

О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А.А. Сорокин,
Д.В. Мельников, И.М. Романова, А.В. Кашницкий,
И.А. Уваров, С.И. Мальковский, С.П. Королев,
А.Г. Маневич, Л.С. Крамарева

Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки



**Olga A. Girina, Evgeny A. Loupian, Aleksei A. Sorokin,
Dmitry V. Melnikov, Iraida M. Romanova,
Aleksandr V. Kashnitskii, Ivan A. Uvarov,
Sergey I. Malkovsky, Sergey P. Korolev,
Alexander G. Manevich, Lyubov S. Kramareva**

Comprehensive monitoring of explosive volcanic eruptions of Kamchatka

**Petropavlovsk-Kamchatsky
2018**

**О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А.А. Сорокин,
Д.В. Мельников, И.М. Романова, А.В. Кашницкий,
И.А. Уваров, С.И. Мальковский, С.П. Королев,
А.Г. Маневич, Л.С. Крамарева**

Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки

**Петропавловск-Камчатский
2018**

УДК 551.21+004.65+004.9

Научное издание

Комплексный мониторинг взрывчатых извержений вулканов Камчатки
Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. – 192 с.

ISBN 978–5–902424–29–1

**Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Романова И.М.,
Кашицкий А.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Маневич А.Г.,
Крамарева Л.С.**

В монографии приведены различные данные о вулканах Камчатки, описаны возможности их изучения на основе комплексного использования методов и технологий дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численного моделирования. Значительное внимание уделено вопросам построения и применения информационных систем, обеспечивающих сегодня оперативный мониторинг и исследования вулканической активности, которые в последние годы совместно разрабатываются и развиваются специалистами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский), Института космических исследований РАН (Москва), Вычислительного центра ДВО РАН (Хабаровск) и Дальневосточного филиала НИЦ Планета (Хабаровск). Приведены результаты комплексных исследований взрывчатых извержений вулканов, а также потенциальная опасность действующих вулканов Камчатки для населения и авиации, полученные учеными ИВиС ДВО РАН, в том числе, с помощью представленных в монографии новых методов, технологий и систем.

The monograph presents various data about the volcanoes of Kamchatka and describes the possibilities of studying them based on the integrated use of remote sensing, ground-based observation and numerical simulation methods and technologies. Considerable attention is paid to the construction and application of the information systems that today provide operational monitoring and studies of volcanic activity, which have been jointly developed in the recent years by the experts from the Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (IVS FEB RAS) (Petropavlovsk-Kamchatsky), Space Research Institute RAS (Moscow), Computing Center FEB RAS (Khabarovsk) and the Far East Branch of the Research Center “Planeta” (Khabarovsk). The results of complex studies of explosive volcanic eruptions and the potential hazards of the Kamchatkan active volcanoes to the population and aviation are presented which are obtained by the scientists of IVS FEB RAS, particularly exploring the new methods, technologies and systems described in the monograph.

Подготовка и издание монографии осуществлено на средства гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00042) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Рецензенты:

А.Ю. Озеров, д.г.-м.н., Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
А.А. Романов, д.т.н., АО “Российские космические системы”
И.А. Кривошеев, д.т.н., Вычислительный центр ДВО РАН

Ответственный редактор:

О.А. Гирина, к.г.-м.н., Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

ISBN 978–5–902424–29–1

© ИВиС ДВО РАН
© ИКИ РАН
© ВЦ ДВО РАН
© ДЦ НИЦ Планета

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
Глава 1. Развитие методов и систем мониторинга вулканов Камчатки.....	11
1.1. Эксплозивные извержения вулканов и их опасность для населения.....	11
1.2. Краткая характеристика вулканизма Камчатки.....	17
1.3. Виды и методы мониторинга вулканов Камчатки.....	20
1.3.1. Виды и методы мониторинга вулканов Камчатки, применяемые KVERT.....	20
1.3.1.1. Визуальный мониторинг вулканов.....	20
1.3.1.2. Видеонаблюдения за вулканами.....	22
1.3.1.3. Спутниковый мониторинг вулканов.....	23
1.3.2. Сейсмический мониторинг вулканов.....	29
1.3.3. Газовый мониторинг.....	29
1.3.4. Акустический мониторинг.....	30
Глава 2. Моделирование распространения пепловых облаков во время эксплозивных извержений вулканов.....	31
2.1. Модели распространения пепловых облаков.....	31
2.2. Источники метеорологических данных.....	33
2.3. Модель PUFF.....	35
2.4. Модификация программной реализации модели PUFF.....	36
2.5. Примеры использования разработанных методов.....	38
Глава 3. Методы спутникового мониторинга и изучения активности вулканов.....	41
3.1 Основные задачи спутникового мониторинга вулканической активности.....	41
3.2 Методы и подходы обработки и анализа спутниковых данных для мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил.....	42
3.2.1. Термальные аномалии.....	42
3.2.1.1. Алгоритм автоматического анализа спутниковых снимков MODIS.....	43
3.2.1.2. Результаты автоматической обработки спутниковых данных с помощью алгоритма MODVOLC.....	45
3.2.1.3. Корреляция видео и спутниковых данных для анализа активности вулканов.....	49
3.2.2. Выделение и анализ пепловых эксплозий и распространения пепловых облаков.....	51
3.2.3. Мониторинг диоксида серы (SO ₂) для прогноза активности вулканов.....	54
3.2.3.1. Характеристика активности вулканов Камчатки по данным мониторинга SO ₂	56
Глава 4. Информационные системы VOKKIA и KVERT для сбора, хранения и анализа вулканологических данных.....	63
4.1. Инфраструктура пространственных данных.....	63
4.2. ИС VOKKIA.....	64

4.2.1. Назначение системы и особенности ее реализации.....	64
4.2.2. База данных ИС VOKKIA	70
4.2.3. Анализ вулканологических данных в ИС VOKKIA.....	72
4.3. ИС KVERT.....	72
4.3.1. Назначение системы и особенности ее реализации.....	72
4.3.2. База данных ИС KVERT.....	74
4.3.3. Сервис подготовки и рассылки сообщений ИС KVERT	74
4.3.4. Сервис поиска и визуализации результатов моделирования.....	74
4.3.5. Сервис графической визуализации данных и их анализ в ИС.....	75
4.4. Взаимодействие ИС VOKKIA и KVERT	79

Глава 5. Автоматизированная информационная система «Сигнал»

для наблюдений и исследований вулканической деятельности.....	80
5.1. Назначение АИС «Сигнал»	80
5.2. Система моделирования распространения пепловых облаков от вулканов	81
5.2.1. Источник данных для моделирования	81
5.2.2. Подготовка метеорологических данных	83
5.2.3. Выполнение численных расчетов.....	84
5.3. Система видеонаблюдения за вулканами.....	85
5.4. Сервис-ориентированный интерфейс доступа к данным о вулканах Камчатки.....	88

Глава 6. Система VolSatView – базовый инструмент дистанционного мониторинга и исследования вулканической активности Камчатки и Курил

6. 1. Основные задачи системы	91
6.2. Архитектура построения и основные элементы системы VolSatView.....	92
6.3. Спутниковые и метеорологические данные в ИС VolSatView	95
6.3.1. Основные типы спутниковых данных.....	95
6.3.2. Основные типы метеоданных	98
6.4. Основные возможности анализа данных, реализованные в ИС VolSatView	101
6.4.1. Основа для реализации системы анализа данных в ИС VolSatView и ее базовая функциональность	101
6.4.1.1. Картографический web-интерфейс	101
6.4.1.2. Анализ рядов данных.....	103
6.4.1.3. Специализированные интерфейсы для управления ИС VolSatView	103
6.4.2. Специализированные возможности работы с данными в ИС VolSatView	104
6.4.2.1. Интерфейсы для анализа информации специализированных баз данных	104
6.4.2.2. Специализированные продукты, получаемые на основе данных мониторинга	105
6.4.2.3. Анализ термальных аномалий в районах вулканов.....	105
6.4.2.4. Выделение (окиривание) пепловых шлейфов	110
6.4.2.5. Оценка высоты пепловых облаков и шлейфов	111
6.4.2.6. Инструменты для анализа динамических процессов.....	112
6.4.2.7. Особенности работы с данными спутника Himawari-8	115
6.4.2.8. Анализ гиперспектральных данных	115

6.4.2.8.1. Анализ структуры отложений пирокластических потоков вулканов	117
6.4.2.8.2. Анализ пепловых шлейфов	118
6.4.2.8.3. Анализ парогазовых шлейфов	119
6.4.2.8.4. Анализ пород на склонах вулканов	119
6.4.2.8.5. Совместный анализ результатов моделирования распространения пепловых шлейфов и спутниковых данных	120
Глава 7. Комплексный анализ данных дистанционного зондирования и наземных инструментальных наблюдений об активности вулканов Камчатки ..	122
7.1. Комплексный анализ данных об извержениях вулканов Камчатки	122
Глава 8. Опасность извержений вулканов Камчатки	137
8.1. Вулкан Шивелуч	139
8.2. Вулкан Ключевской	141
8.3. Вулкан Ушковский	143
8.4. Вулкан Безымянный	144
8.5. Вулкан Плоский Толбачик и Толбачинский дол	146
8.6. Вулкан Ичинский	148
8.7. Вулкан Кизимен	149
8.8. Вулкан Высокий	150
8.9. Вулкан Комарова	151
8.10. Вулкан Гамчен	152
8.11. Вулкан Хангар	153
8.12. Вулкан Кроноцкий	154
8.13. Вулкан Крашенинникова	155
8.14. Вулкан Тауншиц	156
8.15. Вулкан Кихпинич	157
8.16. Вулкан Малый Семячик	158
8.17. Вулкан Карымский	159
8.18. Вулкан Жупановский	160
8.19. Вулкан Коряжский	161
8.20. Вулкан Авачинский	162
8.21. Вулкан Горелый	163
8.22. Вулкан Опала	164
8.23. Вулкан Мутновский	165
8.24. Вулкан Ходутка	166
8.25. Вулкан Ксудач	167
8.26. Вулкан Желтовский	168
8.27. Вулкан Ильинский	169
8.28. Вулкан Дикий Гребень	170
8.29. Вулкан Кошелева	171
8.30. Вулкан Камбальный	172
Заключение	174
Список литературы	175

ВВЕДЕНИЕ

На нашей планете около 900 действующих вулканов, две трети из них расположены в Северном полушарии и более 200 – на севере Тихоокеанского региона, отличающегося высокой интенсивностью авиаполетов. Объем воздушных перевозок в мире постоянно растет, и все чаще самолеты попадают в облака вулканического пепла. Например, до 1980-х гг. такие инциденты были единичными, а при извержении только вулкана Пинатубо (Филиппины) в 1991 г. произошло 18 контактов реактивных самолетов с вулканическим пеплом. Сильные (плинианские и субплинианские) эксплозивные извержения вулканов, при которых в течение нескольких часов или дней в атмосферу и стратосферу выбрасывается до нескольких кубических километров вулканических пеплов и аэрозолей, пепловые облака и шлейфы в зависимости от силы и скорости ветра перемещаются на тысячи километров от вулкана в течение многих дней, наиболее опасны для самолетов.

На Камчатке 30 действующих вулканов, здесь ежегодно происходят эксплозивные, эффузивные и экструзивные извержения 2–6 вулканов, во время которых на поверхность земли поступают тонны вулканогенных продуктов в виде лавы, пирокластики, вулканических газов и аэрозолей, оказывающих влияние на окружающую среду и представляющих опасность для населения и авиаперевозок в северо-западной части Тихоокеанского региона. Для ее снижения с 1935 г. ученые Академии наук России детально исследуют все вулканы Камчатки, с 1993 г. выполняют ежедневный видеовизуальный и спутниковый мониторинг действующих вулканов, главной задачей которого является своевременное обнаружение повышения активности вулканов, распознавание и отслеживание облаков вулканического пепла, оперативное оповещение администраций авиакомпаний о появлении вулканоопасности.

Особенности будущих извержений, напрямую связанных с составом поступающего на поверхность земли магматического вещества, определяются на основе комплексного изучения истории активности вулкана и реанализа его известных извержений. В настоящее время в мире выполняется достаточно много работ, направленных на решение различных научных и прикладных задач, способных обеспечить безопасность населения при эксплозивных извержениях вулканов. Имеются успешные предсказания эксплозивных извержений по комплексу сейсмических, геодезических, геохимических данных, которые позволяли вовремя эвакуировать население с территорий, подверженных воздействиям извержений и их продуктов,

например, в Японии. Основной проблемой является то, что опыт прогнозов извержений вулканов, наработанный в одной области мира, почти невозможно применить для вулканов другой территории. Уникальность каждого вулкана и геологической обстановки его развития требуют индивидуальных методов оценки опасности его эксплозивных извержений, с другой стороны, в современном мире актуальны оперативность и точность таких оценок.

Бурное развитие в XXI веке космических и информационных технологий обработки и анализа данных, телекоммуникационной инфраструктуры и программ создания космических аппаратов дистанционного зондирования привело к появлению в 2011 г. информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru>)», которая по разнообразию доступной в ней информации, степени автоматизации процессов обработки и хранения спутниковых данных, инструментам анализа данных и возможности их развития значительно превосходит зарубежные аналоги.

Ориентированная на свободно распространяемые некоммерческие спутниковые продукты, ИС VolSatView обладает возможностями автоматизированного сбора различных спутниковых данных низкого, среднего и высокого разрешения с максимальной частотой их поступления в систему и удаленной (распределенной) работы с ними. VolSatView дает возможность выполнять совместный анализ спутниковых и иных инструментальных научных данных (метео-, видео-, результатов численного моделирования и т. п.), поступающих из других ИС, в частности: KVERT и VOKKIA ИВиС ДВО РАН, АИС «Сигнал» ВЦ ДВО РАН. Например, непосредственно в VolSatView можно работать с видеоданными по вулканам Шивелуч, Ключевской, Горелый, Авачинский и др.; визуализировать на спутниковых снимках с пепловыми шлейфами результаты численного моделирования распространения этих шлейфов от вулканов и т. д.

В VolSatView реализован широкий набор инструментов для работы со спутниковой и картографической информацией, например, непосредственно в веб-интерфейсе системы доступны инструменты для выделения и определения параметров: термальных аномалий в районах вулканов; пепловых облаков и шлейфов на любых расстояниях от вулканов и т. д., что значительно повышает оперативность мониторинга вулканов. ИС позволяет работать не только с поступающими спутниковыми данными, но и с их долговременными архивами. Совместный ретроспективный анализ геологических, спутниковых и других типов данных дает возможность получать уникальную информацию о процессах, происходивших в районах вулканической активности, и лучше понимать их природу. Например, череда перемежающихся извержений в районе активных вулканов Плоский Толбачик, Ключевской и Безымянный с 1941 по 2018 гг. позволяет говорить о взаимосвязи глубинных процессов на территории Ключевской группы вулканов. С другой стороны, совместный анализ наземной информации и спутниковых данных высокого разрешения (Aster, Landsat-8, Ресурс-П и др.) о вышеуказанных извержениях вулканов дает возможность проследить во времени от одного к другому вулкану смену геологической

и тектонической обстановок, в которых они последовательно извергались, а также изменения характера эксплозивной активности каждого из вулканов, с большей надежностью прогнозировать их будущие извержения.

В монографии даны описания возможностей четырех информационных систем (KVERT, VOKKIA, VolSatView, АИС «Сигнал»), с помощью которых в настоящее время происходит сбор, обработка и анализ вулканологических данных, в том числе выполняется оперативный мониторинг действующих вулканов и оценка их опасности для населения и авиации. Кроме этого, приведены краткая информация о действующих вулканах Камчатки и потенциальной опасности их эксплозивных извержений для населения и авиации, а также некоторые результаты комплексного анализа отдельных извержений вулканов.

Следует сказать, что сегодняшние возможности применения информационных систем для мониторинга вулканов Камчатки совместно с историческими данными об их извержениях позволяют оперативно отслеживать изменения в характере эксплозивной активности каждого из извергающихся вулканов, определять направление и протяженность распространения пепловых шлейфов, выделять территории на склонах и у подножия вулканов, наиболее подверженные распространению пирокластических потоков, то есть оперативно объективно оценивать опасность эксплозивных извержений для авиации и населения и своевременно предупреждать о ней заинтересованных пользователей.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику РАН Евгению Ильичу Гордееву за поддержку при подготовке рукописи к печати.

Глава 1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

1.1. Эксплозивные извержения вулканов и их опасность для населения

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными для населения и авиации в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и слабой их предсказуемостью.

