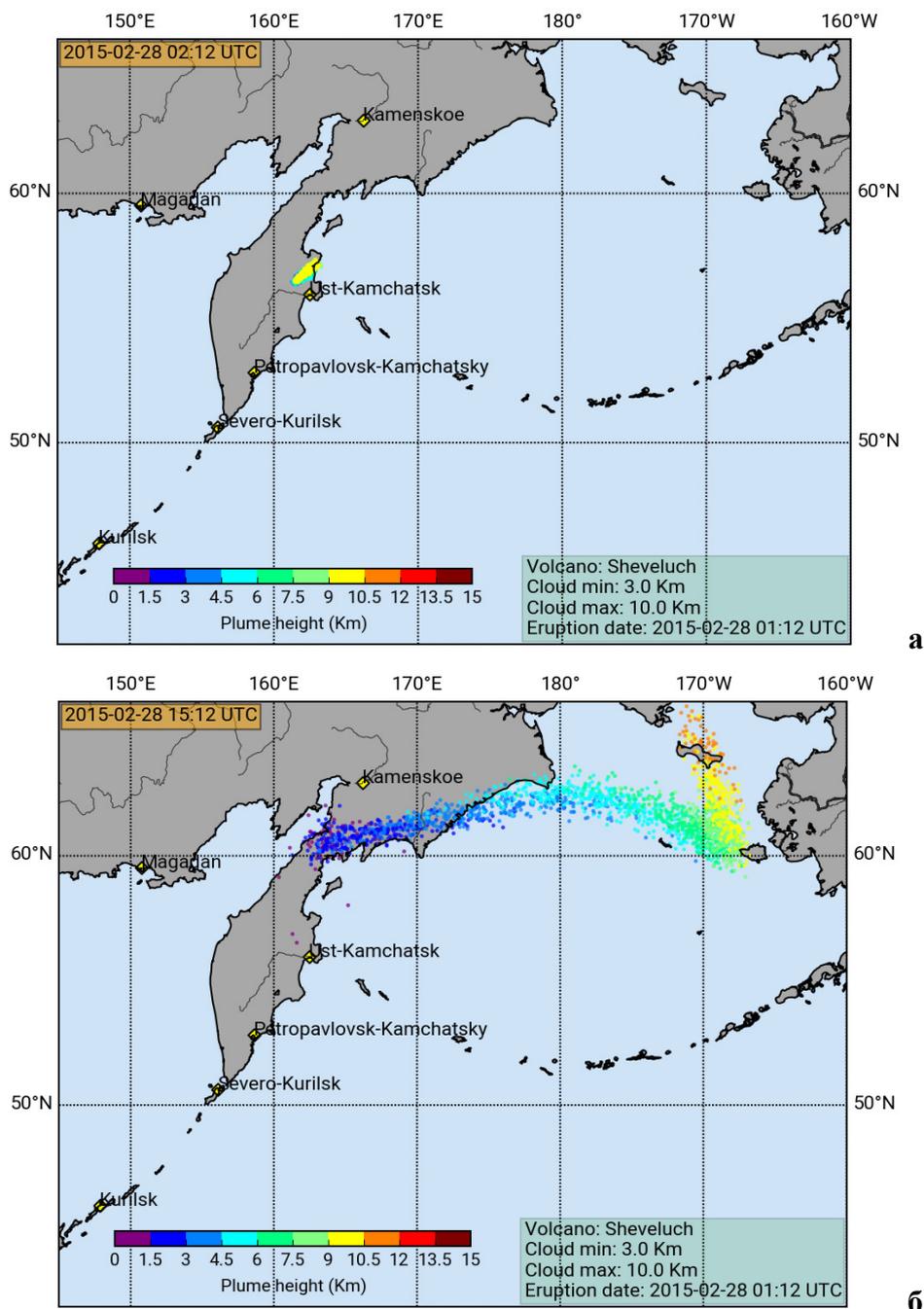


Рис. 5. Результаты моделирования перемещения пеплового шлейфа вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г. в 02:12 (а) и 15:12 (б) UTC по данным АИС Сигнал ВЦ ДВО РАН

Следует отметить, что комплексный анализ данных по любым взрывным событиям вулканов Камчатки можно проводить как оперативно, так и ретроспективно – по архивным данным KVERT, ИС VolSatView и АИС Сигнал.

