

Спутниковые наблюдения и результаты численного моделирования для комплексного анализа распространения пепловых облаков во время эксплозивных извержений вулканов Камчатки

А. А. Сорокин*, О. А. Гирина**, Е. А. Лупян***,
С. И. Мальковский*, И. В. Балашов***, В. Ю. Ефремов***,
Л. С. Крамарева****, С. П. Королев*, И. М. Романова**,
Е. В. Симоненко****

Пепловые облака, возникающие в результате эксплозивных извержений вулканов, представляют реальную угрозу для жизнедеятельности человека (для полетов воздушных судов, работы аэродромов и т. д.), поэтому обнаружение, отслеживание и прогноз их перемещения актуальны и важны. Описаны возможности и примеры применения нового инструмента, созданного на базе информационной системы “Мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” (VolSatView). Он позволяет решать задачи комплексного мониторинга и прогноза распространения пепловых облаков с помощью данных дистанционного зондирования и результатов математического моделирования, а также оценить параметры эксплозивных событий.

Ключевые слова: вулкан, эксплозивное извержение, пепловое облако, данные дистанционного зондирования, численное моделирование, модель PUFF, информационная система, VolSatView.

1. Введение

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса (катастрофические извержения с выбросом более 1 км^3 материала, подъем пепловых масс до 35 км над уровнем моря, пирокластические потоки со скоростью 150 км/ч на расстояние до 30 км от вулкана). В зависимости от мощности эксплозивного извержения (его интенсивности и продолжительности, объема изверженного материала, высоты, на которую он поднят, и т. д.) и скорости

* Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: alsor@febras.net.

** Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: girina@kscnet.ru.

*** Институт космических исследований Российской академии наук; e-mail: evgeny@iki.rssi.ru.

**** Дальневосточный центр ФГБУ “Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”; e-mail: kramareva@dvrcpod.ru.

ветра в атмосфере на разной высоте формируются пепловые облака, которые могут перемещаться на тысячи километров от вулкана в течение многих дней. Перемещение эруптивного облака зависит от его первоначальной высоты, концентрации в нем пепловых частиц и осадения их под действием силы тяжести, скорости ветра в тропосфере и стратосфере, стабильности состояния атмосферы, атмосферных осадков и других метеорологических условий.

Пепловые облака представляют реальную угрозу для находящихся в полете воздушных судов и существенные трудности для работы аэродромов [1, 5, 12, 18, 19], поэтому их обнаружение, отслеживание и прогноз перемещения актуальны и важны. Для объединения усилий различных служб по обнаружению вулканического пепла и мониторинга его распространения в атмосфере Международная организация гражданской авиации (International Civil Aviation Organization — ICAO, <http://www.icao.int>) назначила девять специализированных метеорологических центров в качестве консультационных центров по вулканическому пеплу (Volcanic Ash Advisory Centers).

Для повышения безопасности авиаполетов при эксплозивных извержениях вулканов на Камчатке в 1993 г. была создана Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). С 2010 г. группа KVERT как часть Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН выполняет функции Вулканологической обсерватории Российской Федерации, обеспечивающей международное аэронавигационное сообщество информацией об активности вулканов на Дальнем Востоке [1, 5, 18, 19]. Целью KVERT является снижение риска столкновения самолетов с пепловыми облаками в северной части Тихоокеанского региона на основе своевременного обнаружения повышения активности вулканов, распознавания и отслеживания облаков вулканического пепла, а также оперативного оповещения администраций авиакомпаний о появлении опасности для воздушных судов.

На Камчатке расположено 30 действующих вулканов. Ежегодно от двух до восьми из них извергаются, поставляя в атмосферу тонны вулканогенных продуктов (пепла, газа и аэрозолей). Во время сильных эксплозивных событий пепел поднимается до высоты 8—15 км над уровнем моря, представляя опасность для авиации [1, 5, 19]. Следует отметить, что в связи с удаленностью большинства вулканов от населенных пунктов и слабой сетью наземных наблюдений постоянный мониторинг активности вулканов невозможен без использования дистанционных, в первую очередь спутниковых, систем наблюдений.