Эксплозивное событие представляет собой единичный, относительно краткосрочный (минуты) сильный взрыв с выбросом пирокластического материала, происходящий при стремительном расширении газов в поднимающемся к поверхности земли магматическом веществе (рис. 1.1). Отдельные эксплозивные события могут следовать друг за другом с небольшими перерывами во времени, образуя серии взрывов.

Особое место занимают катастрофические извержения вулканов, в результате которых изменяются ландшафты окрестностей вулканов в радиусе 30–50 км, реки меняют русла, уничтожаются леса, пашни, города и поселки, гибнут люди. При таких извержениях в течение нескольких часов происходит вынос из вулкана более 1–3 км³ материала, подъем пеп-



Рис. 1.1. Эксплозивная активность вулканского типа вулкана Жупановский 8 марта 2015 г., фото А. Гаврилова

ловых туч до 30–35 км над уровнем моря (н.у.м.); отмечаются обильные пеплопады в окрестностях вулкана, губительно действующие на растительность и все живое; пирокластические потоки, движущиеся со скоростью более 100 км/ч, сметают все на своем пути на расстояниях до 35 км от вулкана и т. д. Примеров вулканогенных катастроф, начиная с извержения Везувия в 79 г. н.э., в истории человечества множество: Кракатау в 1883 г., Тамбора в 1815 г., Безымянный в 1956 г., Шивелуч в 1964 г., Сент-Хеленс в 1980 г., Пинатубо в 1991 г. и т. д. (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Катастрофическое извержение вулкана Безымянный 30 марта 1956 г., фото И. Ерова

Для классификации эксплозивных извержений применяют комплексный показатель VEI (Volcanic Explosivity Index, от 0 до 8), включающий следующие характеристики извержения: высота подъема эруптивной колонны, продолжительность непрерывного истечения пепла из кратера вулкана, приблизительный объем изверженных продуктов и др. (рис. 1.3.) (Newhall, Self, 1982). Совокупность описанных в литературе извержений отдельных вулканов сведена в характеристике VEI к главным пяти типам: гавайский, стромболианский, вулканский, плинианский, ультраплинианский, причем гавайский относится не к эксплозивному, а к эффузивному типу извержения.

Извержение стромболианского типа (по характеру активности вулкана Стромболи) представляет собой фонтанирование жидкой лавы в кратере вулкана – регулярные, ритмичные, с перерывом в 1–15 мин выбросы на первые десятки или сотни метров вулканических бомб, лапилли и шлака, которые падают обратно в кратер, пепла мало – пепловые облака не образуются (Влодавец, 1984). Стромболианский тип извержения присущ базальтовым и андезибазальтовым вулканам. *Извержение вулканского типа* (по вулкану Вулькано) характеризуется выносом бомб, лапилли, шлака и большого количества пепла, который поднимается до 10–15 км н.у.м. Образуются тяжелые пепловые облака, которые могут перемещаться на сотни и тысячи километров от вулкана. Такой тип извержения наблюдается на всех вулканах, но

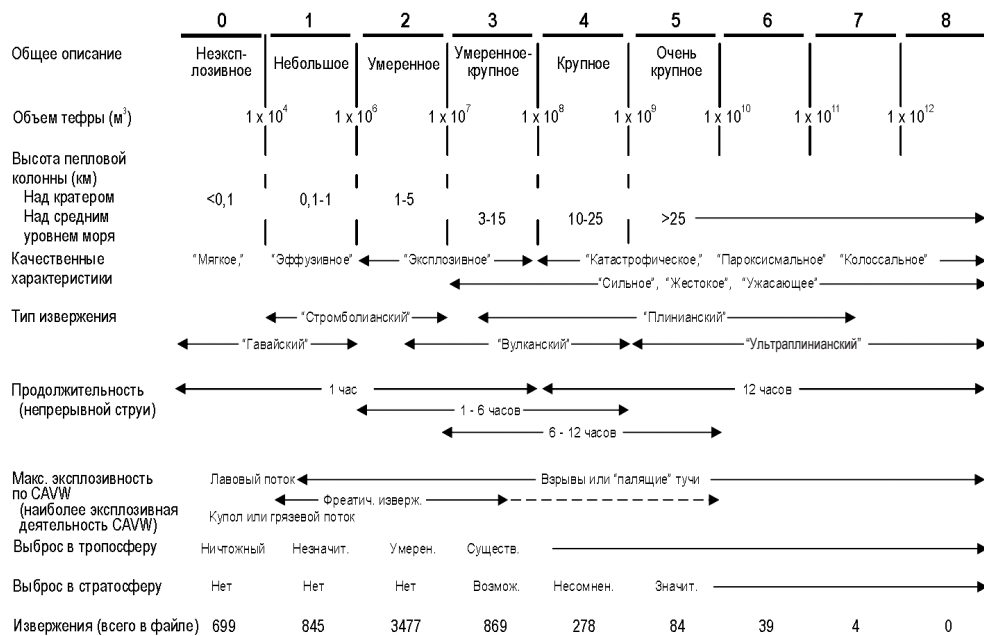


Рис. 1.3. Критерии для определения VEI (Volcanic Explosivity Index) – показателя вулканической активности (по Newhall, Self, 1982)

больше свойственен андезитовым и дацитовым вулканам (Влодавец, 1984). *Плинианский тип извержения* (по имени Плиния Младшего, описавшего извержение вулкана Везувий в 79 г. н. э.) отличается катастрофичностью событий: пробуждение вулкана после продолжительного покоя мощными взрывами с выносом пирокластики (в том числе легких пемз дацитового состава) до 35 км н.у.м., низвержение пирокластических потоков, сметающих все на своем пути на расстояниях до 50 км от вулкана; значительное расширение кратера вулкана и снижение высоты его постройки. Объем эруптивных продуктов, как правило, более 1 км³. Такой тип извержения характерен для андезитовых и дацитовых вулканов (Влодавец, 1984). *Ультраплинианский тип извержения* характеризует образование кальдеры взрывного типа, объем изверженного вещества при этом может в десятки и сотни раз превышать объем пирокластики, вынесенной во время извержения плинианского типа.

Географическое положение вулкана, его геологическое строение и история развития, состав поступающего в вулканическую постройку магматического вещества, содержание в магме растворенного магматического газа и другие особенности влияют на характеристики эксплозивных извержений – даже у близко расположенных вулканов они могут достаточно сильно различаться. Например, в Ключевской группе вулканов Камчатки на расстоянии всего 10 км друг от друга находятся типичный базальтовый вулкан Ключевской (4750 м) и типичный андезитовый Безымянный (2882 м). Для Ключевского характерны стромболианский (с выбросом вулканических бомб, шлака и пепла до 6 км н.у.м.) и вулканский (вынос пепла до 15 км н.у.м.) типы эксплозивных извержений, вершинные извержения

и побочные прорывы с образованием моногенных шлаковых конусов, излиянием лавовых потоков протяженностью до 15 км. Длительность эксплозивно-эффузивных извержений Ключевского может варьироваться от 5 дней до 18 месяцев (см. главу 8) (Действующие ..., 1991). Для вулкана Безымянный в настоящее время типичны вулканские (вынос пепла также до 15 км н.у.м.) эксплозивные извержения, формирование пирокластических потоков и волн протяженностью до 15 км от вулкана, выжимание вязких лавовых потоков длиной до 1,2 км на склоны лавового купола; продолжительность эксплозивных извержений может быть от 0,5 ч до 2 суток, эффузивных – до полутора лет (см. главу 8) (Girina, 2013).

В зависимости от мощности эксплозивного извержения (его интенсивности и продолжительности, объема изверженного материала, высоты, на которую он поднят, и т. д.), силы и скорости ветра, в атмосфере на различных высотах формируются пепловые облака и шлейфы, которые могут перемещаться на тысячи километров от вулкана в течение многих дней. Перемещение эруптивного облака зависит от тропосферных и стратосферных ветров, стабильности состояния атмосферы, первоначальной высоты облака, концентрации в нем пепловых частиц и осаждения их под действием силы тяжести, атмосферных осадков и других метеоусловий.

Пепловые облака представляют реальную угрозу для находящихся в полете воздушных судов и существенные трудности для работы аэродромов, поэтому их обнаружение, отслеживание и прогноз перемещения является актуальной и важной задачей, от качественного решения которой зависит, в том числе, безопасность авиаперевозок (Гирина, Гордеев, 2007; Girina, 2012; Gordeev, Girina, 2014; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009; и др.).

Для уменьшения риска столкновения самолетов с пепловыми облаками в различных странах мира, где имеются действующие вулканы, созданы вулканологические обсерватории для проведения мониторинга хотя бы части таких вулканов. Координацию работы 79 вулканологических обсерваторий мира осуществляет Всемирная организация вулканологических обсерваторий (World Organization of Volcano Observatories – WOVO, <http://www.wovo.org>), действующая при Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior – IAVCEI, <http://www.iavcei.org/>). WOVO издает справочник, содержащий сведения о размещении вулканологических обсерваторий в государствах, об их программах слежения за вулканами, контактную информацию ответственных за выполнение программ вулканологов и т. д. Различные вулканологические обсерватории используют все или некоторые из методов слежения за вулканами: видео и визуальный, геофизический (анализ сейсмических, электрических, магнитных, гравитационных и других явлений), гидрологический, газовый, спутниковый (анализ различных, в том числе интерферометрических, данных) и др. Для объединения усилий различных служб (вулканологических обсерваторий; метеорологических, гидрологических и других станций и т. п.) по обнаружению вулканического пепла в атмосфере и непрерывному слежению за его перемещением для снижения опасности для авиаперевозок, 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 – VAACs: Анкоридж, Буэнос-Айрес, Вашингтон, Веллингтон, Дарвин, Лондон, Монреаль, Токио, Тулуза) и определила границы их ответственности. Кроме этого, в рамках глобального спутникового мониторинга вулканов созданы web-порталы, представляющие отдельные направления исследований, например: Спутниковый мониторинг активных вулканов восточной Азии близко к реальному времени (Near Real Time Monitoring of Active Volcanoes in East Asia using Satellite Data, <http://vrsserv.eri.u-tokyo.ac.jp/REALVOLC/>); Система детектирования вулканических горячих точек близко к реальному времени (Near Real Time Volcanic HotSpot Detection System, <http://www.mirovaweb.it/>); Мониторинг вулканических облаков (the NOAA/CIMSS Volcanic Cloud Monitoring Web Portal, <https://volcano.ssec.wisc.edu/>); Система оповещения о вулканическом пепле и SO₂ в рамках Службы поддержки авиации (Support Aviation Control Service (SACS) SO₂ and Ash Notification System, <http://sacs.aeronomie.be/>).

На Камчатке для повышения безопасности авиаполетов при эксплозивных извержениях вулканов в 1993 г. на базе Института вулканической геологии и геохимии (ИВГиГ) ДВО РАН в сотрудничестве с Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) Геофизической службы (ГС) РАН и Аляскинской вулканологической обсерваторией (АВО) Геологической службы (ГС) США, при поддержке ГС США и Геофизического института Университета Аляски в г. Фэрбенкс, США, была создана Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>), которая с 2010 г. в составе Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН выполняет функции Вулканологической обсерватории Российской Федерации по обеспечению информацией о вулканической деятельности на Дальнем Востоке международного аэронавигационного сообщества пользователей воздушного транспорта (Гирина, Гордеев, 2007; Girina, 2012; Gordeev, Girina, 2014; Gordeev et al., 2016; Neal et al., 2009; и др.).

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 и оперативного оповещения администраций авиакомпаний о появлении опасности для воздушных судов, связанной с вулканическим пеплом.

В 1994 г. KVERT официально был зарегистрирован в ICAO в качестве представителя России по оповещению авиационных и метеорологических служб мира о вулканической опасности для авиации (письмо ICAO № 29848 от 12.10.1994) (Gordeev, Girina, 2014). С января 2005 г. до настоящего времени на сайте KVERT публикуются сообщения на английском языке KVERT Information Releases и Volcano Observatory Notice for Aviation (VONA с 2011 г.) с сохранением архива данных. С 2009 г. KVERT применяет Авиационные цветовые коды (АЦК), рекомендуемые ICAO (http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/color_eng.php). С 2012 г. все сообщения VONA/KVERT Releases публикуются на сайте KVERT и одновременно по e-mail отправляются всем пользователям, в том числе в VAACs гг. Анкоридж, Вашингтон, Дарвин, Монреаль и Токио; Метеорологический центр аэропорта г. Елизово, ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Камчатское отделение МЧС, с помощью сервиса автоматизированной подготовки

Группа KVERT
Камчатская группа реагирования на вулканические извержения

ИВиС ДВО РАН | Авиационные цветовые коды | Каталог активных вулканов | Карта активных вулканов | О группе KVERT | Поиск English

Понск
На первую
Авиационные цветовые коды (АЦК)
Активность вулканов в фотографиях
Прогноз для авиации опасности вулканов
Puff/AF
VONA/KVERT-сообщения о вулканической активности (in English):
VONA/KVERT об изменениях активности вулканов
Еженедельные KVERT-сообщения
Ежедневные KVERT-сообщения
KVERT-рапорты о пеллогах, выбросах и шлейфах

Вулканы Камчатки и Северных Курил в состоянии извержения или активизации

Эбеко	Шивелуч	Карымский	Ключевской	Безымянный
6/2/2018	4/12/2017	6/9/2017	6/1/2018	20/12/2017

KVERT/Volcano Observatory Notification to Aviation

(1) VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR AVIATION (VONA)
 (2) Issued: 20180223/2155Z
 (3) Volcano: Ebeko (CAVW #290380)
 (4) Current aviation colour code: ORANGE
 (5) Previous aviation colour code: orange
 (6) Source: KVERT
 (7) Notice Number: 2018-26
 (8) Volcano Location: N 50 deg 41 min E 156 deg 0 min
 (9) Area: Northern Kuriles, Russia
 (10) Summit Elevation: 3791.68 ft (1156 m)
 (11) Volcanic Activity Summary: According to visual data by volcanologists from Severo-Kurilsk, explosions sent ash up to 2 km a.s.l.; ash plume is drifting to the east from the volcano.
 A moderate gas-steam with some amount of ash activity of the volcano continues. Ash explosions up to 16,400 ft (5 km) a.s.l. could occur at any time. Ongoing activity could affect low-flying aircraft and airport of Severo-Kurilsk.
 (12) Volcanic cloud height: 6560-6560 ft (2000-2000 m) AMSL Time and method of ash plume/cloud height determination: 20180223/2142Z - Visual data
 (13) Other volcanic cloud information: Distance of ash plume/cloud of the volcano: 3 mi (5 km)
 Direction of drift of ash plume/cloud of the volcano: E / azimuth 90 deg

Любопытнo!
Больше >

Внимание, пепел!
Памятка населению Камчатки.

Видеонаблюдение за вулканами в реальном времени:
 Вулкан Плоский Толбачик
 Вулкан Ключевской
 Вулкан Шивелуч
 Вулкан Безымянный
 Вулкан Кизимен
 Вулкан Горельный
 Вулкан Аванинский
 Вулкан Коракоский
 Все веб-камеры

Карта активных вулканов

Рис. 1.4. Сайт KVERT ИВиС ДВО РАН

сообщений в ИС KVERT, реализованной в ИВиС ДВО РАН (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) (рис. 1.4) (см. главу 4).

В 2011–2014 гг. совместно с сотрудниками Института космических исследований (ИКИ) РАН, Вычислительного центра (ВЦ) ДВО РАН и Дальневосточного центра НИЦ «Планета» была создана и продолжает развиваться ИС «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)», предназначенная для комплексного оперативного и ретроспективного анализа активности вулканов по спутниковым и видео данным (Gordeev et al., 2016) (см. главу 6). В 2014–2015 гг. совместно с учеными KVERT в ВЦ ДВО РАН была создана подсистема, использующая модель PUFF, метеоданные NOAA и разработанные программные средства в составе автоматизированной ИС (АИС) «Сигнал», с помощью которой выполняется моделирование распространения пелловых облаков и шлейфов при извержениях вулканов (Сорокин и др., 2016; Gordeev et al., 2016) (см. главу 5). С 2016 г. анимированные результаты моделирования траекторий распространения пелловых шлейфов, основанные на данных VONA/KVERT, размещаемые на фоне схемы авиатрасс в районе северо-западной части Тихого океана, публикуются на сайте KVERT (Гирина и др., 2018a; Романова, Гирина, 2018) (см. главу 4).