2. Вулкан Жупановский. Взрывное извержение вулкана началось 6 июня 2014 г. и продолжается в нестабильном режиме до настоящего времени [2, 14]. 12 июля с 19:15 UTC отмечались пепловые выбросы до 10 км н.у.м., после или во время которых произошло обру-

шение части активного конуса Приемыш, сопровождавшееся формированием горячих отложений обвала, небольшими пирокластическими и грязевыми потоками [14]. Небольшие по объему обрушения конуса Приемыш были отмечены также 14 июля в западной части обвалных отложений, сформированных 12 июля. Общая площадь новообразованных отложений обвала вместе с грязевыми потоками, определенная с помощью инструментов ИС VolSatView, составила около 20 км², при средней мощности отложений 2 м их объем равен 0,04 км³. Пепловые шлейфы 12-14 июля протянулись на тысячи километров на восток от вулкана и оставались в атмосфере над п-овом Аляска до 16 июля (рис. 7).

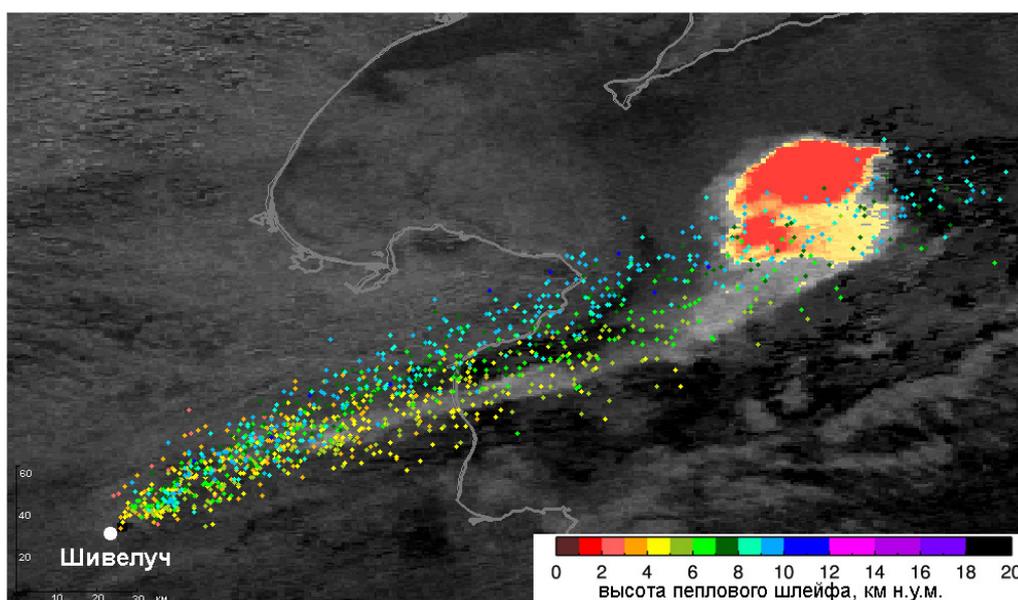


Рис. 6. Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа от вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г., выполненные по модели PuffUAF в ИС VolSatView, визуализированные на спутниковом снимке NOAA-19 от 02:41 UTC (4m5) 28 февраля 2015 г.



Рис. 7. Пепловый шлейф вулкана Жупановский 12-14 июля 2015 г. (конфигурация шлейфа на спутниковых снимках на разных стадиях события) по данным ИС VolSatView

На снимке высокого разрешения, полученном 15 сентября 2015 г. в 00:21 UTC со спутника Landsat-8, хорошо выделяются две ветви обвальных отложений с различной структурой (рис. 8а). Проведенная в ИС VolSatView классификация этих отложений с использованием данных прибора КМСС (многоспектральная аппаратура среднего разрешения) спутника

