

Спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил

О. А. Гирина, Д. В. Мельников, А. Г. Маневич

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

На Камчатке и Северных Курилах расположено 36 действующих вулканов, ежегодно здесь наблюдаются извержения трёх-восьми вулканов. Ежедневный спутниковый мониторинг вулканов начал проводиться Камчатской группой реагирования на вулканические извержения (KVERT) в сотрудничестве с коллегами из Аляскинской вулканологической обсерватории (США) с 1997 г. С 2002 г. учёные KVERT проводят обработку и анализ первичных снимков спутниковых систем NOAA (AVHRR), Terra и Aqua (MODIS) и др. близко к реальному времени для выявления пепловых шлейфов и термальных аномалий на активных вулканах. Многосторонний анализ имеющихся опубликованных сведений о вулканах, а также визуальных и спутниковых данных, полученных учёными KVERT в течение 24-летнего ежедневного мониторинга вулканической активности, позволил выявить основные черты деятельности каждого из действующих вулканов и оценить степень их опасности для авиатранспорта и населения полуострова. С созданием в 2011 г. информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)» вулканологи получили не имеющие аналогов в мире возможности спутниковых наблюдений за активными вулканами. Система VolSatView, объединяя широкий спектр данных различных спутниковых систем, поступающих из разных источников, позволяет непосредственно в веб-интерфейсе с помощью созданных специальных инструментов совместно обрабатывать оперативную и ретроспективную спутниковую информацию, сопоставлять её с видеоинформацией, выполнять моделирование распространения пепловых шлейфов, классифицировать различные вулканогенные объекты и т. д. VolSatView даёт возможность решать задачи разного уровня — от оперативного мониторинга активности вулканов до фундаментальных проблем вулканологии. Характер активности вулканов меняется и актуальность решения проблемы «как работает вулкан» остаётся. Для выполнения этой задачи, а также поиска предвестников эксплозивных извержений вулканов, необходимо продолжать долговременные дистанционные наблюдения за вулканами региона; изучать изменения их активности с течением времени; сопоставлять работу вулканов, поставляющих на поверхность земли эруптивные продукты сходного и контрастного составов.

Ключевые слова: вулкан, эксплозивное извержение, Камчатка, Северные Курилы, спутниковый мониторинг, информационная система, VolSatView

Одобрена к печати: 24.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209

На Камчатке и Северных Курилах расположено 36 действующих вулканов, ежегодно здесь наблюдаются извержения трёх-восьми вулканов: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert> (рис. 1). Три вулкана находятся в состоянии почти непрерывных слабых или умеренных извержений, на фоне которых происходят пароксизмальные эксплозивные события: Ключевской активен в течение нескольких сотен лет; Молодой Шивелуч — с августа 1980 г., со времени начала роста лавового купола в эксплозивном кратере катастрофического извержения 12 ноября 1964 г.; Безымянный — с 22 октября 1955 г., со времени пробуждения после длительного молчания (Горшков, 1957; Иванов и др., 1981; Пийп, 1956; Girina, 2013). В XX веке на Камчатке произошло три катастрофических извержения вулканов Ксудач (28.03.1907 г. с объёмом изверженных продуктов 1,5–2 км³), Безымянный (30.03.1956 г., 3 км³) и Шивелуч (12.11.1964 г., 1,5 км³); всего отмечено более 100 извержений 14 вулканов (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Толбачик, Кизимен, Карымский, Жупановский, Авачинский, Корякский, Горелый, Мутновский, Ксудач, Желтовский, Ильинский) продолжительностью от нескольких часов до полутора лет (Горшков, 1957; Горшков, Дубик, 1969; Мелекесцев и др., 1995; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). В XXI веке наблюдалась высокая активность вулканов Камчатки, долгое время находившихся в состоянии покоя: Корякский —

извержение с 20 декабря 2008 г. по 26 августа 2009 г. (предыдущее было в 1956–1957 гг.), Кизимен — с 9 декабря 2010 г. по 9 декабря 2013 г. (1928–1929), Толбачинский дол — с 27 ноября 2012 г. по 15 сентября 2013 г. (1975–1976), Жупановский — с 23 октября 2013 г. по 20 ноября 2016 г. (1956–1957), Камбальный — с 24 марта по 11 апреля 2017 г. (неизвестно) (Гирина и др., 2010, 2012, 2017в, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). На влк. Шивелуч кроме многочисленных отдельных эксплозивных эпизодов с выносом пепла до 10–12 км над уровнем моря (н.у.м.) произошло три крупных пароксизмальных события с объёмом изверженных продуктов до $0,5 \text{ км}^3$ — 9 мая 2004 г., 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. (Гирина и др., 2006, 2007; Овсянников, Маневич, 2010). Всего в XXI веке (за 17 лет) отмечено 55 извержений продолжительностью от нескольких часов до трёх лет 12 вулканов (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Толбачик, Кизимен, Карымский, Жупановский, Авачинский, Корякский, Горелый, Мутновский, Камбальный) (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). Кроме этого, ежегодно происходило до 25 сильных эксплозивных событий на камчатских вулканах, при которых пеплы поднимались до 10–15 км н.у.м. (Гирина и др., 2017а). Эруптивная деятельность вулканов Северной группы Камчатки (непрерывные эксплозивные или эксплозивно-эффузивные извержения влк. Ключевской с подъёмом эруптивных колонн до 8–12 км н.у.м.; непрерывное эксплозивно-эффузивное трещинное Толбачинское извержение; эксплозивные извержения влк. Шивелуч и Безымянный с выносом пепла от 6 до 15 км н.у.м.) и влк. Кизимен (непрерывное эксплозивно-эффузивно-экструзивное извержение) в 2000–2017 гг. показана на *рис. 2*. Вероятно, перерыв в эксплозивной активности андезитового влк. Безымянный с 01.09.2012 г. по 09.03.2017 г. связан с продолжительными извержениями базальтов в районах влк. Ключевской (01.09.2012–15.01.2013 г., 15.08–20.12.2013 г., 01.01–24.03.2015 г. и 24.03–06.11.2016 г.) и Толбачинского дола (27.11.2012–15.09.2013 г.) (Гирина, 2016).

Со времени организации Камчатской вулканологической станции им. Ф. Ю. Левинсона-Лессинга в п. Ключи в 1935 г. исследования вулканов осуществлялись преимущественно геологическими и геофизическими методами, доставка учёных к отдельным вулканам проводилась на собачьих упряжках, лошадях, автомашинах. С развитием авиатранспорта во второй половине XX века один-два раза в год выполнялись облёты на самолётах всех вулканов Камчатки для оценки их активности. Тогда же начала применяться аэрофотосъёмка для изучения морфологии действующих вулканов и продуктов их извержений. С развитием космонавтики в Институте вулканологии стали появляться снимки поверхности Камчатки и Курил с метеорологических спутников, а также фотографии вулканов, сделанные космонавтами с орбитальной станции «Мир». Например, по спутниковым снимкам было отслежено распространение пеплового шлейфа влк. Алаид во время извержения в 1981 г. (Федотов и др., 1981).

Регулярный спутниковый мониторинг вулканов Камчатки начал проводиться с 1997 г. в рамках соглашения между Аляскинской вулканологической обсерваторией (АВО) Геологической службы США и Камчатской группой реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), организованной в 1993 г. для снижения опасности авиаполётов в северо-западной части Тихоокеанского региона при эксплозивных извержениях вулканов — для быстрого обнаружения повышенной активности вулканов и своевременного предупреждения авиакомпаний о начале извержений (Гирина, Гордеев, 2007; Girina, 2012; Gordeev, Girina, 2014; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009). Необходимость такого мониторинга была обусловлена следующими причинами: расположение многих активных вулканов в труднодоступных районах, далеко от населённых пунктов; отсутствие сейсмических станций на большинстве действующих вулканов (например, и в XXI веке на Камчатке сейсмостанции имеются только на десяти из тридцати активных вулканов); потребность в ежечасной оценке состояния вулканов и авиатрасс, пролегающих в Курило-Камчатском регионе (имеется ли угроза перемещения пепловых облаков или шлейфов в зоны расположения международных и местных авиалиний) и т.д. Следует отметить также, что, по различным причинам, проблема детальной изученности большинства вулканов Камчатки и Курил остаётся острой и в настоящее время: не для всех вулканов известны исторические извержения и восстановлена эруптивная история с помощью тефрохронологии. В связи с этим, единственным надёжным источником наблюдений за продолжением или возобновлением вулканической активности на Камчатке и Курилах является спутниковая информация.