В последние годы быстрое развитие специализированных математических моделей открывает новые возможности для анализа и изучения процессов распространения пепловых облаков, оценки их характеристик и возникающих опасностей. Комплексное использование результатов численного моделирования совместно с информацией постоянного дистанционного мониторинга позволит оценить базовые параметры эксплозивных событий (время начала и продолжительность выброса пепла, его высоту и т. д.). Это можно осуществить путем выбора оптимальных исходных дан-

ных для моделирования конкретных событий на основе минимизации расхождения результатов предварительного моделирования и фактических дистанционных наблюдений.

В настоящей работе описаны возможный подход для решения подобных задач, инструменты и возможности проведения совместного анализа спутниковых наблюдений и результатов моделирования перемещения пепловых облаков на основе информационной системы (ИС) “Мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” (VolSatView, <http://volcano.es.smislabs.ru>) [2—4] и автоматизированной ИС (АИС) “Сигнал” [16, 23].

2. Особенности моделирования распространения пепловых облаков во время эксплозивных извержений

В настоящее время для прогнозирования распространения пепловых облаков существует множество моделей разной сложности — от простых двухмерных моделей траектории до трехмерных моделей перемещения и рассеивания пепловых облаков. Такие модели основаны на лагранжевой или эйлеровой постановке задачи о распространении примеси в атмосфере и использовании метеорологических данных прогностических моделей Национальной океанической и атмосферной администрации Национальных центров предсказания изменений окружающей среды Глобальной системы предсказаний (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) forecast models). Например, в модели NOAA HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [15, 25] рассчитываются направление и скорость ветра на разной высоте над уровнем моря (http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php), но нет информации о количестве пепла, вынесенного из вулкана.

Примером универсальной модели рассеяния осадков в атмосфере является модель NAME (Numerical Atmospheric dispersion Modeling Environment). Данная модель может прогнозировать перенос, трансформацию и выпадение различных аэрозольных продуктов, в том числе вулканического пепла, а также трехмерное поле концентрации пепла в облаке и выпадение аэрозольных частиц на расстоянии от одного до многих тысяч километров от вулкана. В ней используются детальные трехмерные метеорологические данные по северо-западной части Европы [12].

Комплексная прогностическая модель ASH3D при заданных условиях (начало извержения, высота пепловой колонны, продолжительность извержения, объем изверженного материала) включает простое моделирование выпадения пепла из эруптивного пеплового облака, а также трехмерное моделирование изменения его высоты и нагруженности пепловыми частицами [17].

Еще одна прогностическая модель — PUFF — была предложена в работе [26] и реализована в виде набора компьютерных программ Puff-UAF в Геофизическом институте Университета Аляски в г. Фербанк [20—22]. Она имеет некоторое сходство с ASH3D (по набору исходных параметров, применяемых при моделировании метеорологических полей, — GFS NCEP/NOAA), однако более привлекательна для работы благодаря детальному описанию компьютерной реализации модели и апробированности ее при изучении пепловых облаков вулканов Аляски и Камчатки.

Модель PUFF основана на решении упрощенного уравнения переноса частиц в условиях горизонтально-однородного поля ветра и пространственно-однородного поля турбулентности. Опыт ее применения в течение более 10 лет для исследования эксплозивных извержений вулканов в разных районах мира показал достаточно хорошую корреляцию прогнозируемых траекторий перемещения пепловых облаков с реальными, наблюдаемыми со спутников [14, 21, 24]. В связи с этим именно модель PUFF была выбрана для проведения численных расчетов и дальнейшего сравнительного анализа полученных результатов с данными спутниковых наблюдений за вулканами Камчатки.