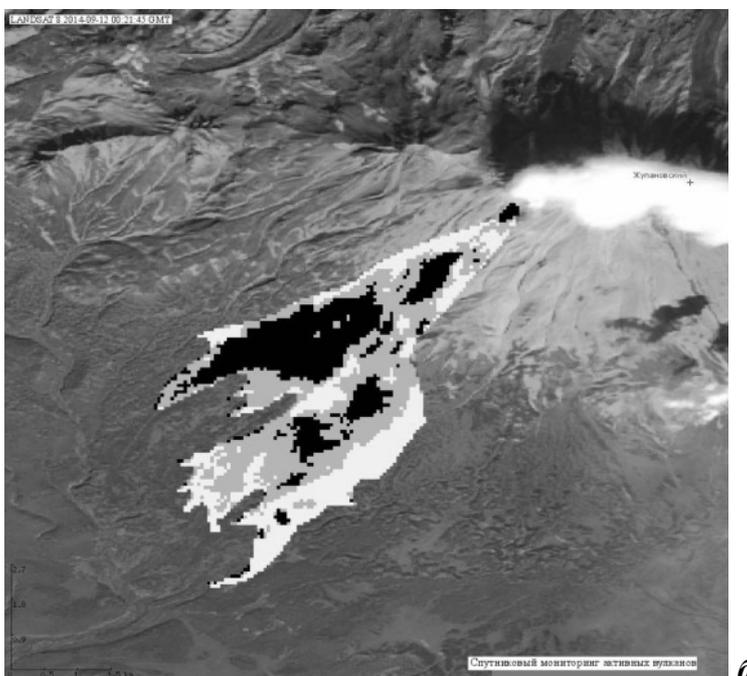
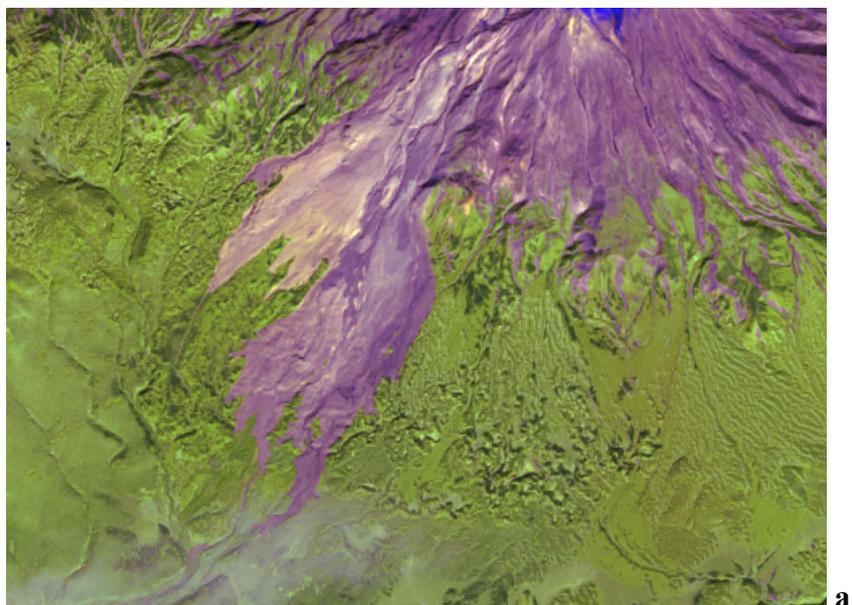


Рис. 8. Результат анализа средствами ИС VolSatView отложений обвала вулкана Жупановский, образовавшихся 12-14 июля 2015 г.: изображение района обвальных отложений 15 сентября 2015 г. (спутник Landsat-8) (а); классификация обвальных отложений, выполненная по данным прибора КМСС спутника Метеор-М № 2 на фоне изображения в панхроматическом канале прибора OLI-TIRS (спутник Landsat 8) 12 сентября 2014 г. (б)

Метеор-М № 2 от 26 июля 2015 г., позволяет выявить несколько характерных участков на этих образованиях (рис 8б). Вероятно, горячий материал эксплозий обрушивался на ледники и снежники, растапливал их, и водонасыщенные рыхлые образования обвала (оползня-обвала?) с большим содержанием тонких частиц и со следами течения на поверхности покрыли широким плащом подножие вулкана. Из разрушенного сектора конуса Приемыш 14 июля дополнительно обрушился относительно сухой (возможно теплый) грубообломочный материал, отложившийся в основном на левой ветви обвала 12 июля. Косвенным подтверждением формирования грубообломочной массы обвала 14 июля 2015 г. является слабонасыщенное пеплом облако, поднявшееся лишь до 2 км н.у.м., перемещавшееся сначала на юго-запад и затем на восток-юго-восток от вулкана [14].