Рис. 1. Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил

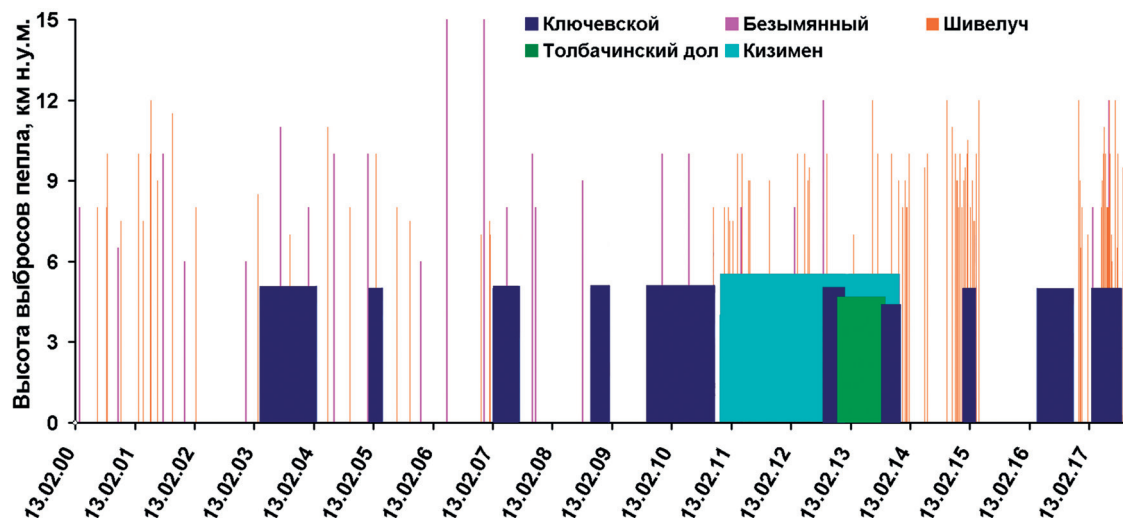


Рис. 2. Эруптивная деятельность вулканов Северной группы Камчатки и влк. Кизи́мен в 2000–2017 гг. (непрерывные извержения влк. Ключевской, влк. Кизи́мен и трещинного Толбачинского показаны вне масштаба блоками фиолетового, бирюзового и зелёного цвета, соответственно)

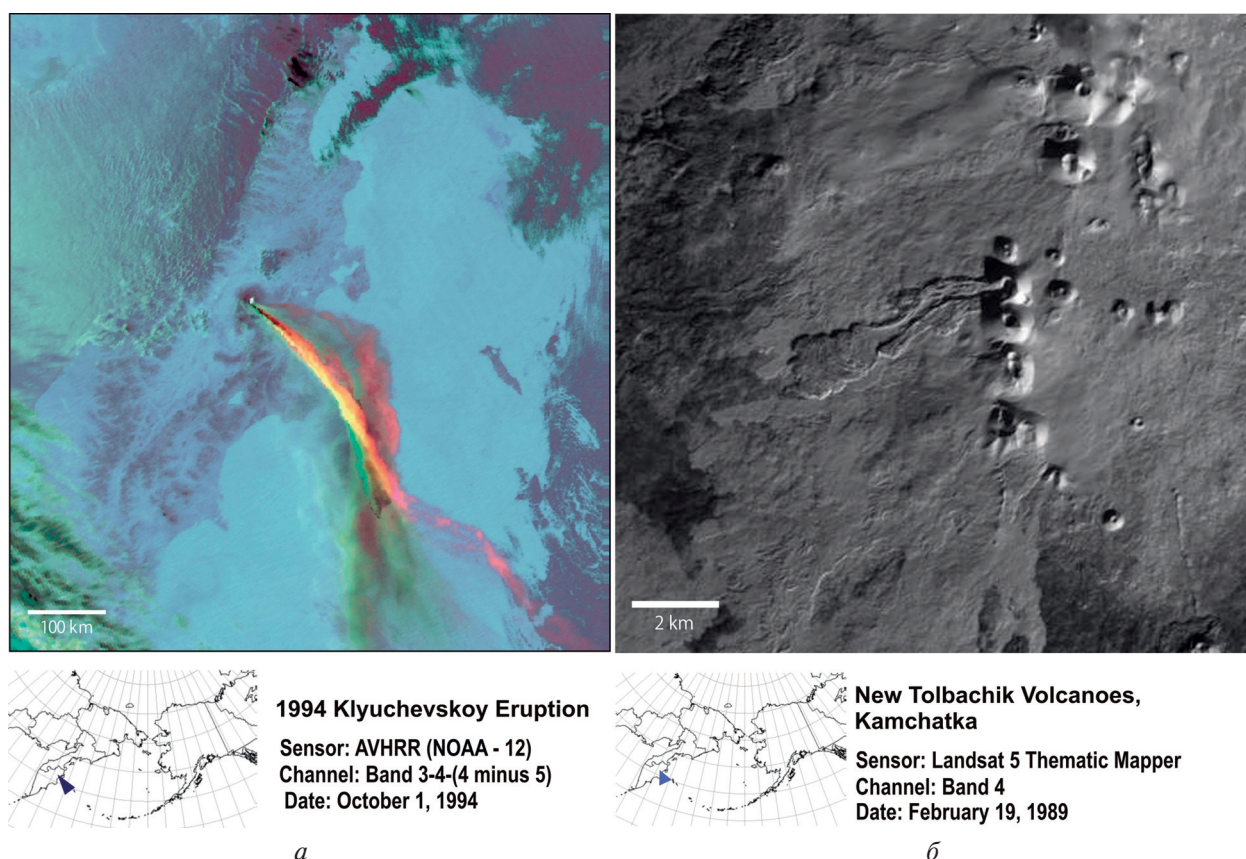


Рис. 3. Спутниковые данные, предоставленные KVERT учёными из Аляскинской вулканологической обсерватории США: *а* — пепловый шлейф от влк. Ключевской 1 октября 1994 г. (NOAA-12); *б* — состояние конусов Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 19 февраля 1989 г. (Landsat-5)

На протяжении многих лет для оперативного мониторинга вулканов во всём мире используются данные полярно-орбитальных спутников серии NOAA (AVHRR). Научным сообществом мира созданы и совершенствуются методы обработки спутниковых данных для выделения и анализа в районах действующих вулканов термальных аномалий, пепловых и аэрозольных облаков, проявляющихся при эксплозивных извержениях вулканов и представляющих серьёзную опасность для авиатранспорта (*рис. 3а*) (Corradini et al., 2009; Miller, Casadevall, 2000; Prata, 1989, 2009 и др.).