3. Методы и инструменты

Для решения задач комплексного анализа разнородной информации, получаемой на основе результатов моделирования, спутниковых и наземных наблюдений, необходимы специальные инструменты, обеспечивающие представление спутниковой и метеорологической информации, управление процессом моделирования, одновременный анализ и сравнение различных данных. В качестве технологической основы для создания таких инструментов была использована информационная система VolSatView [2—4], в составе которой реализована возможность интеграции информации, получаемой от разных ИС, а также создания специализированных пользовательских интерфейсов. Источниками данных для ИС VolSatView выступают объединенная система работы со спутниковыми данными НИЦ “Планета” [8], АИС “Сигнал” [16, 23], Центр коллективного пользования ИКИ-Мониторинг [9] и ИС “Вулканы Курило-Камчатской островной дуги” (VOKKIA) Геопортала ИВиС ДВО РАН [10, 11]. Для организации межсистемного взаимодействия в составе АИС “Сигнал” разработан сервис REST (Representational State Transfer), обеспечивающий взаимный доступ к исходным данным и результатам их обработки по широкому перечню направлений, связанных с исследованиями вулканов Камчатки [13]. Численное моделирование производится с применением модифицированного пакета Puff-UAF в АИС “Сигнал”. Указанные работы позволили объединить ресурсы наиболее авторитетных отечественных тематических информационных систем в исследуемой области.

Система моделирования процессов распространения пепловых облаков реализована в составе АИС “Сигнал” и имеет два режима работы — автоматический и интерактивный. Основой для автоматического моделирования являются данные оперативного мониторинга вулканов, проводимого группой KVERT. При обнаружении пеплового облака в районе вулкана выпускается сообщение VONA (Volcano Observatory Notice for Aviation) с информацией (дата и время извержения, его длительность, высота выброса пепла, длина пеплового облака и направление его перемещения и т. д.), полученной на основании анализа данных видео-визуального и спутникового мониторинга. Эта информация размещается в базе данных KVERT “Активность вулканов Камчатки и Северных Курил” в ИС VOKKIA и становится доступной в АИС “Сигнал”. Применяемая схема обмена данными между указанными системами позволяет АИС “Сигнал” в реальном времени получать сообщение VONA и на основе поступившей информации в

автоматическом режиме осуществлять расчет траектории распространения пеплового облака.

Дату и время извержения также используют для формирования соответствующего набора метеорологических данных, представляющих собой поля зональной и меридиональной составляющих скорости ветра (компоненты u и v) на совокупности изобарических поверхностей, покрывающих область моделирования. Источником этих данных служит прогностическая продукция модели GFS (NCEP/NOAA, США), распространяемая в виде файлов формата GRIB второй версии. При создании набора в первую очередь используют данные прогнозов с заблаговременностью 0 и 3 ч, а при их отсутствии — с большей заблаговременностью. Информация из сформированного набора заносится в результирующий файл формата NetCDF с четырехмерной структурой (время, уровень, широта, долгота), который в дальнейшем используется в качестве исходных метеорологических данных для моделирования.

Результаты вычислений в виде описания координат и высоты модельных частиц пеплового облака записываются в файлы (в том же формате NetCDF), каждый из которых соответствует состоянию облака на некоторый момент времени. Число этих файлов определяется отношением периода моделирования к шагу сохранения результатов и задается до начала расчетов в качестве входного параметра. Далее файлы с численными результатами представляются в требуемом графическом формате (GIF, KML, Shape и т. п.) и пополняют справочник результатов в АИС “Сигнал”.

Для обеспечения прозрачной работы с результатами моделирования в ИС VolSatView в составе АИС “Сигнал” разработан специализированный сервис REST. С его помощью в VolSatView загружается список всех произведенных расчетов с параметрами и перечнем результатов. Это дает возможность получать и визуализировать данные моделирования конкретного взрывного события и проводить в дальнейшем сравнительный анализ с данными спутниковых и метеорологических наблюдений, представляемыми ИС VolSatView.