Ученые KVERT ежедневно (с 2005 г. без выходных) проводят мониторинг вулканов Камчатки (с 1993 г.) и Северных Курил (с 2003 г.), обеспечивая своевременное предупреждение авиакомпаний Тихоокеанского региона о вулканической опасности на авиатрассах, пролегающих в зоне Камчатки и Курил, т. к. вулканический пепел чрезвычайно опасен для современной авиации (Гирина и др., 2018a).

Кроме оперативного реагирования на извержения вулканов с выбросами пепла, для оценки ситуации в районе конкретного действующего вулкана Камчатки и Курил очень важен прогноз его активности и опасности для авиapolетов на ближайшее время (дни, недели). Многосторонний анализ имеющихся опубликованных сведений о деятельности вулканов, а также данных, полученных KVERT в течение 25-летнего ежедневного мониторинга вулканической активности, позволяет с большой надежностью оценивать степень опасности каждого вулкана для авиapolетов и населения полуострова.

1.2. Краткая характеристика вулканизма Камчатки

Полуостров Камчатка расположен в переходной зоне Тихий океан – Азиатская окраина континента: южная его часть структурно связана с Курильской островной дугой, на севере его территория находится в узле сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, Императорской вулканической области и Императорского разлома. Взаимодействие этих структур на глубине отражается в высоком уровне сейсмической и вулканической активности региона, дискордантности динамических процессов на разных уровнях литосферы, сосуществовании орогенеза и рифтогенеза (Гонтовая и др., 2010; Селиверстов, 2009).

На Камчатке выявлено 7100 вулканических построек, сформированных за последние 2–2,5 млн лет (Новейший ..., 2005). Вследствие разнообразия химического состава вулканитов (от базальтов до риолитов) здесь можно встретить весь спектр имеющихся на планете вулканических образований: щитовые вулканы, стратовулканы, кальдеры, моногенные конусы, экструзивные куполы, маары, лавовые плато и потоки, игнимбритовые покровы, пирокластические толщи и потоки и т. д.

В настоящее время вулканические ландшафты в основном определяют около 4000 вулканических образований, возникших за последние 40–50 тыс. лет, приуроченных к Срединному и Восточному хребтам и Центральной камчатской депрессии (Новейший ..., 2005). Стратовулканы располагаются в зонах глубинных разломов и/или их пересечений, часто образуют группы: например, Авачинско-Корякская, Мутновско-Гореловская, Ключевская, Северная и др. группы вулканов. К «действующим» или «активным» относятся вулканы, для которых установлено хотя бы одно извержение за последние 3500 лет (Мелекесцев, 2006; Мелекесцев и др., 2001; Новейший ..., 2005).

На Камчатке расположено 30 действующих вулканов, хотя исторические извержения известны только для 20 из них (рис. 1.5, табл. 1.1). По данным KVERT, ежегодно здесь наблюдаются извержения 2–6 вулканов (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). 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; постоянная современная активность Молодого Шивелуча продолжается с августа 1980 г. – со времени начала роста лавового купола в эксплозивном кратере катастрофического извержения 12 ноября 1964 г.; деятельность Безымянного – с 22 октября 1955 г.,

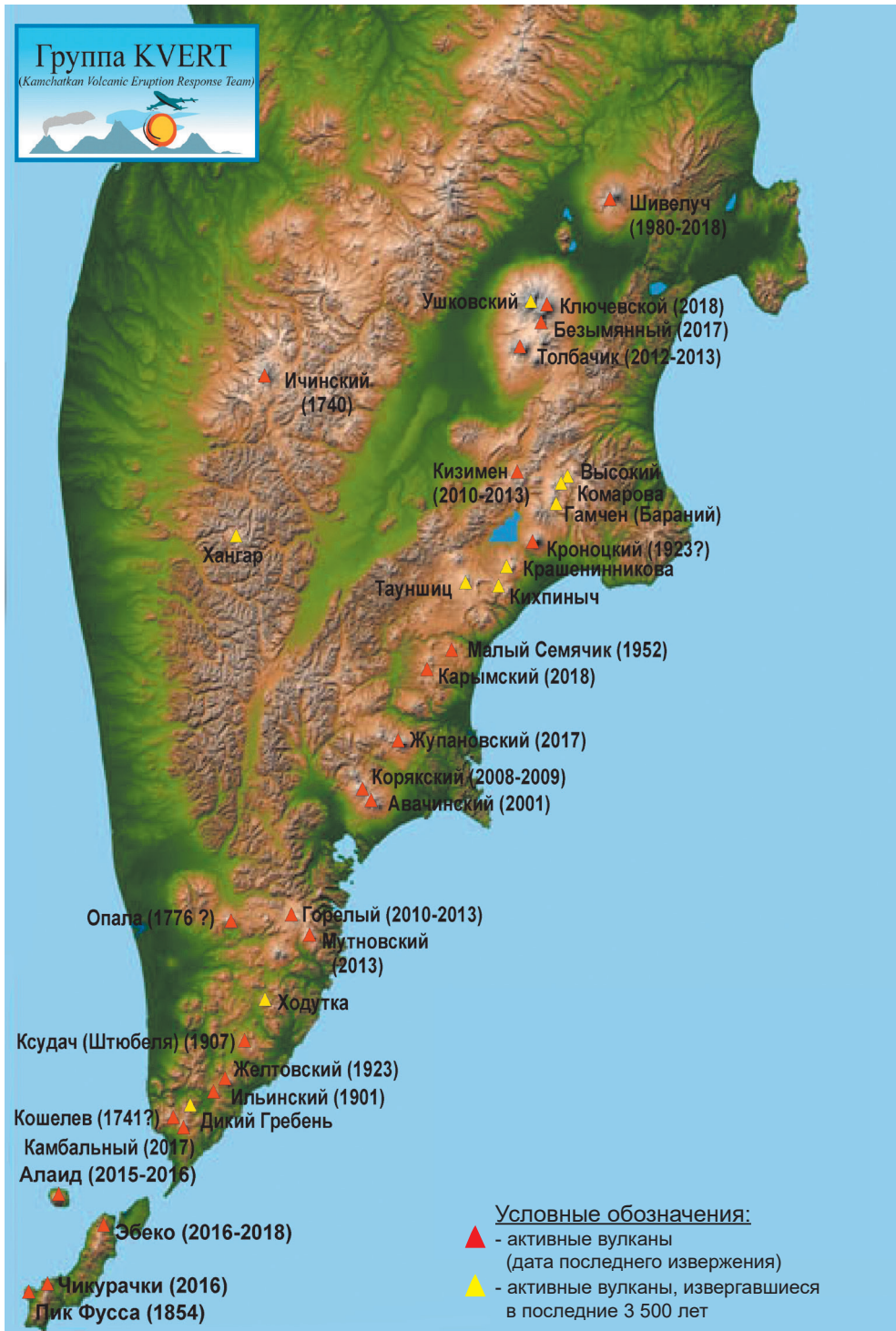


Рис. 1.5. Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил

Таблица 1.1. Действующие вулканы Камчатки

№	Вулкан	Координаты		Высота активного центра, м	Время последнего извержения
		северной широты	восточной долготы		
1	Шивелуч	56°38'10"	161°18'54"	2500	1980–2018
2	Ключевской	56°03'20"	160°38'31"	4750	15.06.2018.
3	Ушковский	56°04'12"	160°28'16"	3943	~ 8600 ¹⁴ С лет назад
4	Безымянный	55°58'19"	160°35'43"	2882	20.12.2017
5	Плоский Толбачик	55°49'44"	160°23'25"	3085	27.11.2012.–15.09.2013
6	Ичинский	55°40'39"	157°43'06"	3621	1740
7	Кизимен	55°07'51"	160°19'12"	2485	09.12.2010.–09.12.2013
8	Высокий	55°03'51"	160°45'54"	2161	~ 2500 ¹⁴ С лет назад
9	Комарова	55°02'00"	160°43'30"	2070	< 1000 ¹⁴ С лет назад
10	Гамчен	54°58'27"	160°42'12"	2576	~ 2500 ¹⁴ С лет назад
11	Хангар	54°45'41"	157°24'24"	2000	~ 400 ¹⁴ С лет назад
12	Кроноцкий	54°45'11"	160°31'58"	3528	1922–1923
13	Крашенинникова	54°35'45"	160°16'12"	1856	~ 400–500 ¹⁴ С лет назад
14	Тауншиц	54°31'41"	159°48'15"	2353	~ 2400 ¹⁴ С лет назад
15	Кихпинич	54°29'20"	160°15'05"	1552	~ 500 ¹⁴ С лет назад
16	Малый Семячик	54°08'07"	159°40'26"	1560	12.1952
17	Карымский	54°02'55"	159°26'36"	1486	06.2017–2018
18	Жупановский	53°35'19"	159°08'53"	2958	16.09.2017
19	Корякский	53°19'15"	158°42'43"	3456	20.12.2008–26.08.2009
20	Авачинский	53°15'22"	158°50'10"	2751	05.10.2001
21	Горелый	52°33'31"	158°01'49"	1828	07.2010–15.12.2013
22	Опала	52°32'34"	157°20'19"	2475	1776
23	Мутновский	52°26'55"	158°11'47"	2323	03.07.2013.
24	Ходутка	52°03'44"	157°42'39"	2090	~ 2000 ¹⁴ С лет назад (?)
25	Ксудач	51°50'38"	157°34'20"	1079	28–29.03.1907
26	Желтовский	51°34'36"	157°19'42"	1923	11.02.–04.1923
27	Ильинский	51°29'54"	157°12'12"	1578	~ 1901
28	Дикий Гребень	51°27'08"	156°58'41"	1070	~ 1600 ¹⁴ С лет назад
29	Кошелева	51°21'20"	156°45'11"	1812	1741 (?)
30	Камбальный	51°18'20"	156°52'31"	2156	24.03–22.04.2017

со времени пробуждения после длительного молчания (Горшков, 1957а; Иванов и др., 1981; Пийп, 1956; Girina, 2013).

В XX в. на Камчатке произошло три катастрофических извержения вулканов Ксудач (28 марта 1907 г. с объемом изверженных продуктов 1,5–2 км³), Безымянный (30 марта 1956 г., 3 км³) и Шивелуч (12 ноября 1964 г., 2,3 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, 1957а; Горшков, Дубик, 1969; Действующие ..., 1991; Мелекесцев и др., 1995; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>).

В XXI в. 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 гг.), Толбачинский дол – с 27 ноября 2012 г. по 15 сентября 2013 г. (1975–1976 гг.), Жупановский – с 21 октября 2013 г. по 20 ноября 2016 г. (1956–1957 гг.), Камбальный – с 24 марта по 22 апреля 2017 г. (неизвестно) (Гирина и др., 2010, 2012, 2017д, 2018в; Мельников и др., 2011; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). На вулкане Шивелуч кроме многочисленных отдельных эксплозивных эпизодов с выносом пепла до 10–15 км н.у.м. произошло три крупных пароксизмальных события с объемом изверженных продуктов до 0,5 км³ – 9 мая 2004 г., 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. (Гирина и др., 2006, 2007б; Овсянников, Маневич, 2010). Всего в XXI в. (за 17 лет) отмечено 55 извержений продолжительностью от нескольких часов до трех 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., 2018а).

Эксплозивные извержения вулканов Камчатки, наиболее опасные для населения и авиации, обладают рядом особенностей (удаленность большинства вулканов от населенных пунктов; пеплопады распространяются на огромные территории; в процессе извержений происходят изменения атмосферы, в том числе преобразование ее газового состава в результате выделения большого количества тепловой энергии и выноса вулканогенных газов и аэрозолей), которые позволяют получить наибольшую часть информации о них только дистанционными методами.

1.3. Виды и методы мониторинга вулканов Камчатки

1.3.1. Виды и методы мониторинга вулканов Камчатки, применяемые KVERT

1.3.1.1. Визуальный мониторинг вулканов

Наиболее достоверную информацию вулканологи получают в результате визуального мониторинга вулканов, поэтому с организацией Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в п. Ключи с 1 сентября 1935 г. и до настоящего времени в непрерывном режиме сотрудниками вулканостанции проводятся такие наблюдения за вулканами Северной группы Камчатки: Шивелучем, Ключевским, Ушковским. С развитием сейсмологии – одного из направлений исследований Камчатской вулканостанции, и установкой сети сейсмических станций в районе Ключевской группы вулканов, обслуживаемых операторами, визуальные наблюдения за вулканами расширились. В 1958 г. начала работать сейсмостанция в п. Козыревск, соответственно, стали накапливаться визуальные данные о вулканах Ключевской, Безымянный, Толбачик. С открытием в октябре 1960 г. сейсмической станции Апахончич

на юго-восточном склоне Ключевского здесь начался визуальный мониторинг вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный (рис. 1.6), продолжавшийся до 27 июня 1989 г. (Гордеев и др., 2006). С заменой старой станции на радиотелеметрическую, не требующую присутствия оператора, визуальные наблюдения за вулканами с Апахончича прекратились. Регулярный визуальный мониторинг вулканов Авачинский, Корякский, Горелый, Мутновский проводится со времени организации Камчатской комплекс-



Рис. 1.6. Визуальные наблюдения за активностью вулкана Безымянный (формирование пирокластического потока) 11 июня 1982 г. с с/с Апахончич, фото А. Малышева

ной экспедиции Совета по изучению производительных сил АН СССР – с 1959 г. по настоящее время. Мониторинг вулкана Карымский осуществлялся операторами сейсмостанции с 10 февраля 1973 г. по 20 октября 1986 г. (Гордеев и др., 2006), затем там также была установлена радиотелеметрическая станция, визуальные наблюдения за вулканом стали эпизодическими.

Визуальные наблюдения за другими вулканами Камчатки в основном выполняются вулканологами во время полевых работ. С развитием авиатранспорта во второй половине XX века один-два раза в год проводились облеты на самолетах всех вулканов Камчатки для визуальной оценки их активности. Тогда же начала применяться аэрофотосъемка для изучения морфологии действующих вулканов и оценки объемов продуктов их извержений. С развитием космонавтики стали изучаться фотографии вулканов, сделанные космонавтами с орбитальных станций. Кроме этого, визуальная информация об активных вулканах поступает вулканологам от пилотов местных и международных авиалиний, метеорологов, туристов, краеведов и др.

Визуальные данные позволяют вулканологам оценить степень насыщенности пеплом эруптивных колонн и облаков, высоту их подъема, направление перемещения от вулкана; сопровождающие извержение вулкана явления – например, наличие молний в эруптивной туче, интенсивность пеплопадов на разных расстояниях от вулкана, протяженность и мощность пирокластических и лавовых потоков и т. д.

1.3.1.2. Видеонаблюдения за вулканами

Для непрерывного наблюдения за деятельностью вулканов Камчатки, а также для оперативного отслеживания изменений в их активности с начала XXI в. вулканологи начали применять видеокамеры.

В 2000–2003 гг. ИВГиГ ДВО РАН и АВО ГС США в рамках работы KVERT обеспечили Камчатскому филиалу Федерального исследовательского центра (КФ ФИЦ) единой геофизической службы (ЕГС) РАН материальную базу для установки трех видеокамер для постоянного наблюдения за вулканами Ключевской (9 октября 2000 г.), Шивелуч (17 мая 2002 г.) и Безымянный (20 августа 2003 г.) (Гирина, Гордеев, 2007; Сеньюков, 2006). За 15 лет КФ ФИЦ ЕГС РАН установил дополнительно 10 видеокамер, направленных на вулканы: Ключевской и Безымянный (на сейсмостанциях Грива в сентябре 2013 г. и Киришев 25 апреля 2018 г.), Толбачик (на сейсмостанции Козыревск 28 ноября 2012 г.), Кизимен (на турбазе Тумрок 15 марта 2011 г.), Авачинский (на сопке Мишенной в 2009 г. и Авачинском перевале в 2015 г.), Корякский (на сопке Мишенной 15 марта 2009 г.), Мутновский и Горелый (в здании ИВиС ДВО РАН в 2012 г.), Жупановский (на сейсмостанции Мыс Налычево 13 мая 2015 г.), Эбеко, Северные Курилы (видеокамера SVERT (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team) Института морской геологии и геофизики ДВО РАН на сейсмостанции в г. Северо-Курильск в 2017 г.). В настоящее время информация с видеокамер передается в Интернет с дискретностью 1 кадр в 30 мин (<http://www.emsd.ru/video/>) (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Характеристики изображений с веб-камер, поступающих в архив KVERT

Вулкан	Размер снимка, пиксель	Источник	Ночная съемка	Частота съемки, кадр/мин
Шивелуч	1024 × 768	ИВиС ДВО РАН	нет	1
Шивелуч	800 × 600	ИВиС ДВО РАН	да	1
Шивелуч	800 × 600	ИВиС ДВО РАН	да	1
Ключевской	1024 × 768	ИВиС ДВО РАН	нет	1
Ключевской	800 × 600	ИВиС ДВО РАН	да	1
Безымянный	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Безымянный	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Толбачик	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Кизимен	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Жупановский	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Авачинский	1920 × 1080	ИВиС ДВО РАН	нет	5
Авачинский	2592 × 1944	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Корякский	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Горелый	1920 × 1080	ИВиС ДВО РАН	нет	15
Мутновский	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30
Эбеко	2048 × 1536	КФ ФИЦ ЕГС РАН	да	30

ИВиС ДВО РАН в 2010–2017 гг. установил семь видеокамер (три с инфракрасным режимом) на вулканы: Шивелуч (12 июля 2011 г., 1 декабря 2011 г. и 1 ноября 2017 г.), Ключевской (28 октября 2010 г. и 1 декабря 2011 г.), Горелый (20 января

дения 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 населенных пунктов; отсутствие сейсмических станций на большинстве действующих вулканов (например, в XXI в. на Камчатке сейсмостанции имеются только на десяти из тридцати активных вулканов); потребность в непрерывной 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 остается острой и в настоящее время: не для всех вулканов известны исторические извержения и восстановлена эруптивная история с помощью тефрохронологии. В связи с этим, единственным надежным источником наблюдений за продолжением или возобновлением вулканической активности на Камчатке и Курилах является спутниковая информация (Гирина и др., 2017г).