Мониторинг вулканов Камчатки постепенно развивался: если в 1997 г. спутниковые снимки NOAA (AVHRR) поступали из АВО в KVERT по факсимильной связи, то в 1999 г. АВО предоставила KVERT непосредственный доступ к информации с NOAA, а также возможность учёным пройти обучение работе со спутниковыми данными. С 1998 г. по 17 мая 2013 г. из АВО в KVERT два раза в сутки поступали бюллетени с результатами обработки различной спутниковой информации о состоянии камчатских и северокурильских вулканов (Gordeev, Girina, 2014). С 2002 г. учёные KVERT проводят обработку и анализ первичных снимков спутниковых систем MTSAT, NOAA (AVHRR), TERRA и AQUA (MODIS) и др. близко к реальному времени для выявления пепловых шлейфов и термальных аномалий на активных вулканах с помощью программного обеспечения ENVI и MeteoGamma. Кроме этого, в рамках спутникового мониторинга вулканов KVERT тесно сотрудничал в 2002–2016 гг. с Росгеолфондом, в 2007–2009 гг. — с Дальневосточным научно-исследовательским центром (ДЦ) «НИЦ «Планета», в 2010–2017 гг. — с Камчатским УГМС, что дало возможность бесперебойно иметь дополнительные источники спутниковых данных, и, соответственно, более детально следить за изменениями характера активности вулканов с течением времени. С развитием космических технологий появилась возможность не только осуществлять оперативный мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил с помощью спутниковых данных

низкого и среднего разрешения, но и исследовать вулканы и продукты их извержений с помощью данных высокого разрешения (Landsat, ASTER, ALOS PALSAR, Radarsat и др.) (рис. 3б) (Carter et al., 2008; Lundgren et al., 2003 и др.).

К началу XXI века сложились основные направления применения спутниковых данных для изучения вулканов Камчатки и Курил.

1. Ежедневный оперативный мониторинг действующих вулканов с помощью спутниковых данных низкого и среднего разрешения:
 - детектирование термальных аномалий в районах вулканов в инфракрасном канале 3,7 мкм, определение их параметров (размер, температура аномалии и фона) и природы (газовая, эффузивная, экструзивная и другая активность), прогноз извержений (Girina, 2012; Schneider et al., 2000);
 - обнаружение пепловых облаков и шлейфов по разности инфракрасных каналов 11–12 мкм, определение их параметров (высота, длина, азимут распространения, площадь) и отслеживание до полного рассеяния пеплов (Gordeev et al., 2016).
 - выпуск оперативных сообщений VONA (Volcano Observatory Notice for Aviation) на основе спутниковых данных о параметрах пепловых шлейфов и прогнозе дальнейшего развития извержения, опасного для населения и авиации, публикация их на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/>) и в информационной системе (ИС) «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (“Volcanoes of Kurile-Kamchatka Island Arc”, VOKKIA) геопортала ИВиС ДВО РАН (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/van/>); размещение данных оперативного спутникового мониторинга в базе данных ИС KVERT «Активность вулканов Камчатки и Северных Курил».
2. Ретроспективный анализ активности вулканов Камчатки и Северных Курил с помощью спутниковых данных среднего и высокого разрешения:
 - детальные исследования вулканогенных продуктов (тефра, лавовые и пирокластические потоки) после конкретного извержения вулкана и определение их параметров (структуры, протяжённости, площади и объёма отложений) для оценки геологического и экологического эффектов (например, Гирина и др., 2006, 2007; Carter et al., 2008);
 - анализ изменения содержания в атмосфере и аэрозолях (дым, пепел, пыль) различных газов: O_3 , NO_2 , BrO , ClO , SO_2 , $HCHO$ и др. (Carn et al., 2016; Realmuto, 2000; <http://sacs.aeronomie.be/>);
 - комплексный анализ динамики активности вулкана с течением времени для прогноза его будущей опасности населению (изменение размера и температуры термальных аномалий; частота эксплозивных событий вулкана; скорость приращения площади лавовых или пирокластических потоков; изменение количества энергии, поступающей на поверхность земли при извержениях вулканов с течением времени, косвенным показателем которой являются объёмы изверженных продуктов и т.д.) (Боровков, 2011; Girina, 2013; Schneider et al., 2000); и др.

Например, в 2013–2017 гг. на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/>) было опубликовано 896 оперативных сообщений и VONA об эксплозивных событиях, распространении пепловых облаков и шлейфов и изменении Авиационного цветового кода, характеризующего опасность вулкана для авиации.

В 2011 г. специалистами ИВиС ДВО РАН, Института космических исследований (ИКИ) РАН, Вычислительного центра (ВЦ) ДВО РАН и ДЦ «НИЦ «Планета» была создана и продолжает развиваться ИС «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru/>), в которой можно комплексно работать с различными спутниковыми данными, метео- и наземной (видео) информацией для непрерывного мониторинга и исследования вулканической активности Курило-Камчатского

региона (Gordeev et al., 2016). В 2016 г. ведение архивов спутниковых данных в VolSatView было переведено на новую унифицированную технологию UNISAT, позволяющую одновременно проводить однотипную работу с разнородными спутниковыми данными, получаемыми из большого числа различных источников (Кашницкий и др., 2016; Прошин и др., 2016). Кроме этого, в VolSatView реализовано предоставление доступа пользователям к «виртуальным» продуктам, которые динамически формируются на основе архивных исходных данных в режиме реального времени (Прошин и др., 2016).

В настоящее время в VolSatView организован доступ к данным со спутников среднего и низкого разрешения (NOAA 18, 19 (AVHRR), Terra и Aqua (MODIS), Suomi NPP (VIIRS), Meteor-M2, Himawari-8) и высокого разрешения (Landsat-7 (ETM+), Landsat-8 (OLI и TIRS), «Канопус-В» (МСС и ПСС), «Ресурс-1 и -2» (Геотон; КШМСА-ВР и КШМСА-СР), EO-1 (Hyperion), Sentinel 1A, 2A). С 2016 г. в VolSatView поступают бесценные для оперативного мониторинга активных вулканов Камчатки и Курил данные с геостационарного спутника последнего поколения Himawari-8 (прибор АНІ, Япония), обновление которых происходит каждые 10 минут. В ИС передаются также данные со станции УниСкан-36, установленной в 2015 г. в ИВиС ДВО РАН.

Непосредственно в специализированном картографическом интерфейсе ИС VolSatView коллегами из ИКИ РАН разработаны сложные инструменты, позволяющие обрабатывать большие объёмы спутниковой информации на базе мощностей центров предоставления данных (Кашницкий и др., 2015; Лупян и др., 2015). Например, инструменты для анализа полей температуры дают возможность мгновенно просматривать значения температуры (в градусах Цельсия или Кельвина) в каждой точке снимка, что значительно сокращает время анализа термальных аномалий в районах действующих вулканов. Следует отметить, что значения температуры термальных аномалий в районах вулканов, полученные при обработке снимков с различных спутниковых приборов, показывают хорошую сопоставимость и однородность информации. Это важно для оперативного и ретроспективного анализа изменения температуры и размеров термальных аномалий в районах вулканов, предсказания их будущей активности и снижения вулканоопасности для окрестных территорий (Gordeev et al., 2016). В 2016 г. были разработаны новые инструменты для исследования непрерывных временных рядов наблюдений на примере анализа данных со спутника Himawari-8. Созданный интерфейс даёт возможность изучать особенности и динамику термальных аномалий на действующих вулканах: а) в видимом и тепловом участках спектра; б) в различных по масштабу временных диапазонах — от нескольких часов до нескольких месяцев. Можно анализировать температуру в предустановленной точке постоянного наблюдения в районе термальной аномалии вулкана (рис. 4) или же в произвольной точке на карте в картографическом интерфейсе. Новые инструменты расширяют возможности детального исследования процессов, которые могут стать предвестниками эксплозивных извержений вулканов. Кроме этого, реализована возможность автоматического создания анимационной картины эруптивных событий по данным Himawari-8 (например, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/sample.gif>), что важно для анализа динамики эруптивного процесса и проверки результатов моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов.

В ИС VolSatView созданы инструменты, позволяющие выделять пепловые облака и шлейфы, определять их параметры (высота н.у.м., протяжённость, азимут распространения, площадь), анализировать их временные серии, размещать в базе данных автоматически рассчитанную площадь пеплового облака или шлейфа, визуализировать пепловые облака или шлейфы по отдельным или всем вулканам за определённый период времени (рис. 5). Анализ изменения параметров пепловых шлейфов с течением времени даёт возможность рассчитывать скорость их распространения и скорость приращения их площади с течением времени (Gordeev et al., 2016). Статистические данные о скорости перемещения пепловых облаков от вулканов и скорости приращения их площади позволяют вовремя предупреждать население о грозящих им пеплопадах, тем самым более верно оценивать вулканоопасность для различных территорий. В настоящее время продолжается разработка автоматизированного оконтуривания пепловых шлейфов — автоматическое выделение на спутниковом снимке пеплового облака или шлейфа по ряду параметров и оконтуривание его с помощью пороговой классификации или кластеризации.