Проведение расчетов в автоматическом режиме подразумевает наличие в системе ряда предустановленных параметров для модели PUFF (например, времени и шага моделирования, форматов результирующих файлов и т. д.). По умолчанию они выставлены по значениям, рекомендованным в документации к пакету Puff-UAF [20].

Интерактивный режим работы системы связан с использованием соответствующих интерфейсов в ИС VolSatView, через которые с применением описанных выше средств и технологий исследователь может инициировать выполнение отдельных вычислительных задач. Например, для моделирования переноса пепла с детальным заданием всех условий можно использовать специализированный интерфейс в составе АИС “Сигнал”. Результаты моделирования заносятся в базу данных, также они доступны для работы в ИС VolSatView.

В картографическом интерфейсе ИС VolSatView созданы специальные разделы, предназначенные для удаленной работы с системой моделирования. Они позволяют сформировать задание на проведение моделирования конкретного события на интересующем вулкане, передать это задание в АИС “Сигнал”, проследить статус его выполнения и, по завершении, по-

лучить доступ к результатам моделирования. При этом можно проводить моделирование с различными параметрами, впоследствии выбирая варианты, максимально совпадающие с данными спутниковых наблюдений.

Результаты моделирования представляются в картографическом интерфейсе системы в виде набора точек, цвет которых соответствует высоте нахождения пепловых частиц в заданный момент времени. В интерфейсе есть возможность просмотра результатов (географическое положение частиц и их высота) по каждому шагу моделирования и на интересующей высоте.

Результаты расчетов могут визуализироваться в системе совместно с разными информационными продуктами, получаемыми на основе спутниковых данных. Подробно о возможностях ИС VolSatView можно узнать в работах [2—4, 6—9]. Некоторые примеры совместной визуализации результатов моделирования и спутниковых данных приведены в следующем разделе.

4. Примеры использования разработанных методов и инструментов

Качество моделирования процесса распространения пепловых облаков, возникающих при взрывных извержениях вулканов, можно оценить по данным рис. 1. Видно, что результаты моделирования (при правильно установленных исходных параметрах, описывающих взрывное событие) достаточно хорошо совпадают с общей картиной распространения пеплового облака, наблюдаемой по спутниковым данным, не только в определенный момент, но и в промежутке времени, сопоставимом со временем существования облака (более 5 ч). То есть используемая модель применима для кратко- и среднесрочных прогнозов распространения пепловых облаков.

Следует сказать, что поскольку ИС VolSatView работает с данными большого числа спутников, она позволяет детально производить анализ динамики распространения пепловых облаков. Например, на рис. 1 результаты моделирования сопоставлены с данными наблюдений четырех разных спутников. Отметим, что такая возможность в перспективе может позволить разработать методы и средства автоматизированной корректировки параметров моделирования для оценки точности получаемых прогнозов и характеристик наблюдаемых взрывных извержений.

Так, для многих труднодоступных вулканов Камчатки и Курил иногда невозможно определить даже базовые параметры извержений, такие как время начала взрывного события, высота пеплового выброса, продолжительность извержения и т. д. С помощью сравнения результатов моделирования распространения пеплового облака и спутниковых данных можно попытаться провести уточнение или частичное восстановление этих параметров.

Рассмотрим взрывное событие на вулкане Жупановский 12 февраля 2016 г. Сравнивая результаты моделирования для разного времени начала извержения с состоянием пеплового облака на спутниковых снимках, можно подобрать это время (около 20 ч ВСВ 12 февраля 2016 г.) по оптимальному совпадению результатов моделирования и спутниковых наблюдений (рис. 2), причем не только основной области, в которой расположено пеп-