Мониторинг вулканов Камчатки постепенно развивался: если в 1997 г. спутниковые снимки NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (прибор AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer) поступали из АВО в KVERT по факсимильной связи, то в 1999 г. АВО предоставила KVERT непосредственный доступ к информации с NOAA для мониторинга состояния активных вулканов Камчатки, а также возможность ученым 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. ученые KVERT проводили обработку и анализ первичных снимков спутниковых систем MTSAT (Multi-Function Transport Satellite), GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), NOAA (AVHRR), Terra и Aqua (MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 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 договоров по спутниковому мониторингу вулканов KVERT тесно сотрудничал в 2002–2016 гг. с ФГБУ Росгеолфонд (г. Южно-Сахалинск), в 2007–2009 гг. – с ДЦ ФГБУ НИЦ «Планета» (г. Хабаровск), в 2010–2018 гг. – с ФГБУ «Камчатское УГМС» (г. Петропавловск-Камчатский), что дало возможность бесперебойно иметь дополнительные источники спутниковых данных, и, соответственно, более детально следить за изменениями характера активности вулканов с течением времени (рис. 1.8, 1.9).

Для определения по спутниковым данным высоты пепловых облаков необходимо регулярное поступление оперативной метеорологической информации. В 2010 г. был разработан алгоритм автоматического ежедневного накопления такой информации по атмосферному профилю на основе данных радиозонда. Поступление данных организовано с сайта Университета Вайоминг (Wyoming University, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Информация по атмосферному профилю в районе метеостанций Петропавловск-Камчатский, Ключи и Северо-Курильск

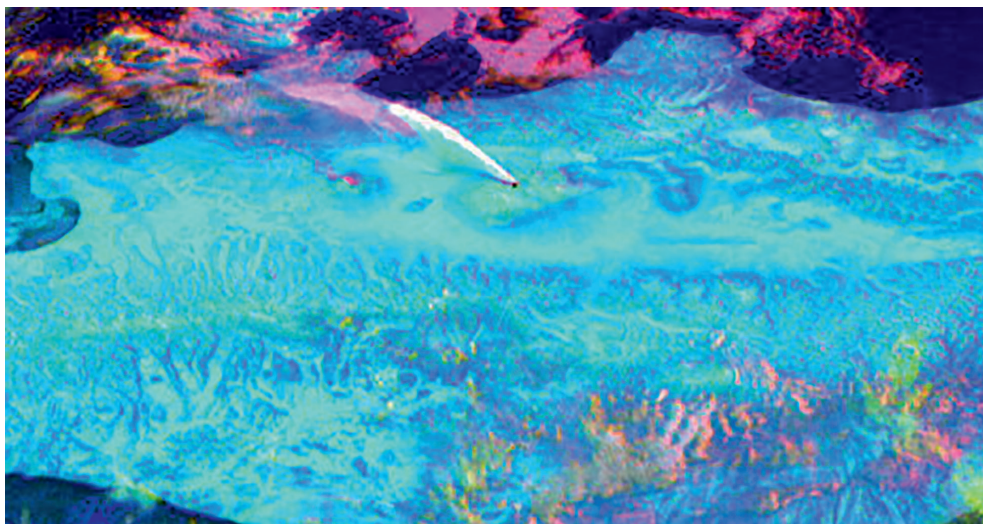


Рис. 1.8. Извержение Безымянного 14 января 2004 г. Пепловый шлейф протягивается на северо-восток от вулкана на спутниковом снимке NOAA-17 (AVHRR) за 01:23 UTC 14 января 2004 г., данные предоставлены ФГБУ Росгеолфонд по договору с ИВиС ДВО РАН

обновляется 2 раза в сутки в 00:00 и 12:00 UTC. Данные накапливаются в виде текстовых файлов с информацией о высоте, давлении, влажности, скорости и направлении ветра. График распределения температуры воздуха по высоте генерируется автоматически (рис. 1.10).

За 25 лет, в течение которых KVERT проводит ежедневный оперативный мониторинг активности вулканов Камчатки и Северных Курил, создан архив данных, включающий разнородную информацию (сводные таблицы по визуальным и спутниковым наблюдениям, фотографии и видеоизображения вулканов, ежегодные отчеты об их активности и т. д.) о вулканах и их извержениях преимущественно в виде файлов.

В архиве KVERT содержатся, например, такие спутниковые данные:

- в формате jpg около 20 500 дневных изображений территории Камчатки и Северных Курил по данным спутника Terra (радиометр MODIS) в видимом и инфракрасном каналах, а также разности каналов 11–12 мкм, поступивших из ФГБУ Росгеолфонд;

- исходные цифровые снимки спутника NOAA (15, 16, 18, 19) (радиометр AVHRR), передававшиеся в KVERT по прямому Wi-Fi каналу с приемной спутниковой станции Алиса (Сканэкс) из ФГБУ «Камчатское УГМС». Снимки автоматически накапливались и архивировались на выделенном сервере. Объем данных составляет ~ 600 Гб (12 000 снимков).

В декабре 2015 г. в ИВиС ДВО РАН установлена станция приема спутниковых данных ДЗЗ «Унискан-36» (Сканэкс), позволяющая принимать и обрабатывать данные со спутников Terra и Aqua (радиометр MODIS), а также со спутников Suomi NPP и JPSS-1 (с 2018 г.) (радиометр VIIRS). Полностью автоматизированная система

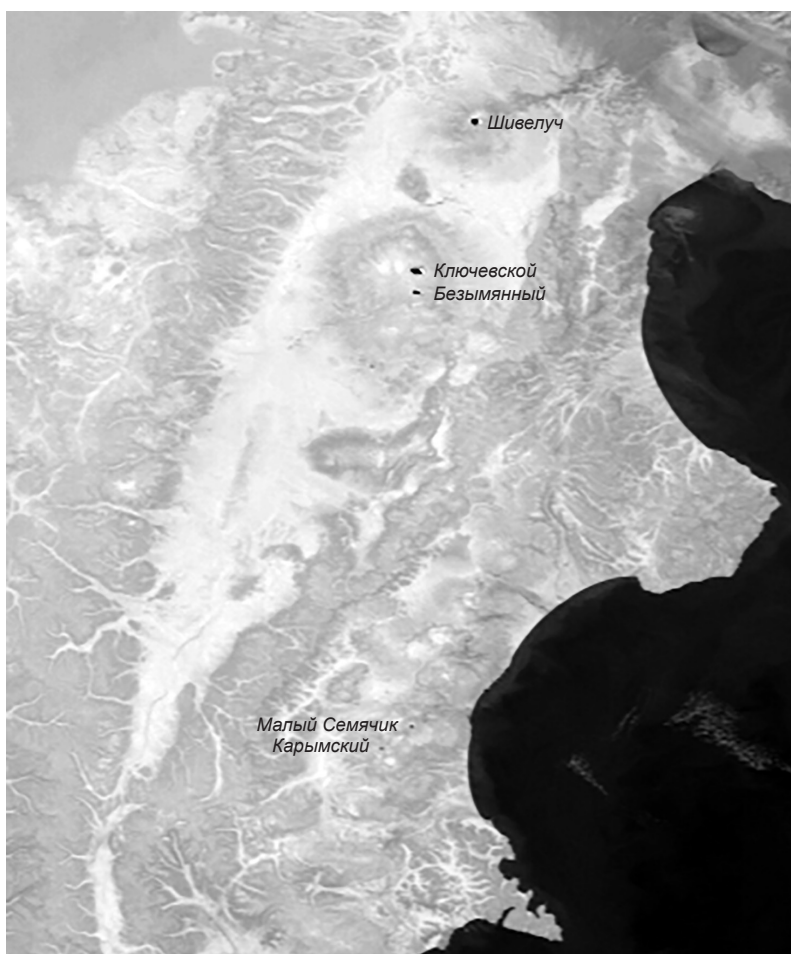


Рис. 1.9. Термальные аномалии в районах вулканов Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Малый Семячик и Карымский на спутниковом снимке NOAA-18 за 15:44 UTC 31 декабря 2009 г., данные предоставлены ФГБУ «Камчатское УГМС» по договору с ИВиС ДВО РАН

осуществляет в режиме реального времени прием, обработку и архивирование спутниковых данных. За сутки станция принимает от 10 до 14 спутниковых снимков на территорию Камчатки и Курильских островов. Объем архивных данных с декабря 2015 г. по октябрь 2018 г. составляет 16 ТБ (5 126 снимков).

Для оперативной визуализации активности вулканов в 2017 г. разработан алгоритм автоматического накопления изображений (в формате jpg) со спутника Himawari-8. Источником информации является сайт Regional and Mesoscale Meteorology Branch (<http://rammb.cira.colostate.edu/ramdis/online/himawari-8.asp>). Изображения в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах поступают в архив KVERT с периодичностью 10 мин, иногда – 2,5 мин. Объем данных по состоянию на октябрь 2018 г. составляет 357 Гб (381 500 изображений).

32540 UHPP Kamchatskij Observations at 00Z 04 Jul 2018

FRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1009.0	84	10.4	6.9	79	6.22	180	6	282.8	300.2	283.9
1000.0	157	9.0	5.6	79	5.73	180	8	282.1	298.2	283.1
987.0	265	8.0	4.7	80	5.45	173	8	282.2	297.5	283.1
971.0	400	7.3	4.1	80	5.32	165	8	282.9	297.9	283.8
925.0	799	5.4	2.4	81	4.94	110	6	284.8	298.9	285.7
923.0	817	5.3	2.2	81	4.90	110	6	284.9	298.9	285.8
852.0	1467	1.7	-3.1	70	3.58	75	17	287.7	298.2	288.4
850.0	1486	1.6	-3.3	70	3.54	75	19	287.8	298.2	288.4
832.0	1657	0.8	-4.5	68	3.32	80	29	288.8	298.6	289.3
755.0	2433	-2.7	-9.7	59	2.44	103	20	293.1	300.5	293.5
749.0	2497	-2.4	-9.1	60	2.57	105	19	294.1	302.0	294.5
733.0	2668	-1.5	-7.5	64	2.98	129	18	296.9	306.1	297.4
729.0	2712	-1.7	-7.7	64	2.95	135	17	297.1	306.2	297.6
700.0	3034	-3.1	-9.1	63	2.76	135	16	299.0	307.6	299.5
693.0	3113	-3.5	-9.5	63	2.70	140	14	299.4	307.9	299.9
683.0	3228	-4.1	-10.1	63	2.61	145	15	300.0	308.2	300.5
670.0	3380	-3.7	-9.7	63	2.75	152	16	302.1	310.8	302.6
656.0	3546	-5.7	-12.2	60	2.29	160	17	301.7	309.0	302.1
646.0	3666	-7.1	-14.1	57	2.00	157	17	301.4	307.9	301.8
593.0	4333	-7.9	-12.9	67	2.40	141	16	308.0	315.8	308.4
573.0	4596	-9.4	-14.8	65	2.13	135	16	309.2	316.3	309.6
500.0	5640	-15.3	-22.3	55	1.29	140	17	314.3	318.8	314.6
439.0	6606	-21.5	-28.5	53	0.84	149	19	318.4	321.4	318.5
400.0	7280	-27.5	-34.5	51	0.52	155	19	319.2	321.1	319.3
310.0	9052	-42.6	-50.5	42	0.12	165	12	322.2	322.7	322.2
300.0	9280	-44.5	-52.5	40	0.10	170	14	322.5	322.9	322.6
250.0	10480	-53.9	-61.9	37	0.04	180	23	325.8	326.0	325.8
244.0	10635	-56.1	-64.1	36	0.03	180	24	324.8	324.9	324.8
227.0	11092	-58.1	-66.1	35	0.02	180	25	328.5	328.6	328.5
224.0	11176	-58.5	-66.5	35	0.02	180	21	329.1	329.2	329.1
214.0	11466	-54.3	-63.3	32	0.04	185	13	340.0	340.1	340.0
213.0	11496	-54.3	-63.3	32	0.04	185	12	340.5	340.6	340.5
200.0	11900	-53.9	-62.9	32	0.04	165	10	347.2	347.4	347.3
175.0	12765	-50.9	-61.7	27	0.05	205	4	365.7	366.0	365.7
172.0	12877	-50.5	-61.5	26	0.06	196	4	368.2	368.4	368.2
164.0	13188	-50.4	-61.8	25	0.06	170	6	373.3	373.6	373.3
154.0	13598	-50.3	-62.1	23	0.06	200	6	380.2	380.6	380.3
150.0	13770	-50.3	-62.3	23	0.06	190	6	383.2	383.5	383.2
124.0	15014	-50.5	-63.9	19	0.06	115	6	404.3	404.6	404.3
109.0	15857	-50.6	-65.0	17	0.06	95	4	419.2	419.5	419.2
100.0	16420	-50.7	-65.7	15	0.06	115	8	429.5	429.8	429.5

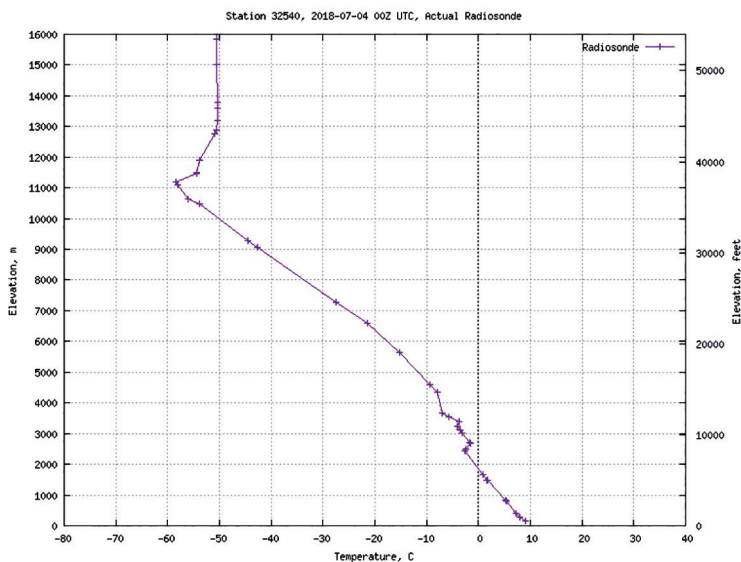


Рис. 1.10. Пример данных атмосферного профиля по радиозонду станции п. Ключи за 11 октября 2018 г.

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 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), Radarsat и др. (Carter et al., 2008; Lundgren, 2003; и др.). Это позволяет более точно оценивать геологический и экологический эффекты извержений вулканов – определять площади пеплопадов, отложений лавовых и пирокластических потоков и т. д.

К началу XXI в. 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 др. 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 (Гирина и др., 2017 г).

– выпуск оперативных сообщений VONA на основе спутниковых данных о параметрах пепловых шлейфов и прогнозе дальнейшего развития извержения, опасного для населения и авиации, публикация их в ИС KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/>) и в ИС «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (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» (Романова, Гирина, 2018).