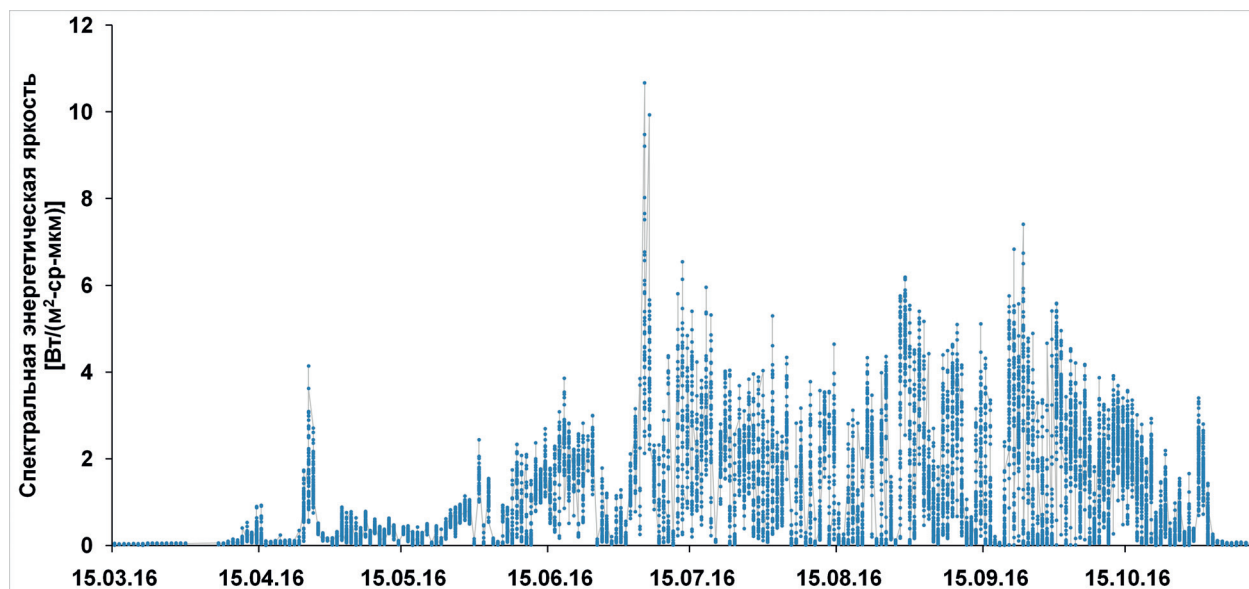


Рис. 4. Изменение спектральной энергетической яркости термальной аномалии в районе влк. Ключевской в течение эксплозивно-эффузивного извержения 2016 г. (Гирина и др., 2017г) по данным Himawari-8

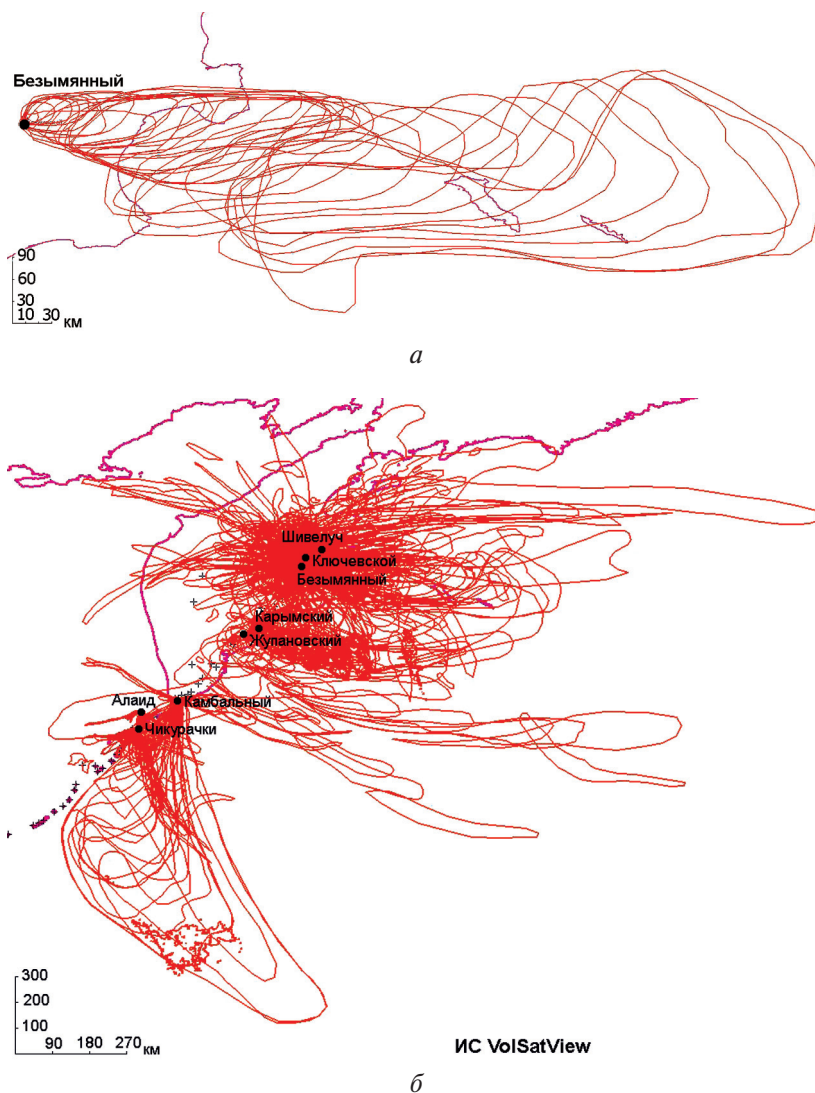


Рис. 5. Визуализация в ИС VolSatView распространения пепловых облаков: *а* — от влк. Безымянный при извержении 16 июня 2017 г. с 04:53 до 21:20 GMT по данным Himawari-8; *б* — от вулканов Камчатки и Северных Курил при извержениях в 2015–2017 гг.

Специальные инструменты, созданные в VolSatView, обеспечивают совместный анализ спутниковой, метеорологической и наземной информации с результатами численного моделирования процесса распространения пепловых облаков и шлейфов во время эксплозивных извержений вулканов, полученного на базе автоматизированной ИС «Сигнал» ВЦ ДВО РАН, а также визуализацию результатов моделирования конкретного эксплозивного события на спутниковых снимках, на которых наблюдаются пепловые облака этого события (рис. 6) (Сорокин и др., 2016; Gordeev et al., 2016). Комплексный анализ данных — спутниковых, метеорологических, результатов моделирования (в частности, степени совпадения «модельного облака пепла» с реальным, зафиксированным на спутниковом снимке) — позволит сделать модель распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов более совершенной и надёжной.

Наряду со спутниковыми данными среднего и низкого разрешения, в VolSatView для анализа и долгосрочного прогноза активности вулканов широко используется спутниковая информация высокого разрешения. С помощью специальных инструментов можно проводить совместный анализ информации, поступающей из разных спутниковых систем, например, синтез различных разновременных данных для выявления изменений, происходящих в районах вулканов. Так, обеспечена возможность анализа данных гиперспектрометра (ГС) Hyperion (EO-1, <http://EO1.usgs.gov>) в картографическом интерфейсе и анализа спектральных профилей вулканогенных объектов (лавовых и пирокластических отложений; изливающих лавовых потоков; пепловых туч и т.д.), сравнение разновременных данных ГС и анализ таких данных совместно с другой информацией, имеющейся в системе (Гордеев и др., 2014, 2015; Gordeev et al., 2016).