Следующее сильное эруптивное событие произошло в 03:47 UTC 30 ноября - эксплозии подняли пепел до 8 км н.у.м., продукты разрушенной при этих взрывах части конуса Приемыш, значительно меньшего объема, чем 12-14 июля, отложились на материале обрушений 12-14 июля, протяженность этих отложений составила 15 км (рис. 9).



Рис. 9. Отложения обвала на южном склоне вулкана Жупановский, сформированные во время эксплозивного события 30 ноября 2015 г., фото от 11 декабря 2015 г. А. Сокоренко

На снимке высокого разрешения, полученном 13 декабря 2015 г. в 00:15 UTC со спутника Landsat-8, выделяются свежие обвальные отложения, основная масса которых отложилась на материале обвала 12 июля 2015 г. (рис. 10а). Горячие пирокластические продукты обрушивались на заснеженные и скованные морозом отложения обвалов 12 и 14 июля, поэтому границы их образований и структура хорошо выражены на снимке. Проведенная в ИС VolSatView классификация этих образований позволяет разделить пирокластические отложения на свежие, оставшиеся неизменными после формирования (выделяются синим цветом на рис 10б),

и перемещенные водой, появившейся при растапливании горячими отложениями снега и льда на склонах вулкана (выделяются желтым и зеленым цветом на рис 10б).

Показанные примеры комплексного анализа данных ДЗЗ и наземных инструментальных наблюдений эксплозивных извержений вулканов Камчатки в ИС VolSatView подтверждают возможность оперативного контроля повышения активности вулканов и количественной оценки воздействия вулканической деятельности на окружающую природу.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00042).