2. Ретроспективный анализ активности вулканов Камчатки и Северных Курил с помощью спутниковых данных среднего и высокого разрешения:

– детальные исследования вулканогенных продуктов (тефры, лавовых и пирокластических потоков) после конкретного извержения вулкана и определение их параметров (структуры, протяженности, площади и объема отложений) для оценки геологического и экологического эффектов (например, Гирина и др., 2006, 2007а, 2017б; Carter et al., 2008);

– анализ изменения содержания в атмосфере и аэрозолях (дым, пепел, пыль) различных газов: O_3 , NO_2 , BrO, OClO, 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 для населения (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 объемы изверженных продуктов и т. д.) (Girina, 2013; Schneider et al., 2000) и др.

1.3.2. Сейсмический мониторинг вулканов

Наблюдения за сейсмичностью активных вулканов начались на Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в 1946 г. (Горельчик, 2001; Горшков, 1954). В 1962 г. в районе Северной группы вулканов работали три станции, вошедшие в создававшуюся тогда сеть региональных сейсмических станций Камчатки, одновременно с которой проводились работы по организации сбора, обработки и хранения сейсмологических данных (Гордеев и др., 2006; Горельчик, 2001). К 2017 г. в этом районе работает 15 радиотелеметрических станций с цифровой обработкой данных близко к реальному времени (Гордеев и др., 2006; <http://www.emsd.ru/rtss/stations>). Первые же четыре радиотелеметрические станции были установлены на вулканах Авачинско-Корякской группы в 1977 г., сейчас их насчитывается 7 (<http://www.emsd.ru/rtss/stations>). На вулканах Кизимен, Карымский, Мутновский, Горельий и Алайд стоит по одной станции, на других вулканах Камчатки и Северных Курил станций нет (Сенюков, 2006; <http://www.emsd.ru/rtss/stations>). В настоящее время сейсмический мониторинг 10 вулканов близко к реальному времени выполняется КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru>).

Непрерывное слежение за сейсмичностью Ключевской группы вулканов и оперативный анализ данных позволили П.И. Токареву (1966), опираясь на методику Т. Минаками (Minakami, 1960), выделить несколько типов характерных для вулканов Ключевской и Безымянный вулканических землетрясений, описать предвестники их извержений. Он разработал методику прогноза извержений по сейсмологическим данным, дал успешные краткосрочные прогнозы: Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) в 1975 г., бокового прорыва вулкана Ключевской в 1983 г., трех извержений вулкана Безымянный в 1959–1961 гг. (Токарев, 1966, 1976, 1988). П.И. Токарев первым начал создавать на Камчатке оперативную службу прогноза извержений вулканов на основе анализа сейсмических данных (Горельчик, 2001).

Кроме оперативного мониторинга, для понимания глубинных процессов научные исследования сейсмичности вулканов Северной группы Камчатки начал проводить Г.С. Горшков – им дано первое описание вулканического дрожания и разных типов вулканических и вулкано-тектонических землетрясений; впервые определено место и глубины магматического очага в районе Ключевской группы вулканов; предложенная им методика обнаружения магматических очагов вулканов по затуханию сейсмических волн от землетрясений получила мировое признание (Горельчик, 2001; Горшков, 1954, 1956). Под руководством В.И. Горельчик в 1970-х гг. началось создание каталога землетрясений Северной группы вулканов (Горельчик, 2001), который является в настоящее время источником данных для моделирования глубинного строения Ключевской группы вулканов Камчатки (Гонтовая, 2004, 2010; Кулаков и др., 2016; и др.).

1.3.3. Газовый мониторинг

Изучение вулканических газов и продуктов их реакций является важной проблемой вулканологии. Вулканические газы являются движущей силой извержения, они представляют большой интерес для выяснения геохимических процессов минералообразования, рудообразования, метаморфизма пород и т. д.

Изучение состава фумарольных газов вулканов Камчатки систематически начало проводиться с 1935 г. на Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсо-

на-Лессинга: регулярно исследовались газы, отобранные непосредственно на вершинах активных стратовулканов (Ключевской, Толбачик и др.), на только что образовавшихся моногенных конусах и их лавовых потоках (боковые прорывы вулкана Ключевской); экструзивных куполах вулканов Шивелуч и Безымянный и др. (Башарина, 1966). Кроме этого, после пеплопадов анализировались водные вытяжки из пеплов для изучения состава магматических газов извержения, а также его изменения по мере движения эруптивной тучи. Постепенно были отобраны и проанализированы газы из фумарол почти всех действующих вулканов Камчатки; накоплены многочисленные данные, включающие информацию по вулканическим газам активных вулканов и их отдельных извержений (Башарина, 1966; Меняйлов и др., 1984; Таран и др., 1991; и др.).

С развитием дистанционных методов исследований вулканогенных процессов в ИВиС ДВО РАН появились приборы ДООС (дифференциальная оптическая абсорбционная спектрометрия) для наземного дистанционного измерения диоксида серы (SO_2) (см. главу 3). Благодаря международным проектам и совещаниям, которые проводятся на Камчатке, в том числе совещанию Комиссии по химии вулканических газов (Commission on the Chemistry of Volcanic Gases, CCVG) – одной из комиссий Международной ассоциации вулканологии и химии земных недр (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth Interior, IAVCEI), большое количество современных данных о вулканических газах камчатских вулканов опубликовано учеными разных стран мира (Таран, 2011).

В настоящее время собственно мониторинг диоксида серы вулканического происхождения проводится спутниковыми методами. Например, создана Система оповещения о вулканическом пепле и SO_2 в рамках Службы поддержки авиации (Support Aviation Control Service (SACS) SO_2 and Ash Notification System, <http://sacs.aeronomie.be/>), которая с помощью прибора GOME-2 (MetOp-B) отслеживает повышенные содержания диоксида серы на всей нашей планете и оперативно оповещает об этом пользователей.

1.3.4. Акустический мониторинг

С середины XX в. на Камчатке начал развиваться акустический мониторинг вулканов. Например, события крупнейших извержений Безымянного (30 марта 1956 г.) и Шивелуча (12 ноября 1964 г.) были записаны на лентах микробарографов, это позволило оценить энергию главных взрывов извержений (Горшков, Богоявленская, 1965; Горшков, Дубик, 1969). В настоящее время для регистрации волновых возмущений атмосферы, сопровождающих взрывчатые извержения вулканов, применяют инфразвуковые станции, состоящие из нескольких микробарографов (инфразвуковых микрофонов), оснащенных акустическими фильтрами. На Камчатке такая станция (IS44), входящая в международную сеть станций, организованную в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, расположена в п. Начики. КФ ФИЦ ЕГС РАН поддерживает работу пункта регистрации волновых возмущений атмосферы в п. Паратунка (<http://www.emsd.ru/larm/research>). При благоприятных условиях состояния атмосферы (отсутствие циклона) акустический мониторинг позволяет определить вулкан, на котором происходит сильное взрывчатое извержение, иногда также энергетические характеристики этого извержения.

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕПЛОВЫХ ОБЛАКОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ

Анализ распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов является сложной междисциплинарной задачей, для решения которой используются различные виды инструментальных наблюдений, методы и технологии. В связи с особенностями вулканов Камчатки (удаленность большинства из них от населенных пунктов, отсутствие или низкая плотность специализированных наземных сетей наблюдений за ними и др.) наибольшую часть информации о них можно получить только дистанционными методами. Кроме этого, широкое распространение в мире получили численные модели, которые, используя прогностические метеорологические данные, позволяют прогнозировать распространение пепловых облаков и шлейфов от вулканов, обеспечивая безопасность авиаполетов.

2.1. Модели распространения пепловых облаков

Любая численная модель распространения пепла в атмосфере должна содержать описание пепловой эксплозии, определяющее ее параметры (высота облака, массовый расход вещества, распределение частиц пепла по размерам, вертикальное распределение массы в облаке и т. д.), а также описание процессов переноса и диффузии примеси в пространстве. Дополнительно могут учитываться сухое и влажное осаждение пепла, агрегирование пепловых частиц, химические процессы в пепловом облаке, например, образование аэрозолей. Источником фактических или прогнозных метеорологических данных (скорость и направление ветра, температура воздуха и т. д.) является информация, полученная с использованием численных моделей прогноза погоды и данных инструментальных наблюдений.

В консультационных центрах по вулканическому пеплу (Volcanic Ash Advisory Centers, VAAC), основанных Международной организацией гражданской авиации (International Civil Aviation Organization, ICAO) для повышения безопасности авиаперевозок, применяются модели прогноза распространения пепловых облаков, учитывающие вертикальный и горизонтальный перенос пепла, его диффузию и сухое осаждение (табл. 2.1). Большинство из них включает также возможность моделирования влажного осаждения. Учет химических процессов, происходящих

в облаке, а также агрегации частиц является экспериментальным и поддерживается лишь некоторыми из них.

По описанию процесса распространения пепла в атмосфере модели подразделяются на лагранжевы и эйлеровы (Белихов и др., 2013).

Таблица 2.1. Модели распространения пепла (по Folch (2012), с изменениями)

	CANERM	FALL3D	HYSPLIT	JMA-GATM	MOCAGE	NAME	PUFF ¹
Подход ²	Э	Э	Г	Л	Э	Л	Л
Покрытие ³	Л/Р/Г	Л/Р	Л/Р/Г	Г	Г	Л/Р/Г	Л/Р/Г
Учитываемые физические процессы							
Перенос	вертикальный и горизонтальный						
Диффузия	вертикальная и горизонтальная						
Осаждение ⁴	С/В	С/В	С/В	С/В	С/В	С/В	С
Агрегация		+					
Учет формы частиц		+	+				
Учет газовой составляющей		+	+		+	+	
Химические процессы			+			+	
Модель источника							
Распределение массы ⁵	Л/Н/Э	ТИ/ С/Г/ ВРТ	ТИ/Л/ Г/П/ЛН	ТИ/Л/ Г/П/ЛН	ТИ/Л	ТИ/Л	Л/ Г/П

Примечание.

¹ Исходный код программной реализации модели в свободном доступе.

² Л – лагранжевы; Э – эйлеровы; Г – гибридный.

³ Л – локальное; Р – региональное; Г – глобальное.

⁴ С – сухое; В – влажное.

⁵ ТИ – точечный источник; Л – линейное; Н – нормальное; Э – эмпирическое; П – Пуассона; С – Судзуки; Г – грибообразное; ВРТ – Buoyant Plume Theory; ЛН – логнормальное.

Любая лагранжева модель основана на том, что частицы пепла перемещаются в атмосфере вдоль траекторий, определяемых полем ветра и эффектами турбулентности. Пепловое облако при этом представляется в виде некоторой совокупности модельных частиц, каждая из которых имеет свое индивидуальное положение в пространстве, координаты которого рассчитываются по итерационной формуле на каждом временном шаге моделирования. Преимуществами такого класса моделей является высокая скорость работы в оперативном режиме, когда требуется получить качественное представление о траектории движения облака. При необходимости определения количественных характеристик облака пепла (концентрация его частиц в некоторой точке облака, объем пепла, выпавшего на поверхность, и т. д.) требуется значительное увеличение числа модельных частиц, что приводит к возрастанию вычислительной сложности решаемой задачи (Scollo

et al., 2011). В связи с этим такие модели имеют ограниченную применимость при моделировании распространения пепла в глобальных масштабах. К лагранжевым моделям относятся, например, JMA-GATM (Japan Meteorological Agency – Global Atmospheric Transport Model) (Iwasaki et al., 1998), NAME (Ryall, Maryon, 1998) и PUFF (Searcy et al., 1998) (табл. 2.1).

В отличие от лагранжевых эйлеровы модели основываются на уравнении неразрывности для некоторого класса загрязняющего вещества, которое численно решается различными сеточными методами. Их основной областью применения является определение количественных характеристик облака пепла, в особенности при его перемещении на большие расстояния от вулкана. К этому классу относятся, например, модели CANERM (Canadian Emergency Response Model) (D'Amours, 1998), FALL3D (Costa et al., 2006) и MOCAGE (Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle) (Sič et al., 2015) (табл. 2.1).

Попыткой совмещения сильных сторон рассмотренных моделей является применение гибридного подхода: лагранжева на небольших расстояниях от вулкана и эйлерова на удалении от него. Примером такой модели является HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (Stein et al., 2015) (табл. 2.1).

Для изучения отдельных эксплозивных событий вулканов Камчатки и Курил и прогноза распространения их пепловых шлейфов была выбрана модель PUFF, имеющая успешный опыт длительного применения для изучения эксплозивных извержений вулканов в различных районах мира, открытую программную реализацию модели, источники информации по извержениям и необходимые метеорологические данные. Модель PUFF является основой созданной компьютерной системы (см. главу 5) для моделирования распространения пепловых облаков при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Курил.

2.2. Источники метеорологических данных

В качестве начальной информации при прогнозировании распространения пепла в атмосфере используются фактические и прогностические метеорологические данные, получаемые, в том числе, с использованием численных моделей прогноза погоды. Их эксплуатация является непростой научно-технической задачей не только в связи с высокой вычислительной сложностью, но и с необходимостью выстраивания системы сбора и усвоения большого объема первичных данных о состоянии окружающей среды. В связи с этим большинство моделей распространения пепла, работающих в оперативном режиме, используют прогностическую метеорологическую продукцию, полученную в крупных специализированных мировых центрах. К ним относятся: Национальная метеорологическая служба США (National Weather Service, NWS), Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), Японское метеорологическое агентство (Japan Meteorological Agency, JMA) и т. д. Чаще всего в мире используется прогностическая продукция модели Global Forecast System (GFS), разработанной

в Национальных центрах прогнозирования изменений окружающей среды Национального управления океанографии и атмосферы (National Centers for Environmental Prediction (NCEP) NOAA), что объясняется высоким качеством прогнозов и их доступностью через серверы NCEP (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>).

Метеоданные модели GFS имеют глобальное покрытие с пространственным разрешением 0,25 градуса по широте и долготе. Расчеты производятся четыре раза в сутки (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC) с заблаговременностью 384 ч и с дискретностью в 3 и 12 ч. Выходная продукция распространяется в GRIB коде второй редакции (grib2) и включает в себя (для одного расчета модели) файлы с данными анализа (прогноза с нулевой заблаговременностью) и с прогнозом.

При проведении моделирования исторических эксплозивных событий можно использовать архивы продукции модели GFS Американского национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR), доступные вплоть до июля 1976 г. (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds082.0/>) (рис. 2.1). Однако чаще всего источником данных при проведении таких исследований являются проекты реанализа. В них осуществляется сбор и обработка доступных данных, полученных при первичных инструментальных наблюдениях (с метеозондов, наземных станций, искусственных спутников Земли и т. д.), необходимых для построения глобальных однородных климатических архивов. Обработка таких данных проводится при помощи пространственной интерполяции или модельного реанализа.

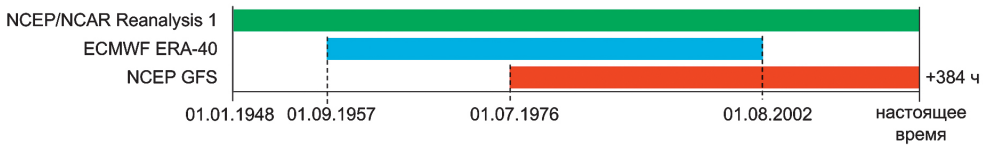


Рис. 2.1. Диаграмма доступности метеоданных

По охватываемому временному периоду все подобные проекты можно разделить на три основных группы. К первой группе относятся проекты, работающие с метеорологическими данными, покрывающими 20-е столетие: ECMWF ERA-20C (Poli et al., 2016) и NOAA 20th Century Reanalysis (Compo et al., 2011). В их основе лежит определенная совокупность первичных данных о приповерхностных атмосферном давлении, температуре воздуха и скорости ветра; при этом первичные данные о верхних слоях атмосферы не учитываются. Вторую группу представляют проекты, временное покрытие которых начинается с конца 40-х – середины 50-х гг. XX в. Это время характеризуется началом повсеместного проведения регулярных наблюдений при помощи радиозондов, позволяющих получать информацию о состоянии атмосферы на различных высотах. Эти данные стали основой метеорологической информации для проектов ECMWF ERA-40 (Uppala et al., 2005), NCEP/NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al., 1996) и JMA JRA-55 (Kobayashi et al., 2015). Дополнительным источником начальных данных также являются спутниковые дан-

ные, появившиеся позднее. Третья группа проектов покрывает временной период, начинающийся с конца 70-х начала 80-х гг. Они характеризуются интенсивным использованием данных, получаемых с искусственных спутников Земли. В большинстве случаев результатом выполнения проектов реанализа третьей группы являются метеорологические данные высокого пространственного разрешения, содержащие широкий набор метеорологических полей. К указанным проектам относятся: ECMWF ERA-Interim (Berrisford et al., 2011), JMA JRA-25 (Onogi et al., 2007) и NCEP Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002).