Подытожив вышесказанное, отметим, что ИС VolSatView, объединяя широкий спектр данных различных спутниковых систем, поступающих из разных источников, позволяет непосредственно в веб-интерфейсе совместно обрабатывать оперативную и ретроспективную спутниковую информацию с помощью созданных специальных инструментов, сопоставлять её с видеoinформацией, выполнять моделирование распространения пепловых шлейфов, классифицировать различные вулканогенные объекты, т.е. информационная система даёт возможность решать задачи разного уровня — от оперативного мониторинга активности вулканов до фундаментальных проблем вулканологии.

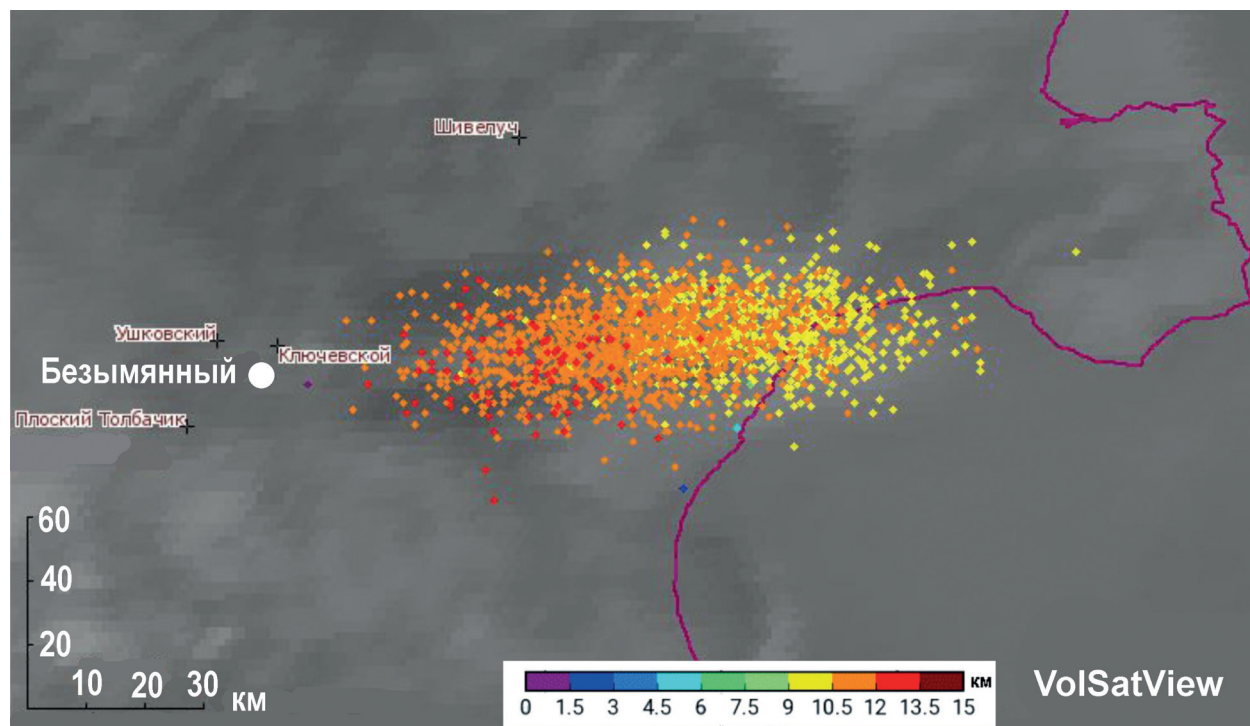


Рис. 6. Результаты моделирования распространения пеплового облака от влк. Безымянный при извержении 16 июня 2017 г., визуализированные в ИС VolSatView на спутниковом снимке Himawari-8 от 06:40 GMT

Многосторонний анализ имеющихся опубликованных сведений о вулканах, а также визуальных и спутниковых данных, полученных учёными KVERT в течение 24-летнего ежедневного мониторинга вулканической активности, позволил определить основные черты деятельности каждого из действующих вулканов и оценить степень их опасности для авиаполётов и населения полуострова. Характеристики максимальных взрывных событий наиболее активных вулканов Камчатки приведены в *табл. 1*. Например, выяснено, что на начальных этапах взрывные извержения влк. Ключевской, как правило, представляют опасность только для местных авиалиний, так как пепловые шлейфы преимущественно распространяются на высотах до 6–7 км н.у.м. на первые десятки километров от вулкана. Ближе к окончанию извержений наблюдается усиление взрывной деятельности вулкана с подъёмом пепла до 8–15 км н.у.м. и распространением пепловых шлейфов до 5000 км от вулкана. В такие периоды становится реальной опасностью для международных авиаперевозок (Girina, 2012). Непрерывный спутниковый мониторинг влк. Безымянный в течение более 15 лет позволил выявить предвестник его взрывного извержения, основанный на линейной зависимости количества поступающего на поверхность земли ювенильного вещества и размера и температуры термальной аномалии в момент её регистрации на спутниковом снимке (Girina, 2012; Schneider et al., 2000). Благодаря наблюдениям за динамикой изменения термальной аномалии в районе вулкана, в 2001–2017 гг. учёными KVERT было предсказано 12 взрывных извержений Безымянного (16.12.2001 г., 25.12.2002 г., 11.01.2005 г., 09.05.2006 г., 11.05.2007 г., 14–15.10.2007 г., 19.08.2008 г., 31.05.2010 г., 08.03.2012 г., 01.09.2012 г., 09.03.2017 г., 16.07.2017 г.) — предупреждения о сильных взрывных извержениях вулкана были опубликованы на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert>) за 2–24 ч до их начала (Гирина и др., 2017б; Girina, 2012; Gordeev, Girina, 2014).

Таблица 1. Наибольшая опасность для авиации и населения извержений вулканов Камчатки, определённая по визуальным и спутниковым данным

| Вулкан | Дата извержения | Высота выноса пепла, км н.у.м. | Протяжённость перемещения пеплового облака от вулкана, км | Литературный источник |
|------------------|-----------------|--------------------------------|---|------------------------------|
| Шивелуч | 12.11.1964 | 15–20 | >2000* | Горшков, Дубик, 1969 |
| Ключевской | 31.12.1945 | 15 | >5000* | Пийп, 1956 |
| Безымянный | 30.03.1956 | 35 | >9000 | Горшков, Богоявленская, 1965 |
| Толбачинский дол | июль 1975 | 5 | >1000 | Большое..., 1984 |
| Кизимен | 05.01.2011 | 10 | >800 | Гирина и др., 2012 |
| Карымский | 11.05.1963 | 10 | >350 | Иванов, 1970 |
| Жупановский | 12–14.07.2015 | 10 | >2500 | Gordeev et al., 2016 |
| Корякский | 09.04.2009 | 5,5 | >700 | Гирина и др., 2010 |
| Авачинский | 13.01.1991 | 7 | >240 | Дроздин, Муравьев, 1994 |
| Горелый | 31.07.1980 | 5 | ~100 | Кирсанов, Озеров, 1983 |
| Ксудач | 28.03.1907 | 15–20 | >2000* | Мелекесцев и др., 1995 |
| Камбальный | 2017 | 6–7 | >4000 | Гирина и др., 2017в |

* — Величины даны по аналогии с известными крупными взрывными извержениями камчатских вулканов.

Благодаря непрерывному спутниковому и визуальному мониторингу вулканов, учёными KVERT установлены даты начала и окончания всех извержений вулканов Камчатки и Северных Курил, произошедших в течение 1993–2017 гг. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcano>) (*табл. 2*), эти данные необходимы для статистических оценок динамики развития вулканов и прогноза их опасности в будущем.

С созданием и развитием ИС VolSatView вулканологи получили не имеющие аналогов в мире возможности спутниковых наблюдений за активными вулканами Камчатки и Курил. Характер активности вулканов постоянно меняется и актуальность решения проблемы «как

будет работать в будущем каждый действующий вулкан России» остаётся. Для выполнения этой задачи, а также для понимания происходящих глубинных (магматических) и вулканогенных процессов, определения потенциальной опасности для населения и авиаперевозок каждого вулкана, поиска предвестников их эксплозивных извержений и т.д., необходимо продолжать долговременные дистанционные наблюдения за вулканами региона; изучать изменения их активности с течением времени; сопоставлять работу вулканов, поставляющих на поверхность земли эруптивные продукты сходного и контрастного составов, и объёмы изверженного материала каждого и всех вулканов с течением времени.