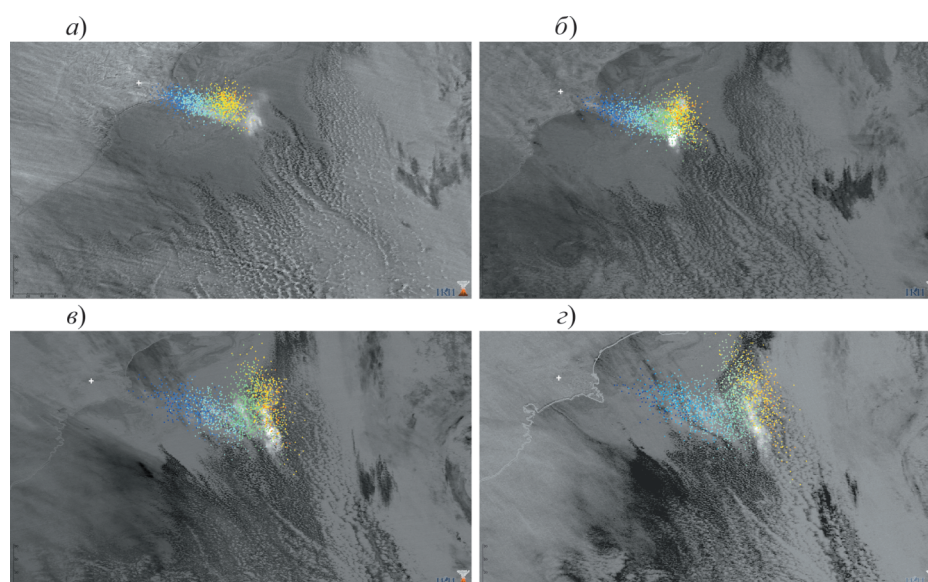


Рис. 1. Динамика распространения пеплового облака, наблюдавшегося после эксплозивного события на вулкане Жупановский 12 февраля 2016 г., по спутниковым данным и результатам математического моделирования.

Здесь и на рис. 2 белой звездочкой указано положение вулкана Жупановский, черно-белое изображение — разность каналов 11—12 мкм по данным спутниковых приборов, белым цветом выражено пепловое облако; точки — результаты его моделирования, цвет частиц пепла соответствует высоте, на которой они находятся (меняется от синего (1,5 км) к желтому (10 км)). а) 23 ч 40 мин 12 февраля 2016 г., прибор МСУ-МР, спутник “Метеор-М” № 2; б) 23 ч 55 мин 12 февраля, прибор MODIS, спутник “Terra”; в) 1 ч 45 мин 13 февраля, прибор VIIRS, спутник “Suomi NPP”; з) 2 ч 27 мин 13 февраля, прибор AVHRR, спутник “NOAA-19” (здесь и далее указано Всемирное согласованное время). Результаты моделирования пеплового облака приведены для соответствующих моментов времени: а) 23 ч 40 мин 12 февраля; б) 24 ч 12 февраля; в) 2 ч 13 февраля; з) 3 ч 13 февраля.

ловое облако в момент сравнения (24 ч 12 февраля 2016 г.), но и его формы и тенденции распространения. При моделировании с более ранним временем начала события облако смещено на юг, а с более поздним — на север по сравнению со спутниковыми данными (рис. 2).

Отметим, что поскольку в ИС VolSatView имеются не одномоментные наблюдения, то в перспективе можно будет построить схему, позволяющую одновременно уточнять несколько исходных параметров, необходимых для проведения корректного моделирования пепловых облаков.

Подход с восстановлением или уточнением параметров эксплозивных событий на основе совместного анализа данных дистанционного зондирования и методов математического моделирования широко используется и позволяет получить дополнительную информацию об извержениях [14, 24]. В то же время каждое такое исследование требует большой подготовительной работы и наличия соответствующей инфраструктуры для сбора, хранения, специализированной обработки и анализа разнородных данных. Представленный в статье инструмент дает возможность практически полностью автоматизировать все этапы подобной работы. Это позволяет применять его не только для ретроспективного исследования произошедших в последние годы извержений, но и для оперативного мониторинга вулканической активности.