В связи с вышесказанным, наиболее подходящими для моделирования распространения пепловых облаков при исследовании исторических эксплозивных извержений вулканов, происходивших до 1976 г., являются архивы метеоданных проектов реанализа второй группы. В них, в отличие от проектов первой группы, учитываются начальные данные о верхних слоях атмосферы, необходимые для повышения точности описания происходящих в них процессов и, соответственно, точности моделирования распространения в них пепловых облаков. Кроме того, данные указанных проектов включают длительные временные интервалы, что лучше подходит для реанализа исторических извержений. Из проектов этой группы чаще всего используются NCEP/NCAR Reanalysis 1 и ECMWF ERA-40.

Набор NCEP/NCAR Reanalysis 1 содержит метеорологические данные, покрывающие временной период с 1 января 1948 г. по настоящее время (рис. 2.1). Он получен в рамках совместного проекта NCEP и NCAR. Метеоданные имеют глобальное покрытие с пространственным разрешением в $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ и 17 уровнями давления (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 мбар). Шаг данных по времени составляет 6 ч. Результаты реанализа, относящиеся к периоду до 1977 г., получены без использования спутниковой информации и данных дрейфующих буев по программе IABP.

В рамках набора ECMWF ERA-40 доступны метеорологические данные с сентября 1957 г. по август 2002 г. (рис. 2.1). Они имеют глобальное покрытие с пространственным разрешением в $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ и 23 уровнями давления. Шаг данных по времени составляет 6 ч. Данные проекта ERA-40 имеют более чем в два раза лучшее горизонтальное разрешение и повышенное вертикальное разрешение по сравнению с данными проекта NCEP/NCAR Reanalysis 1, однако архивы результатов последнего покрывают более длительный временной период.

Таким образом, для оперативного прогнозирования распространения пепловых облаков необходимо использовать прогнозные метеорологические данные модели GFS, а при моделировании исторических событий – метеорологические данные проекта ERA-40 или NCEP/NCAR Reanalysis 1, если изучаемое событие произошло до 1957 г.

2.3. Модель PUFF

В основе модели PUFF, предложенной Н.Л. Tanaka (1994), лежит трехмерное лагранжево описание дисперсии загрязняющего вещества. Рассматриваемая модель характеризуется относительно небольшим набором начальных параметров

(максимальная и минимальная высота облака пепла, дата и время начала извержения) и низкими требованиями к вычислительным ресурсам, что позволяет использовать ее при оперативном прогнозировании распространения пепла на основе информации об эксплозивных событиях, содержащихся в сообщениях VONA KVERT.

На основе начальных параметров облака модель PUFF инициализирует набор модельных частиц, дальнейшее перемещение которых вычисляется по итерационной формуле (1).

$$R_i(t + \Delta t) = R_i(t) + W\Delta t + Z\Delta t + S_i\Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где N – число частиц; $R_i(t)$ – вектор положения частицы i в момент времени t ; Δt – шаг по времени; W – локальная скорость ветра; Z – вектор турбулентной диффузии; S_i – вектор терминальной скорости частицы i , зависящий от её размера. Компонентами вектора турбулентной диффузии Z являются три нормально распределенных случайных величины (z_h, z_h, z_v) с нулевым матожиданием и среднеквадратическими отклонениями (c_h, c_h, c_v), задающие скорость турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях. Значения c_h и c_v определяются по следующим формулам:

$$c_h = \sqrt{2K_h/\Delta t}, \quad (2)$$

$$c_v = \sqrt{2K_v/\Delta t}, \quad (3)$$

где K_h и K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно.

Скорость осаждения частиц под действием гравитации задается вектором $S_i = (0, 0, s_i)$, компонента s_i которого представляет собой терминальную скорость частицы i , вычисляемую по закону Стокса:

$$s_i = \frac{2\rho g d_i^2}{9\eta}, \quad (4)$$

где d_i – размер частицы i ; ρ – плотность породы, из которой состоят частицы; g – ускорение свободного падения; η – динамическая вязкость воздуха.

2.4. Модификация программной реализации модели PUFF

Модель PUFF имеет программную реализацию в виде свободно распространяемого по лицензии GNU GPL v2.0 пакета компьютерных программ Puff-UAF (Peterson, 2003), разработанного в Университете Аляски в г. Фэрбенкс. Программное обеспечение включает следующие исполняемые файлы: puff, ashdump, ashgmt и ashxp. Программа puff представляет собой реализацию модели PUFF и применяется для моделирования распространения пепловых облаков от вулканов. Утилита ashdump позволяет просматривать результаты моделирования в виде текстовой

информации, а утилиты `ashgmt` и `ashxp` используются для их визуализации. Концептуальная схема работы Puff-UAF представлена на рис. 2.2.

Исходными данными для расчетов в `puff` являются файлы с метеоданными в формате NetCDF, а также опции программы (пути к входным файлам, режимы моделирования, уровень подробности выводимых сообщений и т. д.) и параметры исследуемого события (положение или название вулкана, время и длительность извержения, начальная высота пеплового облака и т. д.). Результатом работы программы является набор NetCDF файлов, в которых содержится информация о положении, размере и возрасте пепловых частиц, либо о концентрации пепла.



Рис. 2.2. Концептуальная схема работы пакета программ Puff-UAF

В качестве исходных метеорологических данных для компьютерных расчетов используются поля скорости ветра (u и v компоненты) на наборе изобарических поверхностей, покрывающие область моделирования. Также могут применяться поля температуры на тех же поверхностях и данные о геопотенциальной высоте. Эта информация передается в программу в виде NetCDF файла с четырехмерной структурой (`time`, `level`, `latitude`, `longitude`), который может содержать как фактические, так и прогностические данные, получаемые от различных численных моделей прогноза погоды. Они распространяются в формате GRIB и требуют предварительной подготовки перед использованием.

Рекомендуемые разработчиками Puff-UAF программные решения и методы подготовки метеорологических данных рассчитаны на работу с файлами формата GRIB первой редакции (`grib`) (Peterson, 2003). Однако в настоящее время прогностическая продукция большинства моделей прогноза погоды распространяется в формате GRIB второй редакции (`grib2`), поэтому загружаемые метеоданные сначала нужно преобразовать из формата `grib2` в формат `grib`, что связано с выполнением дополнительных технических операций, приводящих к увеличению общего времени подготовки входных данных, а также к значительному перерасходу дискового пространства. Переход на использование современных средств (`wgrib2`; <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2/>), поддерживающих прямое преобразование данных из формата `grib2`, выявил следующие проблемы: 1) в некоторых случаях результаты моделирования в `puff` оказывались некорректными – подготовленными с использованием лишь части исходных метеоданных; 2) невозможность использования содержащихся в таких файлах данных о геопотенциальной высоте. Для решения этих проблем потребовалось внести изменения в исходный код программы `puff`, связанный с работой с NetCDF файлами (Malkovsky et al., 2018).

Работа модифицированной версии Puff-UAF показана на примере эксплозивного события, произошедшего на вулкане Шивелуч в 22:50 UTC 3 марта 2015 г. Извер-

жение продолжалось 80 мин и сопровождалось подъемом пепла на 10 км н.у.м. Для определения его характеристик были использованы сообщение 2015/73 Токио VAAC (http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/TextData/2015/20150303_SHEV_0073_Text.html) и информация КФ ФИЦ ЕГС РАН (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/arhiv/2015/Mar/03_Mar.htm). Входными метеоданными при моделировании этого события служила прогностическая продукция модели GFS от 18:00 UTC 3 марта 2015 г. (сетка – 0,5°; u, v компоненты ветра, T, Z на 26 изобарических поверхностях) (Malkovsky et al., 2018). Используемый NetCDF файл, подготовленный с применением утилиты wgrib2, содержал записи с заблаговременностью от 3 до 24 ч и дискретностью 3 ч. Результаты моделирования распространения пеплового облака сравнивались со спутниковыми данными за 4 марта 2015 г. (NOAA-18, 05:03 UTC) из архива ИС VolSatView (рис. 2.3).

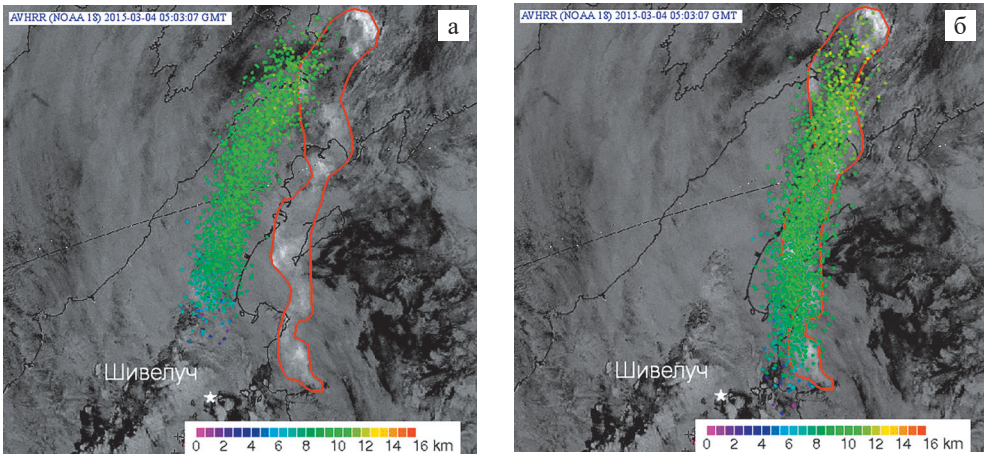


Рис. 2.3. Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа от вулкана Шивелуч 4 марта 2015 г., полученные с входными файлами от утилиты wgrib2 версии ruff: а) оригинальной; б) модифицированной. Пепловое облако на спутниковом снимке показано контуром. Данные из ИС VolSatView

Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа от вулкана Шивелуч 4 марта 2015 г., выполненные оригинальной и модифицированной версиями утилиты ruff с использованием входного NetCDF файла от утилиты wgrib2, а также последующие эксперименты показывают, что модификация утилиты ruff пакета Puff-UAF выполнена верно.

2.5. Примеры использования разработанных методов

Многолетнее применение модели PUFF показало, что она вполне применима для кратко – и среднесрочных прогнозов распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки и Курил. Кроме этого, была исследована возможность восстановления с помощью численного моделирования некоторых параметров эксплозивных извержений вулканов.

Для многих труднодоступных вулканов Камчатки и Курил иногда невозможно определить даже базовые характеристики извержений, такие, как время начала эксплозивного события, высота пеплового облака, продолжительность извержения и др., в связи с отсутствием в их районах средств инструментальных наблюдений. С помощью сопоставления спутниковых данных и результатов моделирования распространения пеплового облака можно уточнить или даже частично восстановить характеристики извержения. Рассмотрим эксплозивное событие на вулкане Жупановский 12 февраля 2016 г. Сравнивая результаты моделирования, выполненного для различного времени начала извержения, с состоянием пеплового облака на спутниковых снимках, можно подобрать время (около 20 часов UTC 12 февраля 2016 г.), при котором будет наблюдаться их наилучшее соответствие (рис. 2.4). Следует отметить, что при таких начальных условиях моделирования наблюдается наиболее полное совпадение не только основной области, в которой расположено пепловое облако в момент сравнения (24:00 UTC 12 февраля 2016 г.), но и его форма, а также тенденция распространения. При моделировании с более ранним временем начала события модельное облако смещено на юг, а с более поздним – на север по сравнению с пепловым облаком на спутниковом снимке.

Восстановление или уточнение параметров эксплозивных событий на основе совместного анализа данных дистанционного зондирования и численного моделирования широко используется учеными и признается эффективным – позволяет получить дополнительную информацию об извержениях (Aloisi et al., 2002; Steensen et al., 2013; и др.). Результаты проведенных работ, связанные с апробацией численных моделей и созданием модифицированной версии Puff-UAF, легли в основу компьютерной системы моделирования траекторий движения пепловых облаков, разработанной в составе АИС «Сигнал» (см. главу 5), и создания инструментов для совместного анализа результатов численного моделирования (модельных облаков) и пепловых облаков, выделяемых на спутниковых снимках в ИС VolSatView (см. главу 6).

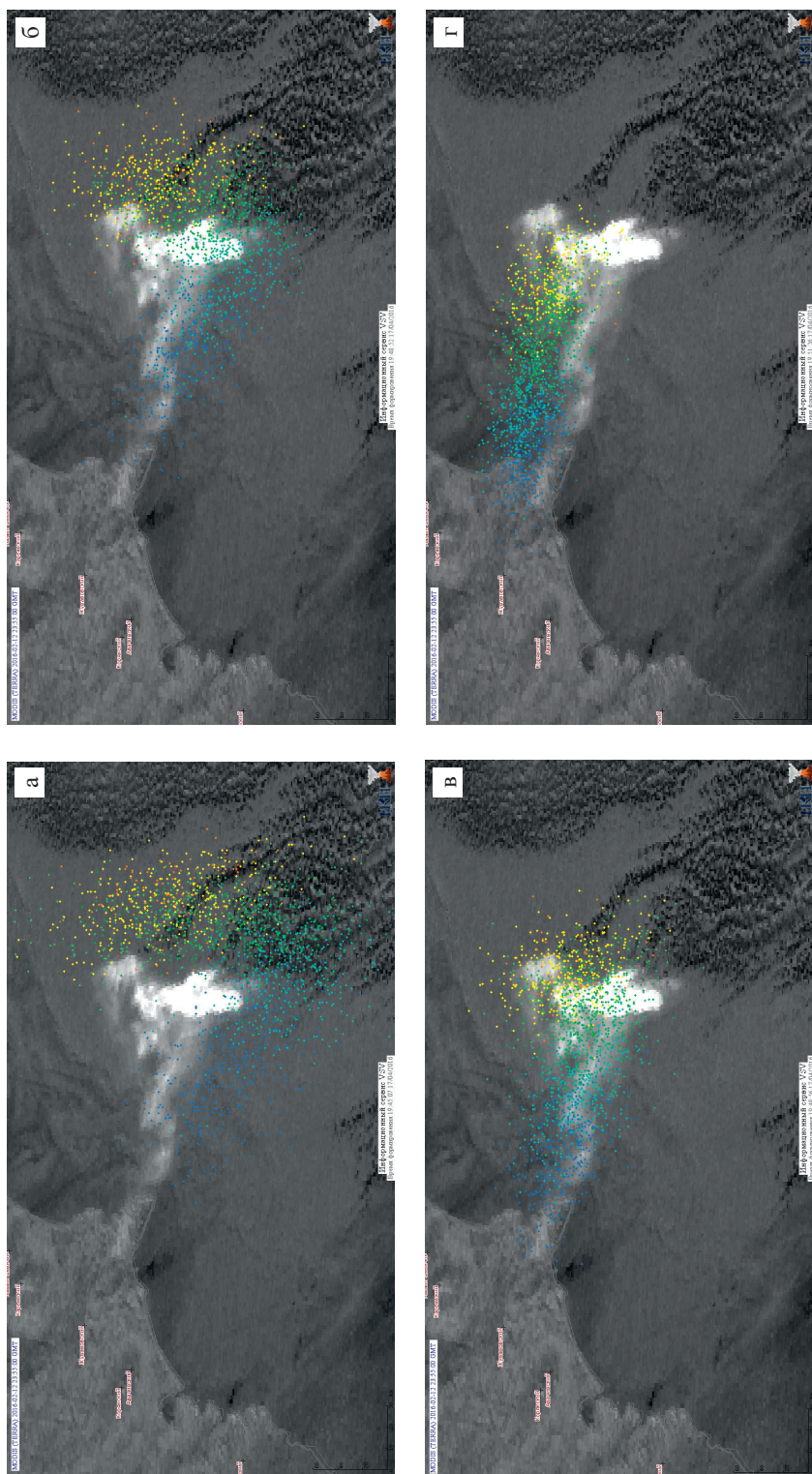


Рис. 2.4. Получение оптимального совпадения результатов численного моделирования и спутниковых данных для определения времени начала эксплозивного события на вулкане Жупановский 12 февраля 2016 г., предполагаемое время начала выброса пепла в 18:00 UTC: а) в 23:55 UTC; б) в 19:00 UTC; в) в 20:00 UTC; г) в 21:00 UTC. Черно-белое изображение – разница каналов 11–12 мкм по данным прибора MODIS (спутник Terra); белым цветом выражено пепловое облако; точками – результаты моделирования пеплового облака; цвет частиц пепла соответствует высоте, на которой они находятся, – меняется от синего (1,5 км н.у.м.) к желтому (10 км н.у.м.).