Таблица 2. Извержения вулканов Камчатки и Северных Курил в 1993–2017 гг.
(81 сильное извержение за 24 года, по данным KVERT)

| Вулкан | Дата извержения |
|-------------|---|
| Шивелуч | 1993–2017; сильные события: 22.04.1993; 19.05.2001; 09.05.2004; 28.02.2005; 22.09.2005; 29.03.2007; 27.10.2010; 14.06.2017 |
| Ключевской | 15.03.1993–02.10.1994; 02–04.1995; 01–09.1997; 02–09.1998; 05–12.1999; 22.03.2003–03.03.2004; 10.01–03.04.2005; 15.02–26.07.2007; 16.10.2008–29.01.2009; 18.09.2009–01.10.2010; 01.09.2012–15.01.2013; 15.08–15.12.2013; 01.01–24.03.2015; 03.04–06.11.2016; 02.03–30.08.2017 |
| Безымянный | 1993–2017; сильные события: 20–23.10.1993; 05.10.1995; 09.05.1997; 05.12.1997; 24.02.1999; 13.03.2000; 01.11.2000; 06.08.2001; 16.12.2001; 25.12.2002; 26.07.2003; 13.01.2004; 18.06.2004; 11.01.2005; 30.11.2005; 09.05.2006; 24.12.2006; 11.05.2007; 14–15.10.2007; 05.11.2007; 19.08.2008; 16–17.12.2009; 31.05.2010; 13.04.2011; 08.03.2012; 01.09.2012; 09.04.2017; 16.06.2017 |
| Толбачик | 27.11.2012–15.2013 |
| Кизимен | 09.12.2010–09.12.2013 |
| Карымский | 1996–2017, сильные события: 02.01.1996; 13–14.05.2006; 12.08.2017 |
| Жупановский | 22–24.10.2013; 06.06.2014–24.03.2016; 20.11.2016; 16.09.2017 |
| Авачинский | 05.10.2001 |
| Корякский | 20.12.2008–26.08.2009 |
| Горелый | 07.2010–2014 |
| Мутновский | 17.03.2000; 29.06.2000; 17.04.2007; 03.07.2013 |
| Камбальный | 24.03–11.04.2017 |
| Алаид | 06.10–12.12.2012; 01.10.2015–10.08.2016 |
| Эбеко | 1998; 07.2005; 29.01–09.04.2009; 18.10.2016 — продолжается |
| Чикурачки | 25.01–01.05.2002; 17.04–16.06.2003; 10.03–07.04.2005; 04.03–07.04.2007; 19.08–20.10.2007; 29.07–15.08.2008; 15–19.02.2015; 28–31.03.2016; 18–30.08.2016 |

Дальнейшее развитие спутникового мониторинга вулканов планируется по следующим направлениям:

- совершенствование анализа непрерывных временных рядов спутниковых наблюдений за динамикой термальных аномалий на вулканах для автоматизированного: а) определения интенсивности и опасности извержения вулкана, напрямую связанного с расходом изверженного материала; б) установления триггера эксплозивного извержения каждого из активных вулканов;
- совершенствование анализа пепловых облаков для их автоматизированного детектирования на спутниковых снимках;
- разработка методов принятия оперативных решений о степени опасности эксплозивного извержения на основе анализа ретроспективных вулканологических и спутниковых данных.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность коллегам из ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДЦ НИЦ Планета за совместную работу над созданием и развитием ИС VolSatView.

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

Литература

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Боровков С. О. О пирокластических потоках вулкана Безымянный // Исследования в области наук о Земле: Материалы 9-й Региональной молодёжной научной конференции. 1–2 декабря 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2011. С. 87–94.
3. Гирина О. А. Спутниковые данные высокого разрешения для уточнения положения разломных зон в пределах Ключевской группы вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 148–156. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156.
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. С. 100–109.
5. Гирина О. А., Демянчук Ю. В., Мельников Д. В., Ушаков С. В., Овсянников А. А., Сокоренко А. В. Новая пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16–23.
6. Гирина О. А., Ушаков С. В., Демянчук Ю. В. Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2007. Вып. 10. № 2. С. 65–73.
7. Гирина О. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Нуждаев А. А., Ушаков С. В., Коновалова О. А. Активность вулкана Корякский с октября 2008 г. по октябрь 2009 г. по данным KVERT // Современный вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2010. С. 15–23.
8. Гирина О. А., Нуждаев А. А., Маневич А. Г., Ушаков С. В. Извержение вулкана Кизимен в 2010–2012 гг. по данным мониторинга группы KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы: Тезисы докладов Региональной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 10.
9. Гирина О. А., Лупян Е. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Кашицкий А. В., Бриль А. А., Сорокин А. А. (2017а) Извержения Северной группы вулканов Камчатки 14–18 июня 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 317–323. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-3-317-323.
10. Гирина О. А., Мельников Д. В., Демянчук Ю. В., Маневич А. Г. (2017б) Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы 10-й Региональной научной конф., посвящённой Дню вулканолога. 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2017. С. 14–17.
11. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Нуждаев А. А. (2017в) Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 263–267. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-2-263-267.
12. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Нуждаев А. А., Демянчук Ю. В. (2017г) Хронология событий извержения влк. Ключевской в 2016 г. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы 10-й Региональной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2017. С. 18–21.
13. Гордеев Е. И., Гирина О. А., Лупян 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 гео-портала VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 267–284.
14. Гордеев Е. И., Гирина О. А., Лупян Е. А., Кашицкий А. В., Уваров И. А., Ефремов В. Ю., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Сорокин А. А., Верхотуров А. Л., Романова И. М., Крамарева Л. С., Королев С. П. 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.
15. Горшков Г. С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 26. С. 19–72.
16. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
17. Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.

18. Дроздин В. А., Муравьев Я. Д. Энергетический и экологический аспекты извержения вулкана Ава-чинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1994. № 3. С. 3–19.
19. Иванов Б. В. Извержение Карымского вулкана в 1962–1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 135 с.
20. Иванов Б. В., Чирков А. М., Дубик Ю. М., Гаврилов В. А., Степанов В. В., Руленко О. П., Фирстов П. П. Состояние вулканов Камчатки и Курильских островов в 1980 г. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 99–104.
21. Кашицкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин 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.
22. Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Константинова А. М. Технология создания инструментов обработки и анализа данных сверхбольших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777. DOI:10.15372/AOO20160908.
23. Кирсанов И. Т., Озеров А. Ю. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25–42.
24. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычуглов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
25. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Пономарева В. В., Сулержицкий Л. Д. Катастрофические кальдеро-образующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 28–53.
26. Овсянников А. А., Маневич А. Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2010. Вып. 16. № 2. С. 7–9.
27. Пийп Б. И. Ключевская сопка и её извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Труды лаборатории вулканологии. 1956. Вып. 11. 312 с.
28. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Бурцев М. А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
29. Сорокин А. А., Королев С. П., Гирина О. А., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Романова И. М., Мальковский С. И. Интегрированная программная платформа для комплексного анализа распространения пепловых шлейфов при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 9–19. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-4-9-19.
30. Федотов С. А., Иванов Б. В., Авдейко Г. П., Флеров Г. Б., Андреев В. И., Двигало В. Н., Дубик Ю. М., Чирков А. М. Извержение вулкана Алаид в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 82–87.
31. Carn S. A., Clarisse L., Prata A. J. Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing // J. Volcanology and Geothermal Research. 2016. Vol. 311. P. 99–134. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.01.002.
32. 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.
33. Corradini I. S., Merucci L., Prata A. J. Retrieval of SO₂ from thermal infrared satellite measurements: correction procedures for the effects of volcanic ash // Atmospheric Measurement Techniques. 2009. No. 2. P. 177–191.
34. Girina O. A. On Precursor of Kamchatkan Volcanoes Eruptions Based on Data from Satellite Monitoring // J. Volcanology and Seismology. 2012. Vol. 6. No. 3. P. 142–149. DOI:10.1134/S0742046312030049
35. Girina O. A. Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 263. P. 22–41.
36. Gordeev E. I., Girina O. A. Volcanoes and their hazard to aviation // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Vol. 84. No. 1. 8 p. DOI:10.1134/S1019331614010079.
37. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Sorokin A. A., Kramareva L. S., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Burtsev M. A., Romanova I. M., Mel'nikov D. V., Manevich A. G., Korolev S. P., Verkhoturov A. L. The VolSatView information system for Monitoring the Volcanic Activity in Kamchatka and on the Kuril Islands // J. Volcanology and Seismology. 2016. Vol. 10. No. 6. P. 382–394. DOI:10.1134/S074204631606004X.