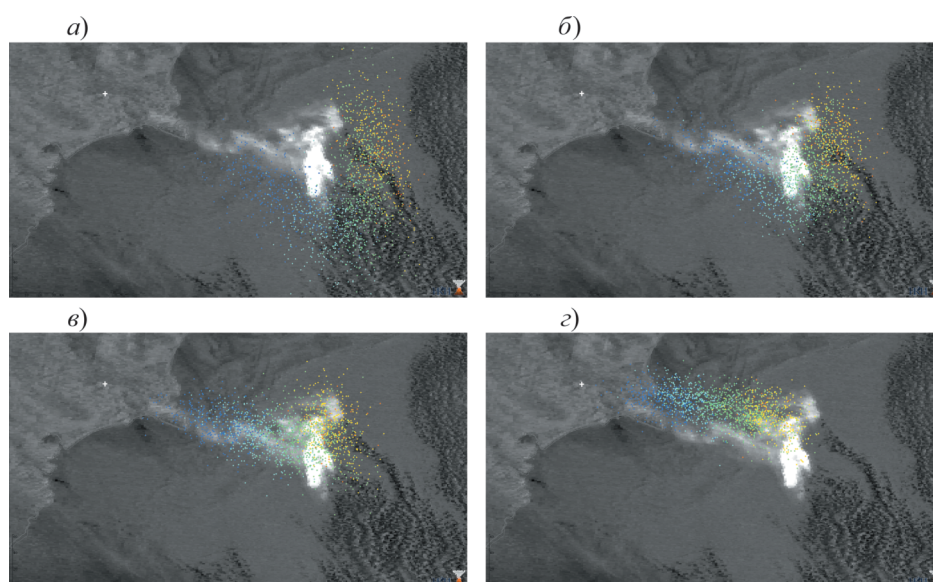


Рис. 2. Пример возможности варьирования времени эксплозивного события на вулкане Жупановский 12 февраля 2016 г. для получения оптимального совпадения результатов математического моделирования и данных спутниковых наблюдений (изображение от 23 ч 55 мин 12 февраля, прибор MODIS, спутник “Тerra”).

Заданное в модели время начала выброса пепла: а) 18 ч; б) 19 ч; в) 20 ч; з) 21 ч.

5. Заключение

Создан новый инструмент, позволяющий решать задачи комплексного мониторинга распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки. Уже в настоящее время его используют ученые группы KVERT ИВиС ДВО РАН в работе по снижению опасности для полетов авиации в этом регионе (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/puff.php>). Разработанный набор технологий и программных средств можно применять как для изучения вулканов Камчатки, в частности для разработки методики уточнения характеристик извержений вулканов, так и для оценки влияния вулканической активности на окружающую среду, например процессов, связанных с распространением в атмосфере пепловых облаков.

В дальнейшем планируется разработка в ИС VolSatView методов и алгоритмов автоматического сопоставления информации, получаемой на основе результатов моделирования и данных спутниковых наблюдений. В перспективе их реализация позволит обеспечить уточнение прогнозов распространения пепловых облаков, а также параметров эксплозивных событий.

Обработка данных производилась с использованием ресурсов Центров коллективного пользования “Центр данных ДВО РАН” (ВЦ ДВО РАН) и “ИКИ-Мониторинг” (ИКИ РАН). Для хранения спутниковой информации и результатов ее обработки были применены системы и технологии, созданные при поддержке РФФИ (грант № 15-29-07953).