Глава 3. МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И ИЗУЧЕНИЯ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ

3.1. Основные задачи спутникового мониторинга вулканической активности

С развитием космических исследований для мониторинга действующих вулканов стали активно применяться и развиваться спутниковые технологии, преимущество которых очевидно:

– можно наблюдать за активностью сразу всех действующих вулканов региона, в том числе расположенных далеко от населенных пунктов;

– можно быстро оценивать опасность извергающихся вулканов: по каким склонам происходят излияния лавовых потоков, насколько они и связанные с ними грязевые потоки будут угрожать населенным пунктам; в каких направлениях и с какой скоростью перемещаются пепловые шлейфы, в каких городах и поселках возможны пеплопады и т. д.

Для мониторинга действующих вулканов в разных странах мира используются данные спутников NOAA (AVHRR), геостационарных спутников GOES и GMS (Geostationary Meteorological Satellite), Terra и Aqua с датчиками MODIS, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), Himawari-8 с датчиком AHI (Advanced Himawari Imager) и др. (Гирина, Гордеев, 2007; Гирина и др., 2017а; Carter et al., 2008; Girina, 2012; Miller, Casadevall, 2000; Schneider et al., 2000; и др.). Обновление информации спутника Himawari-8 происходит каждые 10 мин (см. главы 1, 6 и 7).

Ежедневный оперативный спутниковый мониторинг камчатских вулканов ученые KVERT проводят с 2002 г. (Гирина, Гордеев, 2007; Girina, 2012; Gordeev, Girina, 2014; Igarashi et al., 2017; Neal et al., 2009). Необходимость его обусловлена следующими причинами: расположение многих активных вулканов далеко от населенных пунктов; отсутствие сейсмических станций на 20 из 30 активных вулканов; необходимость получения ежедневной оперативной информации о состоянии вулканов и авиатрасс, пролегающих в Курило-Камчатском регионе, и т. д.

Основные задачи оперативного спутникового мониторинга вулканов (обработка спутниковых данных по мере их поступления) следующие:

- обнаружение пепловых облаков и шлейфов, определение их параметров (длина, площадь и азимут распространения);
- детектирование термальных аномалий в районах вулканов, определение их параметров (размер, температура аномалии и фона);
- анализ динамики активности вулканов, на которых обнаружены термальные аномалии, в течение эффузивной или межэруптивной фазы деятельности;
- выпуск оперативных сообщений VONA: об обнаружении в районах вулканов пепловых шлейфов с указанием их параметров; о прогнозе опасности эксплозивного извержения для населения и авиации, созданном на основе анализа исторической и оперативной активности вулкана.

Для верной оценки опасности любого вулкана необходимо не только знать динамику его активности в прошлом, но и изучать его отдельные извержения (состав продуктов, геологический эффект и т. д.) для лучшего понимания тенденции развития вулкана. Благодаря современным спутниковым данным можно выполнять как оперативное, так и ретроспективное детальное исследование изверженных продуктов и определение их параметров, например, изменение площадей, объемов и направления перемещения пепловых шлейфов и лавовых потоков в течение извержений; изменение площадей и объемов отложений пирокластических потоков вулкана, а также изменение направления перемещения таких потоков во время различных извержений и т. д.

Анализ динамики активности каждого действующего вулкана с течением времени (частота эксплозивных извержений; изменение количества энергии, поступающей на поверхность земли при извержениях, косвенным показателем которой являются объемы изверженных продуктов) позволяет более верно оценивать и прогнозировать их будущую опасность для населения.

3.2. Методы и подходы обработки и анализа спутниковых данных для мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил

3.2.1. Термальные аномалии

При приближении к поверхности земли высокотемпературного (900–1200 °С) магматического вещества в атмосферу поступает все более увеличивающийся поток тепла, который на спутниковых снимках отмечается как термальная аномалия. Размер и температура аномалии линейно связаны с количеством ювенильного вещества, поступающего на поверхность земли в момент ее регистрации на спутниковом снимке. Появление яркой термальной аномалии в районе того или иного вулкана свидетельствует о подготовке или скором начале его эксплозивного извержения. Степень опасности такого извержения для населения и окружающей среды напрямую зависит от состава магматического вещества, извергаемого конкретным вулканом.

Термальные аномалии в районах вулканов имеют различную природу, связанную с их активностью. Во время извержений вулканов (выбросы в атмосферу раскаленных вулканических продуктов в течение эксплозивной активности; образование пирокластических потоков; излияния лавовых потоков; выжимание экструзий и т. д.)

яркостная температура аномалий достигает максимальных величин (близких к пределу измерения сенсоров); в межэруптивную фазу активности вулканов (парогазовые эмиссии из фумарол или сольфатар) термальные аномалии или не фиксируются, или их яркостные температуры близки к температурам фона (Dehn et al., 2000; Glaze et al., 1989; Harris et al., 2000; Oppenheimer et al., 1997; Schneider et al., 2000; Wright et al., 2002; и др.). Появление термальной аномалии в районе любого вулкана, и тем более рост ее температуры и размера, указывает, как правило, на повышение активности вулкана, которое может перерасти в опасное для населения эксплозивное извержение.

Одними из первых работ, в которых изменение температуры и размера термальной аномалии в районе вулкана рассматривались в качестве оперативного предвестника сильного эксплозивного извержения, являются статьи о наблюдении с помощью спутниковых данных за развитием извержений вулкана Безымянный в 1997 и 1998 гг. (Dehn et al., 2000; Schneider et al., 2000). Благодаря наблюдениям за динамикой изменения термальной аномалии в районе вулкана в 2001–2017 гг. учеными KVERT были предсказаны 12 эксплозивных извержений Безымянного (16.12.2001, 25.12.2002, 11.01.2005, 09.05.2006, 11.05.2007, 14–15.10.2007, 19.08.2008, 31.05.2010, 08.03.2012, 01.09.2012, 16.07.2017, 20.12.2017) – предупреждения о сильных эксплозивных извержениях вулкана были опубликованы на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) за 0,5–24 ч до их начала (Гирина и др., 2018б; Girina, 2013; Gordeev, Girina, 2014). Накопленный за два десятилетия опыт американских и российских ученых по спутниковому мониторингу активных вулканов Камчатки в рамках работы KVERT подтвердил эффективность такого предвестника не только для Безымянного, но и для вулканов с другим составом изверженных вулканических продуктов (Гирина и др., 2017а; Girina, 2012; и др.).

Одной из важных задач оперативного мониторинга активности вулканов является автоматическое определение термальных аномалий. Благодаря появлению в ИС VolSatView данных со спутника Himawari-8 и инструментов для работы с ними (см. главы 6 и 7) ежедневный анализ временных рядов температуры аномалии в районе каждого вулкана позволяет оперативно отслеживать начало и рост его активности и заблаговременно (десятки минут – часы) оповещать о готовящемся извержении заинтересованных пользователей (Гирина и др., 2018б).

3.2.1.1. Алгоритм автоматического анализа спутниковых снимков MODIS

Для оперативного мониторинга вулканов – обнаружения и количественной оценки их активности в настоящее время успешно используются данные инструмента MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua (Coppola et al., 2013; Wright et al., 2002). Созданный алгоритм глобального мониторинга вулканической активности – MODVOLC (Flynn et al., 2002; Wright et al., 2002, 2004) – основан на поиске высокотемпературных аномалий в 22 или 21 (3,95 мкм) и 32 (12 мкм) каналах на снимках MODIS и нормировании значений энергетической яркости каждого пикселя в указанных каналах (Wright et al., 2002, 2004).

Нормализованный тепловой индекс (НТИ) определяется как:

$$\text{НТИ} = (\text{канал 22} - \text{канал 32}) / (\text{канал 22} + \text{канал 32}) \quad (1)$$

Величина НТИ, превышающая пороговое значение $-0,8$, считается «горячей точкой». Как правило, такие значения НТИ характерны для поверхностных проявлений вулканизма: изливающихся лавовых потоков, стромболианской активности, выжимающихся экструзий.

Пример соотношения значений НТИ и температуры пикселей для вулкана Ключевской во время извержения 2016 г. показан на рис. 3.1.

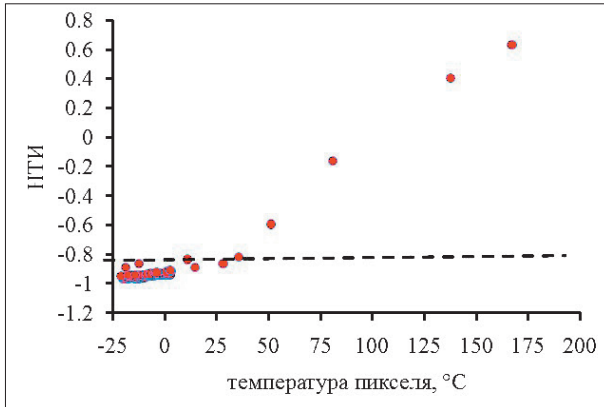


Рис. 3.1. Соотношение нормализованного теплового индекса и температуры ($^{\circ}\text{C}$) пикселя (22 канал MODIS) для изливающегося лавового потока вулкана Ключевской 25 сентября 2016 г. Пунктирной линией показано пороговое значение НТИ ($-0,8$)

В ИВиС ДВО РАН в 2015 г. установлена приемная станция УниСкан-36 (Сканэкс), которая позволяет в режиме реального времени принимать и обрабатывать спутниковые данные MODIS (до 4–8 снимков в сутки). Для поступающих данных реализован алгоритм автоматического определения НТИ для вулканов Камчатки и Курил. В течение 20–30 мин происходит приём исходных данных, их первичная автоматическая обработка и тематический анализ, определение НТИ. Кроме этого, представленный алгоритм позволяет

определять мощность вулканического излучения (VRP – Volcanic Radiative Power).

Для высокотемпературных пикселей (со значением НТИ $> -0,8$) определяется тепловой поток согласно методу (Wooster et al., 2003):

$$\text{VRP} = 18,9 \times A_{\text{pix}} \times (L_{4\text{alert}} - L_{4\text{bk}}) \quad (2)$$

где A_{pix} – площадь пикселя, 1,89 – постоянная, $L_{4\text{alert}}$ – энергетическая яркость в спектральном диапазоне 4 мкм (3,95 мкм для данных MODIS) высокотемпературного пикселя с НТИ $> -0,8$, $L_{4\text{bk}}$ – энергетическая яркость для пикселя с фоновым значением.

Согласно (Wooster et al., 2003), интегрированное значение температур для формулы (2) составляет 600–1500 К. Соответственно, VRP, например, не всегда коррелируется с тепловым потоком, излучаемым всей поверхностью активного лавового покрова, но соответствует меньшим по площади, более горячим свежим порциям лавы.

Основной функционал алгоритма включает:

- 1) автоматический поиск термальных аномалий на основе НТИ по каждому действующему вулкану;
- 2) определение мощности излучения каждого пикселя термальных аномалий, имеющих НТИ $> -0,8$;
- 3) оценка мгновенного расхода лавы по мощности излучения пикселей согласно методу Coppola et al. (2013).

После выполненных расчетов данные по зафиксированным максимальной, минимальной и фоновой температурам, количеству пикселей термальных аномалий по каждому вулкану поступают в базу данных.

3.2.1.2. Результаты автоматической обработки спутниковых данных с помощью алгоритма MODVOLC

Вулкан Ключевской, извержение 2016 г. Применение алгоритма позволило определить начало стромболианской фазы извержения вулкана – 3 апреля 2016 г. Для периода 3–26 апреля характерна средняя мощность теплового излучения 30–50 МВт. По спутниковым данным, 25–27 апреля было зафиксировано резкое увеличение мощности излучения до 500 МВт (рис. 3.2), и, как известно, 26 апреля произошел прорыв в привершинной части Апахончичского желоба на восточном склоне вулкана и излияние из него лавы (Гирина и др., 2017е). Интенсивность излияния лавовых потоков начала расти с июня 2016 г., достигнув максимальных значений мощности излучения в 1500–1800 МВт в июле–сентябре.

На основе установленных значений VRP согласно эмпирической модели Sorola et al. (2013, 2016) можно определить объем изверженной лавы. При точности модели $\pm 50\%$, общий объем лавы, поступившей на поверхность земли во время извержения вулкана Ключевской в 2016 г., составил $\sim 0,067 \text{ км}^3$ при среднем расходе лавы $2\text{--}6 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 3.3).

Вулкан Безымянный, извержение 2016 г. В ноябре – начале декабря в кратере на вершине лавового купола происходило выжимание экструзивного блока, в декабре активность вулкана повысилась (Гирина и др., 1917в). По данным радиолокационного спутника Sentinel-1, экструзия диаметром около 100 м поднялась выше кромки кратера в период между 14 ноября и 15 декабря. Однако, по данным

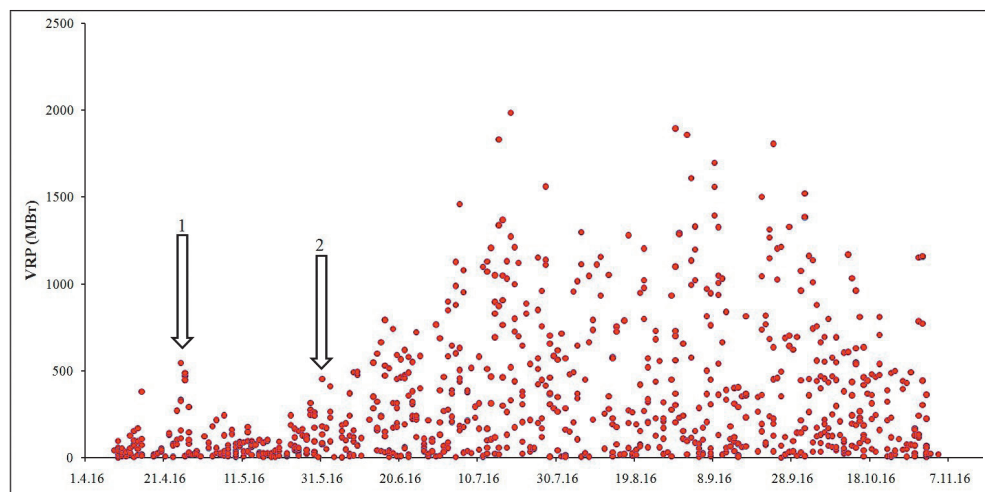


Рис. 3.2. Мощность теплового излучения во время извержения вулкана Ключевской в 2016 г. по спутниковым данным MODIS. Стрелками отмечено: 1 – прорыв в привершинной части Апахончичского желоба; 2 – начало роста интенсивности излияния лавовых потоков

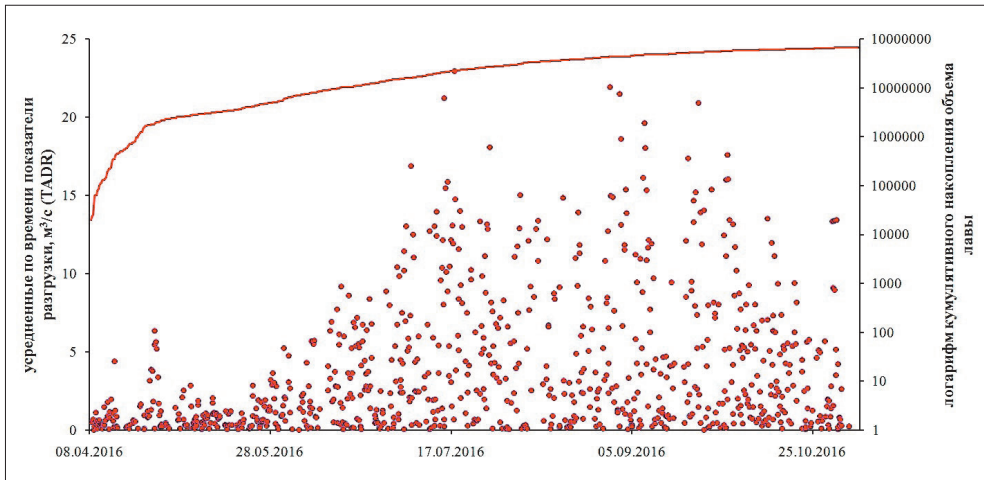


Рис. 3.3. Усредненные по времени показатели расхода лавы во время извержения вулкана Ключевской в 2016 г. Линией показан логарифм кумулятивного накопления объема лавы

MODIS, на ее поверхности не было зафиксировано интенсивной термальной аномалии. В период с 12 по 20 декабря из кратера произошло излияние лавового потока на западный склон купола вулкана, при этом экструзивный блок остался неразрушенным. Согласно описанному выше алгоритму, объем излившейся лавы за этот период времени составил $\sim 0,00046 \text{ км}^3 \pm 50 \%$ (рис. 3.4а).