38. Lundgren P., Berardino P., Coltelli M., Fornaro G., Lanari R., Puglisi G., Sansosti E., Tesauro M. Coupled magma chamber inflation and sector collapse slip observed with synthetic aperture radar interferometry on Mt. Etna volcano // *J. Geophysical Research*. 2003. Vol. 108. Iss. B5. 15 p. DOI:10.1029/2001JB000657.
39. Miller T. P., Casadevall T. J. Volcanic ash hazards to aviation // *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, California. 2000. P. 915–930.
40. Neal Ch., Girina O., Senyukov S., Rybin A. V., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G. Russian eruption warning systems for aviation // *Natural Hazards*. 2009. Vol. 51. No. 2. P. 245–262.
41. Prata A. J. Observation of volcanic ash clouds using AVHRR–2 radiances // *Intern. J. Remote Sensing*. 1989. Vol. 10. No. 4–5. P. 751–761.
42. Prata A. J. Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic // *Nat Hazards*. 2009. Vol. 51. No. 2. P. 303–324. DOI:10.1007/s11069-008-9273-z.
43. Realmuto V. J. The potential use of Earthobserving system data to monitor the passive emission of sulfur dioxide from volcanoes // *Remote Sensing of Active Volcanism*. Geophysical Monograph. 2000. P. 101–115.
44. 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. P. 65–85.

Satellite monitoring of Kamchatkan and Northern Kuriles volcanoes

O. A. Girina, D. V. Melnikov, A. G. Manevich

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: girina@kscnet.ru*

There are 36 active volcanoes in Kamchatka and Northern Kuriles, from 3 to 8 volcano eruptions occur here every year. Daily satellite monitoring of volcanoes has been performed by the Kamchatka Volcanic Eruption Response Team (KVERT) since 1997 in cooperation with colleagues from the Alaska Volcano Observatory (USA). Since 2002, KVERT scientists have processing and analyzing primary images of satellite systems NOAA (AVHRR), TERRA and AQUA (MODIS), etc. in close-to-real time to detect ash plumes and thermal anomalies on active volcanoes. The multiparameter analysis of the available published information about volcanoes, as well as visual and satellite data obtained by KVERT scientists during 24 years of daily monitoring of volcanic activity, made it possible to identify the main features of the activity at each of the active volcanoes and assess their degree of danger for air transportation and population of the peninsula. With the creation in 2011 of the information system “Remote monitoring activity of volcanoes of Kamchatka and the Kuriles (VolSatView)”, volcanologists opportunity have the opportunities that have no analogues in the world to conduct satellite observations of active volcanoes. VolSatView combines a wide range of data from various satellite systems coming from different sources and allows us to process operational and retrospective satellite information directly in the web-interface by means of specially created tools, to compare it with video information, to simulate ash plumes propagation, to classify various volcanogenic objects and etc. VolSatView enables to solve problems at different levels — from on-line monitoring of volcanoes activity to the fundamental problems in volcanology. The character of volcanic activity changes and the actuality of solving the problem of “how the volcano works” remain. To accomplish this task and for searching precursors of explosive volcanic eruptions, it is necessary to continue long-term remote observations of the volcanoes in the region; to study changes in their activity with time; to compare behavior of volcanoes supplying the eruptive products of similar and contrast compositions to the earth surface.

Keywords: volcano, explosive eruption, Kamchatka, Northern Kuriles, satellite monitoring, information system, VolSatView