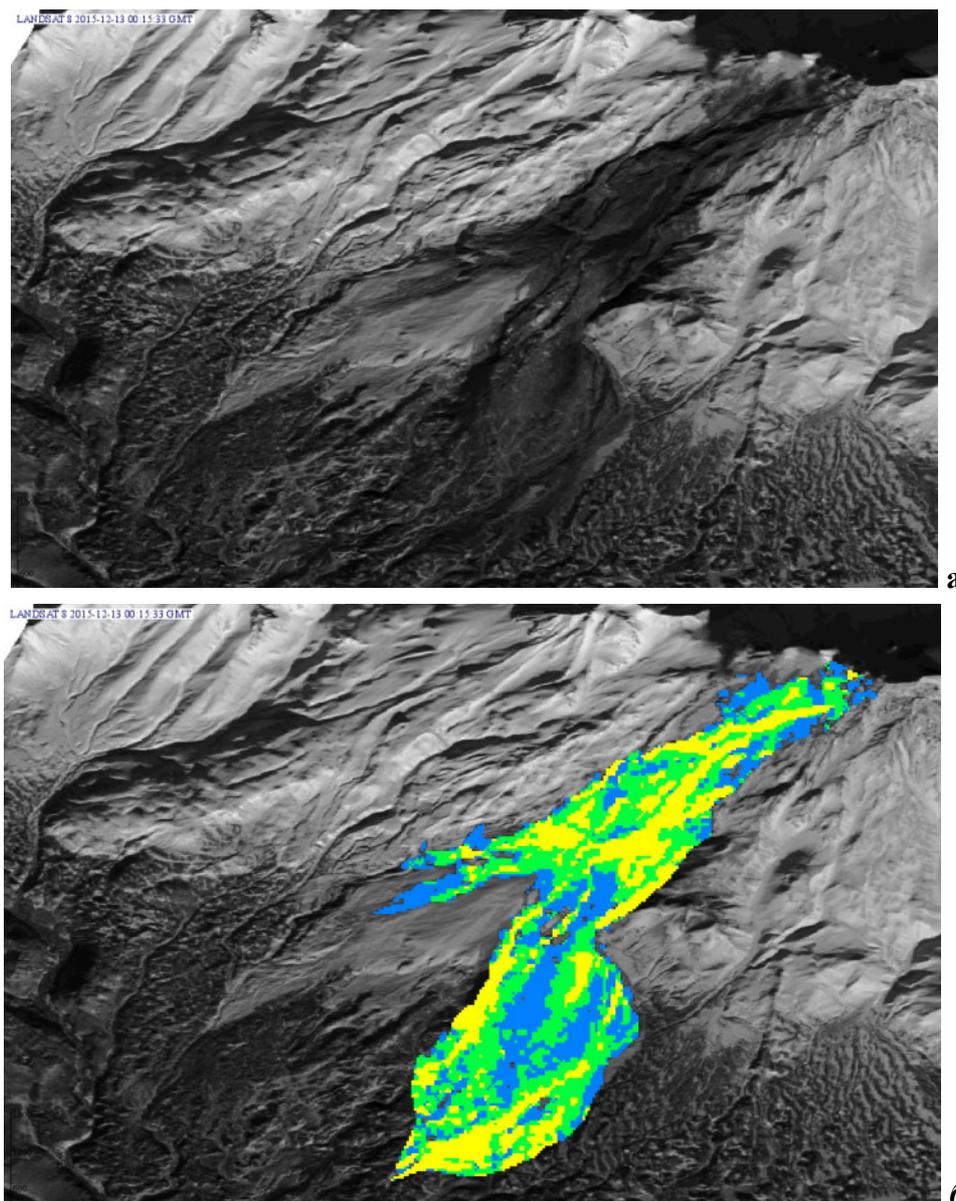


Рис. 10. Результат анализа средствами ИС VolSatView отложений обвала вулкана Жупановский, образовавшихся 30 ноября 2015 г.: изображение района обвальных отложений 13 декабря 2015 г. (в панхроматическом канале прибора OLI-TIRS, спутник Landsat-8) (а); классификация обвальных отложений, выполненная по данным спутника Landsat 8, 13 декабря 2015 г. (б)

Список литературы

1. *Гирина О.А.* Камчатской группе реагирования на вулканические извержения (KVERT) - 20 лет // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 36-41.
2. *Гирина О.А., Ненашева Е.М.* Извержения вулкана Жупановский в 2013-2015 гг. // Отчизны верные сыны. Материалы XXXII Крашенинниковских чтений. Петропавловск-Камчатский: Камчатская краевая научная библиотека им. С.П. Крашенинникова. 2015. С. 172-174. doi: 10.13140/RG.2.1.2125.8720.
3. *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.
4. *Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А. и др.* 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.
5. *Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А. и др.* Изучение продуктов извержений вулканов Камчатки с помощью гиперспектральных спутниковых данных в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 113-128.
6. *Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С. и др.* Создание информационного сервиса "Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155-170.
7. *Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Матвеев А.М. и др.* Организация работы со спутниковыми данными для решения задач дистанционного мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил на примере спутникового сервиса VolSatView // Труды Четвертой научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", 30 сентября - 4 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 45-48.
8. *Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р. и др.* Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // [Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса](#). 2011. Т. 8. № 1. С. 26-43.
9. *Лупян Е.А., Милехин О.Е., Антонов В.Н. и др.* Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ Планета // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89-97.
10. *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.

12. *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.
13. *Сорокин А.А., Королев С.П., Урманов И.П. и др.* Информационная система для работы с данными инструментальных наблюдений с целью проведения исследований и мониторинга опасных природных явлений на Дальнем Востоке России // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием, Южно-Сахалинск, 26 - 30 мая 2015 г.: сборник материалов. Владивосток: Дальнаука. 2015. Т. 2. С. 443-447.
14. *Толтин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю. и др.* 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.
15. <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc.php?name=Zhupanovsky>
16. VONA-KVERT 2015-105: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/index.php?n=2015-105>