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

Литература

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **Кириянов В. Ю., Чубарова О. С., Гирина О. А. и др.** Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности. /В сб.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. — Петропавловск-Камчатский, ИВГиГ ДВО РАН, 2001, с. 408—423.
6. **Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А. и др.** Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5, с. 53—75.
7. **Лупян Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р. и др.** Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004, № 1, с. 81—88.
8. **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.
9. **Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.** 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.
10. **Романова И. М.** Геопортал ИВиС ДВО РАН как единая точка доступа к вулканологическим и сейсмологическим данным. — Геоинформатика, 2013, № 1, с. 46—54.
11. **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. **Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ.** Изд. 1. — Париж, ИСАО (Международная организация гражданской авиации), 2001.
13. **Сорокин А. А., Королев С. П., Гирина О. А. и др.** 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.
14. **Aloisi M., D’Agostino M., Dean K. G., et al.** Satellite analysis and PUFF simulation of the eruptive cloud generated by the Mount Etna paroxysm of 22 July 1998. — J. Geophys. Res., 2002, vol. 107, No. B12, 2373; doi: 10.1029/2001JB000630.
15. **Environmental Modeling Center.** The GFS Atmospheric Model. — Camp Springs, Maryland, NCEP Office Note 442, Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, 2003, 14 p.

- 16. Korolev S. P., Sorokin A. A., Verkhoturov A. L., et al.** Automated information system for instrument data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS. — *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, No. 3, pp. 209—218; doi: 10.3103/S0747923915030068.
- 17. Mastin L. G., Randall M. J., Schwaiger H. F., and Denlinger R. P.** User's Guide and Reference to Ash3d — A Three-dimensional Model for Eulerian Atmospheric Tephra Transport and Deposition. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1122, 48 p.; <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1122/>.
- 18. Miller T. P. and Casadevall T. J.** Volcanic ash hazards to aviation. /In: *Encyclopedia of Volcanoes*. — San Diego, California, Academic Press, 2000, pp. 915—930.
- 19. Neal Ch., Girina O., Senyukov S., et al.** Russian eruption warning systems for aviation. — *Natural Hazards*. Springer Netherlands, 2009, vol. 51, No. 2, pp. 245—262.
- 20. Peterson R. A.** Puff UAF User's Manual /Technical Manual, 2003; <http://web.archive.org/web/20121119195411/http://puff.images.alaska.edu/doc.shtml>.
- 21. Scollo S., Prestilippo M., Coltelli M., et al.** A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts. — *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 2011, vol. 200; doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.12.004.
- 22. Searcy C., Dean K., and Stringer W.** PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model. — *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 1998, vol. 80, No. 1—2, pp. 1—16.
- 23. Sorokin A. A., Korolev S. P., Urmanov I. P., et al.** Software platform for observation networks instrumental data Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. /In: *Proceedings of International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE 2015)*, Beijing, May 17—18, 2015, pp. 589—594; WOS: 000361831900077.
- 24. Steensen T., Stufer M., Webley P., et al.** Qualitative comparison of Mount Redoubt 2009 volcanic clouds using the PUFF and WRF-Chem dispersion models and satellite remote sensing data. — *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 2013, vol. 259, pp. 235—247; doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.02.018.
- 25. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., et al.** NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 96, pp. 2059—2077.
- 26. Tanaka H. L.** Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska. /In: *Proceedings of First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, U.S. Geological Survey, Bulletin 2047, 1994, pp. 283—291.

Поступила в редакцию 3 VI 2016 г., после доработки 26 X 2016 г.

SATELLITE OBSERVATIONS AND NUMERICAL SIMULATION RESULTS FOR THE COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ASH CLOUD TRANSPORT DURING EXPLOSIVE ERUPTIONS OF KAMCHATKA VOLCANOES

A. A. Sorokin, O. A. Girina, E. A. Lupyán, S. I. Mal'kovskii,
I. V. Balashov, V. Yu. Efremov, L. S. Kramareva, S. P. Korolev,
I. M. Romanova, and E. V. Simonenko

Ash clouds resulting from explosive volcanic eruptions pose a real threat to human life (for aircraft flights, airport operations, etc.); therefore, the detection, monitoring, and forecast of their movement is an urgent and important issue. The features and examples of application of the new tool developed on the basis of "Monitoring of Active Volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands" information system (VolSatView) are described. It allows the integrated monitoring and forecasting of ash cloud transport using the data of remote sensing and mathematical modeling as well as the assessment of parameters of explosive events.