Accepted: 24.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209

References

1. *Bol'shoye treshchinnoye Tolbachinskoye izverzhenie* (Large Tolbachik fissure eruption) (1975–1976, Kamchatka), Moscow: Nauka, 1984, 637 p.
2. Borovkov S.O., O piroklasticheskikh potokakh vulkana Bezymyanniy (About pyroclastic flows of Bezymyanniy volcano), *Issledovaniya v oblasti nauk o Zemle: Materialy 9 Regional'noi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. of 9th Regional Youth Science Conference), Petropavlovsk–Kamchatskii, 1–2 December 2011, Petropavlovsk–Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2011, pp. 87–94.
3. Girina O.A., Sputnikovye dannye vysokogo razresheniya dlya utochneniya polozheniya razlomnykh zon v predelakh Klyuchevskoi gruppy vulkanov Kamchatki (Satellite high-resolution data used to clarify the position of fault zones within the Klyuchevskaya volcanic group of Kamchatka), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 148–156. DOI:10.21046/2070–7401–2016–13–6–148–156.
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, No. 2, pp. 100–109.
5. Girina O.A., Demyanchuk Yu.V., Mel'nikov D.V., Ushakov S.V., Ovsyannikov A.A., Sokorenko A.V., Novaya paroksizmal'naya faza izverzheniya vulkana Molodoi Shiveluch, Kamchatka, 27 fevralya 2005 g. (predvaritel'noe soobshchenie) (The paroxysmal phase of the February 27, 2005 eruption on Young Shiveluch volcano, Kamchatka. A preliminary report), *Vulkanologiya i seismologiya*, 2006, No. 1, pp. 16–23.
6. Girina O.A., Loupian E.A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Kashnitskiy A.V., Bril A.A., Sorokin A.A., Izverzheniya Severnoi gruppy vulkanov Kamchatki 14–18 iyunya 2017 g. (Eruptions of Kamchatka Northern volcanic group on 14–18 June, 2017), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 317–323.
7. Girina O.A., Manevich A.G., Mel'nikov D.V., Nuzhdaev A.A., Ushakov S.V., Konovalova O.A. Aktivnost' vulkana Koryakskii s oktyabrya 2008 g. po oktyabr' 2009 g. po dannym KVERT (Activity of Koryaksky volcano from October 2008 to October 2009 according to KVERT—data), *Sovremennyyi vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy: Materialy konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* (Proc. of Conference in Day of Volcanologist), Petropavlovsk–Kamchatskii, 29–30 March 2010, Petropavlovsk–Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2010, pp. 15–23.
8. Girina O.A., Mel'nikov D.V., Demyanchuk Yu.V., Manevich A.G., Izverzhenie vulkana Bezymyanniy v 2016–2017 gg. po dannym KVERT (2016–2017 Bezymyanniy volcano eruption according to data by KVERT), *Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy. Materialy 10th regional'noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* (Proc. of XX Regional Science Conference in Day of Volcanologist), Petropavlovsk–Kamchatskii, 30–31 March 2017, Petropavlovsk–Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2017, pp. 14–17.
9. Girina O.A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Izverzhenie vulkana Kambal'nyi v 2017 g. (2017 eruption of Kambalny volcano), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 263–267. DOI:10.21046/2070–7401–2017–14–2–263–267
10. Girina O.A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Demyanchuk Yu.V., Khronologiya sobytii izverzheniya vлк. Klyuchevskoi v 2016 g. po dannym KVERT (Timeline of eruptive events of Klyuchevskoy volcano in 2016 according to data by KVERT), *Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy. Materialy 10 regional'noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* (Proc. of XX Regional Science Conference in Day of Volcanologist), 30–31 March 2017, Petropavlovsk–Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2017, pp. 18–21.
11. Girina O.A., Nuzhdaev A.A., Manevich A.G., Ushakov S.V., Izverzhenie vulkana Kizimen v 2010–2012 gg. po dannym monitoringa gruppy KVERT (2010–2012 Kizimen volcano eruption according to KVERT monitoring data), *Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy. Tezisy dokladov regional'noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa: Abstracts of Regional Science Conference in Day of Volcanologist*, Petropavlovsk–Kamchatskii, 29–30 March 2012, Petropavlovsk–Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2012, p. 10.
12. Girina O.A., Ushakov S.V., Demyanchuk Yu.V., Paroksizmal'noye izverzhenie vulkana Molodoi Shiveluch, Kamchatka, 9 maya 2004 g. (The paroxysmal eruption of Young Shiveluch volcano, Kamchatka, 9 May, 2004), *Vestnik KRAUNTs. Seriya: Nauki o Zemle*, 2007, Vol. 10, No. 2, pp. 65–73.
13. 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 sputnikovykh 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), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 267–284.
14. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Efremov V. Yu., Mel'nikov D. V., Manevich A. G., Sorokin A. A., Verkhuturov A. L., Romanova I. M., Kramareva L. S., Korolev S. P., Izuchenie produktov izverzhenii vulkanov Kamchatki s pomoshch'yu giperspektral'nykh sputnikovyykh dannykh v informatsionnoi sisteme VolSatView (Studies of Kamchatka volcanic eruptions products using hyperspectral satellite data in VolSatView information system), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 113–128.
15. Gorshkov G. S., Izverzhenie sopki Bezymyannoi (predvaritel'noe soobshchenie) (Eruption of Bezymianny hills (preliminary report)), *Byulleten' vulkanologicheskikh Stantsii*, 1957, No. 26, pp. 19–72.
16. Gorshkov G. S., Bogoyavlenskaya G. E., *Vulkan Bezymyannyi i osobennosti ego poslednego izverzheniya 1955–1963 gg.* (Bezymianny volcano and the features of its last eruption of 1955–1963), Moscow: Nauka, 1965, 172 p.
17. Gorshkov G. S., Dubik Yu. M., Napravlennyi vzryv na vulkane Shiveluch (Directed blast on Sheveluch volcano), *Vulkany i izverzheniya*, Moscow: Nauka, 1969, pp. 3–37.
18. Droznin V. A., Murav'ev Ya. D., Energeticheskii i ekologicheskii aspekty izverzheniya vulkana Avachinskii na Kamchatke (Energy and ecological aspects of Avachinsky volcano eruption in Kamchatka), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1994, No. 3, pp. 3–19.
19. Ivanov B. V., *Izverzhenie Karymskogo vulkana v 1962–1965 gg. i vulkany Karymskoi gruppy* (1962–1965 Karymsky volcano eruption, and volcanoes of the Karymskaya group), Moscow: Nauka, 1970, 135 p.
20. Ivanov B. V., Chirkov A. M., Dubik Yu. M., Gavrilov V. A., Stepanov V. V., Rulenko O. P., Firstov P. P., Sostoyanie vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov v 1980 g. (State of Kamchatka and on the Kuril Islands in 1980), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1981, No. 3, pp. 99–104.
21. Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Sozdanie instrumentov dlya udalennoi obrabotki sputnikovyykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
22. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M., Tekhnologiya sozdaniya instrumentov obrabotki i analiza dannykh sverkhbol'shikh raspredelennykh sputnikovyykh arkhivov (Technology for producing tools for processing and analysis of data from very large ever-expanding archives), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 9, pp. 772–777. DOI:10.15372/AOO20160908.
23. Kirsanov I. T., Ozerov A. Yu., Sostav produktov i energeticheskii effekt izverzheniya vulkana Gorelyi v 1980–1981 gg. (The products composition and the energy effect of the 1980–1981 Gorely volcano eruption), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1983, No. 1, pp. 25–42.
24. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
25. Melekestsev I. V., Braitseva O. A., Ponomareva V. V., Sulerzhitskii L. D., Katastroficheskie kal'deroobrazuyushchie izverzheniya vulkana Ksudach v golotsene (Catastrophic caldera-forming eruptions of Ksudach volcano in the Holocene), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1995, No. 4–5, pp. 28–53.
26. Ovsyannikov A. A., Manevich A. G., Izverzhenie vulkana Shiveluch v oktyabre 2010 g. (Sheveluch volcano eruption in October 2010), *Vestnik KRAUNTs. Seriya: Nauki o Zemle*, 2010, Vol. 16, No. 2, pp. 7–9.
27. Piip B. I., *Klyuchevskaya sopka i ee izverzheniya v 1944–1945 gg. i v proshlom* (Klyuchevskaya sopka and its eruptions in 1944–1945, and last), Moscow: AN SSSR, 1956, 312 p.
28. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Sozdanie unifikirovannoi sistemy vedeniya arkhivov sputnikovyykh dannykh, prednaznachennoi dlya postroeniya sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
29. Sorokin A. A., Korolev S. P., Girina O. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Romanova I. M., Mal'kovskii S. I., Integrirovannaya programmaya platforma dlya kompleksnogo analiza rasprostraneniya peplovykh shleifov pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki (The integrated software platform for a comprehensive analysis of ash plume propagation from explosive eruptions of Kamchatka volcanoes), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 9–19. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-4-9-19.

30. Fedotov S.A., Ivanov B.V., Avdeiko G.P., Flerov G.B., Andreev V.I., Dvigalo V.N., Dubik Yu.M., Chirkov A.M., Izverzhenie vulkana Alaid v 1981 g. (1981 Alaid volcano eruption), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1981, No. 5, pp. 82–87.
31. Carn, S.A., Clarisse L., Prata A.J., Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2016, Vol. 311, pp. 99–134. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.01.002.
32. 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.
33. Corradini L., Merucci L., Prata A.J., Retrieval of SO₂ from thermal infrared satellite measurements: correction procedures for the effects of volcanic ash, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, No. 2, pp. 177–191.
34. Girina O.A., On precursor of Kamchatkan volcanoes eruptions based on data from satellite monitoring, *J. Volcanology and Seismology*, 2012, Vol. 6, No. 3, pp. 142–149. DOI:10.1134/S0742046312030049
35. Girina O.A., Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2013, Vol. 263, pp. 22–41.
36. Gordeev E.I., Girina O.A., Volcanoes and their hazard to aviation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, Vol. 84, No. 1, 8 p. DOI:10.1134/S1019331614010079.
37. Gordeev E.I., Girina O.A., Loupian E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Uvarov I.A., Burtsev M.A., Romanova I.M., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Korolev S.P., Verkhoturov A.L., The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands, *J. Volcanology and Seismology*, 2016, Vol. 10, No. 6, pp. 382–394. DOI:10.1134/S074204631606004X.
38. Lundgren P., Berardino P., Coltelli M., Fornaro G., Lanari R., Puglisi G., Sansosti E., Tesauero M., Coupled magma chamber inflation and sector collapse slip observed with synthetic aperture radar interferometry on Mt. Etna volcano, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, Issue B5, 15 p. DOI:10.1029/2001JB000657.
39. Miller T.P., Casadevall T.J., Volcanic ash hazards to aviation, *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, San Diego, California, 2000, pp. 915–930.
40. Neal Ch., Girina O., Senyukov S., Rybin A.V., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G., Russian eruption warning systems for aviation, *Natural Hazards*, 2009, Vol. 51, No. 2, pp. 245–262.
41. Prata A.J., Observation of volcanic ash clouds using AVHRR–2 radiances, *International J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10, No. 4–5, pp. 751–761.
42. Prata A.J., Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic, *Nat Hazards*, 2009, Vol. 51, No. 2, pp. 303–324. DOI:10.1007/s11069-008-9273-z.
43. Realmuto V.J., The potential use of Earthobserving system data to monitor the passive emission of sulfur dioxide from volcanoes, *Remote Sensing of Active Volcanism*, Geophysical Monograph, 2000, pp. 101–115.
44. 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, pp. 65–85.