Вулкан Шивелуч, извержение 2016 г. Продолжалось выжимание экструзивных блоков на лавовом куполе вулкана, сопровождавшееся обрушением раскаленных лавин. Оценка объема поступившего на поверхность земли свежего лавового материала была затруднена в связи с неравномерностью экструзивно-эффузивного процесса (рис. 3.4б).

20 мая 2016 г. в 10:09 UTC в районе лавового купола вулкана было зафиксировано 6 высокотемпературных пикселей с суммарной мощностью 420 МВт, однако по визуальным и спутниковым данным эксплозивных событий в это время не наблюдалось. Вероятно, в этот момент произошло выжимание блока маловязкой лавы, мгновенный расход которой составил $\sim 20 \text{ м}^3/\text{с}$.

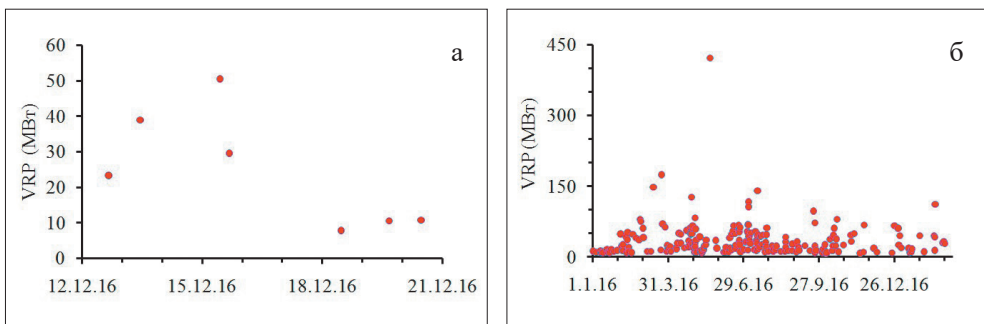


Рис. 3.4. Мощность теплового излучения по спутниковым данным MODIS в 2016 г. во время извержений вулканов: а) Безымянный и б) Шивелуч

Вулкан Алаид, извержения 2012 и 2015–2016 гг. В ходе извержения 2012 г. не отмечалось сильных эксплозивных событий, парогозовые шлейфы с небольшим содержанием пепла поднимались до 100–200 м над уровнем кратера. Согласно спутниковым данным MODIS, интенсивная термальная аномалия в районе вершины вулкана Алаид наблюдалась с 4 октября по 13 ноября 2012 г. Средняя мощность теплового излучения составила 41 МВт, общая энергия излучения – $1,25^{14}$ Дж (рис. 3.5). Во время вертолетного облета вершины вулкана 27 октября 2012 г. было отмечено, что его жерло заполнено свежей пирокластикой (Рашидов и др., 2012). С помощью тепловизионной съемки были выделены участки кратера с высокими значениями температуры поверхности. На основе анализа спутниковых снимков высокого разрешения за 28 августа 2011 г. и 6 апреля 2013 г. установлено, что во время извержения пирокластика выбрасывалась из жерла, расположенного в юго-восточной части кратера вулкана. Именно над ним были сформированы шлаковые конусы во время извержений в 1894 и 1981 гг., но в 2012 г. пирокластический материал лишь заполнил жерло. Для определения объема пирокластики использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM 1arc с пространственным разрешением 30 м и точностью по вертикали 5,6–9 м, построенная на основе спутниковой радиолокационной съемки в 2000 г., т. е. до извержения (рис. 3.6). Примерный объем свежего материала, заполнившего жерло вулкана в 2012 г., составил $0,00149 \text{ км}^3$. Согласно другому методу – эмпирической реологической модели (Corrola et al., 2013), на основе установленных значений мощности теплового излучения (по алгоритму MODVOLC) объем изверженного материала (точность модели $\pm 50 \%$) составил $\sim 0,00144 \text{ км}^3$ (Мельников и др., 2018).

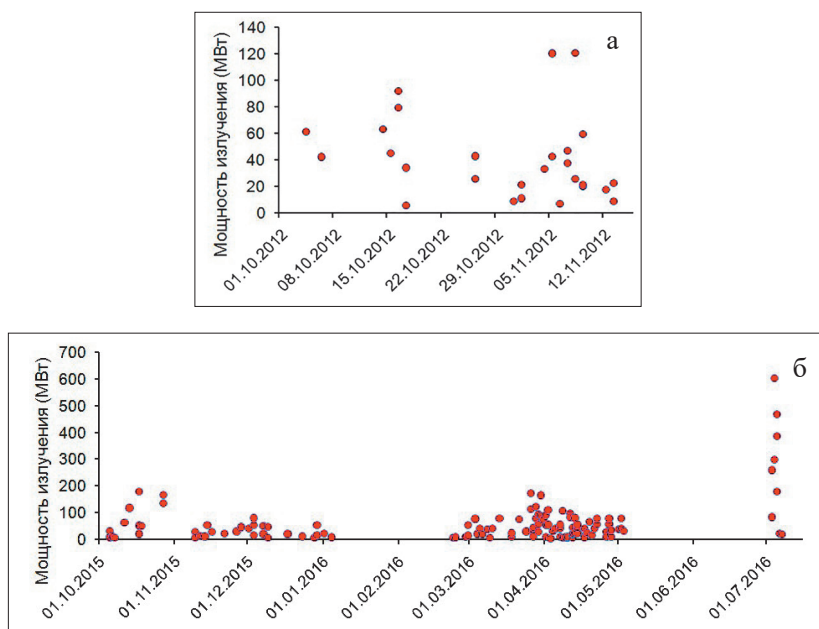


Рис. 3.5. Мощность теплового излучения во время извержений вулкана Алаид а) в 2012 г. и б) в 2015–2016 гг. по данным сенсора MODIS (алгоритм обработки MODVOLC)

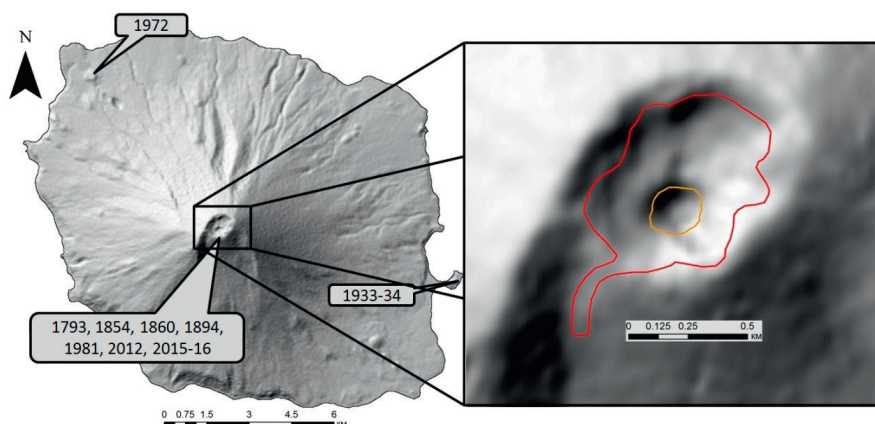


Рис. 3.6. Вулкан Алаид: цифровая модель рельефа SRTM 1arc, отмечены даты и локализации исторических извержений вулкана; на увеличенном фрагменте показана вершина вулкана, граница отложений пирокластического материала извержения 2012 г. выделена оранжевым цветом, лавовых потоков извержения 2015–2016 гг. – красным

В извержении 2015–2016 гг. по интенсивности термальной аномалии в районе кратера вулкана по данным MODIS можно выделить три периода: 1) с 5 октября 2015 г. по 4 января 2016 г., 2) с 23 февраля по 3 мая 2016 г. и 3) 3–7 июля 2016 г. (см. рис. 3.5).

В первый период происходило интенсивное поступление лавы из жерла вулкана, которая постепенно заполняла дно кратера собственно Алаида (Гирина и др., 2017е). На 21 октября 2015 г. (спутниковый снимок EO-1 ALI) площадь лавовых потоков в кратере вулкана составляла $\sim 0,18 \text{ км}^2$; согласно реологической модели, средний расход лавы был $\sim 0,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Над жерлом начал формироваться шлаковый конус, но в январе и феврале 2016 г. вулкан был относительно спокоен.

Во втором периоде извержения излияние лавовых потоков и слабая эксплозивная активность шлакового конуса внутри кратера Алаида продолжились. Согласно спутниковому снимку от 22 марта 2016 г. (Ресурс-П, Геотон, пространственное разрешение 1 м), диаметр основания шлакового конуса был 250 м, диаметр его кратера ~ 75 м, площадь лавовых потоков составляла $0,38 \text{ км}^2$ – лава практически перекрыла дно кратера вулкана. К концу апреля уровень лавы в кратере достаточно повысился – лавовый поток длиной до 400 м был обнаружен на юго-западном склон вулкана. Средний расход лавы в этот период составлял $0,75 \text{ м}^3/\text{с}$. В начале мая эффузивная деятельность вулкана прекратилась. По состоянию на 11 мая 2016 г. (спутниковый снимок Sentinel-2), по периферии лавового покрова, заполнившего кратер вулкана, отмечались глубокие трещины, вероятно, связанные с некоторым понижением уровня магматического вещества в канале вулкана и осадке изверженного материала, которые также повлияли на шлаковый конус – диаметр его кратера увеличился до 140 м.

Третий период извержения был скоротечным. 3 июля 2016 г. в районе кратера вулкана была зафиксирована термальная аномалия с мощностью излучения 260 МВт (см. рис. 3.5). Максимум активности вулкана приходится на 4–5 июля

с мощностью излучения до 600 МВт, но уже 6 июля она резко понизилась до 20 МВт. По данным KVERT, 3–4 июля наблюдались пепловые шлейфы, перемещавшиеся на высоте 2,5 км н.у.м. до 150 км на юго-запад от вулкана. В это же время на южном и юго-западном склонах молодого шлакового конуса образовались (по данным спутника Sentinel-2 от 7 июля 2016 г.) два эксплозивных кратера диаметрами 75 и 37 м, в результате деятельности которых на южном склоне вулкана на площади $\sim 0,5$ км² образовались отложения пирокластического материала.

Для определения объема лавы, излившейся в 2015–2016 гг., применялся тот же подход, что и для продуктов 2012 г. Граница образований лавы, заполнившей кратер вулкана, принималась за верхний уровень для расчета по ЦМР SRTM 1 arc. (объем изверженного в 2012 г. материала вычитался). Общий объем лавы составил 0,015 км³ (Мельников и др., 2018).

Представленные примеры показывают, что благодаря MODVOLC (алгоритму автоматической обработки спутниковых снимков MODIS) можно не только анализировать активность вулканов Камчатки и Курил в оперативном режиме, близком к реальному времени, и выявлять опасное ее повышение, но и получать количественные характеристики деятельности вулканов (их тепловую мощность; расход и объем лавового материала, поступающего на поверхность земли во время извержений, и др.).

3.2.1.3. Корреляция видео- и спутниковых данных для анализа активности вулканов

Для оперативного мониторинга вулканов и прогноза их активности применяются различные дистанционные методы наблюдений (см. главу 1). Для обнаружения термальных аномалий в автоматическом режиме были разработаны алгоритмы анализа инфракрасных спутниковых данных с сенсоров AVHRR, MODIS, VIIRS (Corpora et al., 2016; Wright et al., 2004) (см. 3.2.1.1. этой главы). Над территорией Камчатки и Курильских островов за сутки проходит от 8 до 12 спутников Terra, Aqua, Suomi NPP с установленными на них сенсорами MODIS и VIIRS. Однако для анализа эруптивной активности вулканов, динамика которой может меняться в считанные минуты, такое количество спутниковых данных явно недостаточно. С запуском на орбиту в 2014 г. геостационарного спутника Himawari-8 с сенсором АНІ, обладающим лучшим радиометрическим, спектральным и пространственным разрешением, чем его предшественник MTSAT, значительно повысилась информативность наблюдений за активными вулканами, т. к. съемка поверхности Камчатки и Курильских островов проводится каждые 10 минут.

Получаемая со спутника Himawari-8 информация интегрирована в ИС VolSatView, в которой созданы инструменты для анализа временных рядов данных, в частности, можно анализировать изменение яркостной температуры термальной аномалии в районе вершины активного вулкана за определенный период времени (см. главу 6) (Гирина и др., 2017а; Гордеев и др., 2016; Лупян и др., 2014, 2015б).

Для верификации спутниковой информации были использованы данные системы видеонаблюдения ИВиС ДВО РАН/ВЦ ДВО РАН (см. главы 1 и 5). Например, три веб-камеры, установленные на Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в п. Ключи, ведут непрерывную съемку вулкана Шивелуч. Одна из

веб-камер, выполняющая фотосъемку вулкана с частотой 1 кадр/мин, автоматически переключается в режим ночной съемки (ближний инфракрасный диапазон в пределах 700–1000 нм). На основе опубликованных алгоритмов обработки изображений с видеокамер (Lovick et al., 2008; Patrick et al., 2010) Д.В. Мельниковым был разработан bash-скрипт, который в автоматическом режиме выбирает только ночные снимки и проводит их обработку. Снимки конвертировались из цветного (RGB) изображения в градации серого цвета согласно формуле Gonzalez (2016):

$$Y = (0,299 * R) + (0,587 * G) + (B * 0,114),$$

где R, G, B – интенсивность красного, зеленого и синего цветов, Y – яркостная составляющая. Коэффициенты приведены для цветовой температуры 6500 К. В результате такого конвертирования изображение представляется в виде 256 градаций серого или яркости (значение 0 – чёрный цвет, 255 – белый).

Анализ изображений основан на статистической обработке данных. Для каждого снимка определялось среднеквадратичное отклонение (градаций серого) – показатель рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания, которое позволяет оценить, насколько значения во множестве могут отличаться от среднего. В результате получаем количественные характеристики интенсивности свечения активной части вулкана. Пример верификации и корреляции данных за 18 октября 2016 г. со спутника Himawari-8 и видеокамеры, направленной на вулкан Шивелуч, показан на рис. 3.7 и 3.8. Отметим сходство характера распределения яркостной температуры в течение темного времени суток: наиболее высокие ее значения соответствуют двум эксплозивным событиям, другие – раскаленным лавинам, связанным с выжиманием свежих экструзивных блоков лавового купола Шивелуча. Для эксплозий отмечается резкое повышение температуры и последующее быстрое ее снижение, связанное с остыванием пирокластического материала, частично перемещенного от вулкана в пепловой туче и частично выпавшего на его склоны.

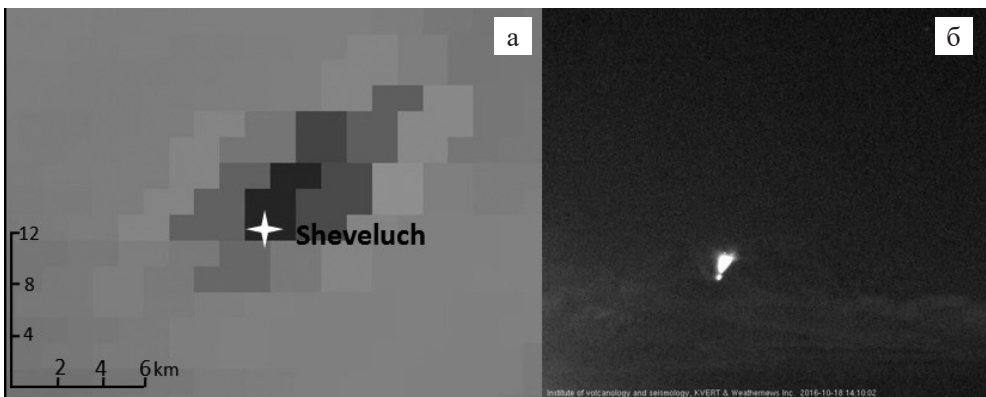


Рис. 3.7. В районе вулкана Шивелуч в 14:10 UTC 18 октября 2016 г. наблюдается: а) термальная аномалия с несколькими «горячими» пикселями на спутниковом снимке Himawari-8 (канал 3,9 мкм); б) раскаленная лавина на ночном инфракрасном снимке с видеокамеры

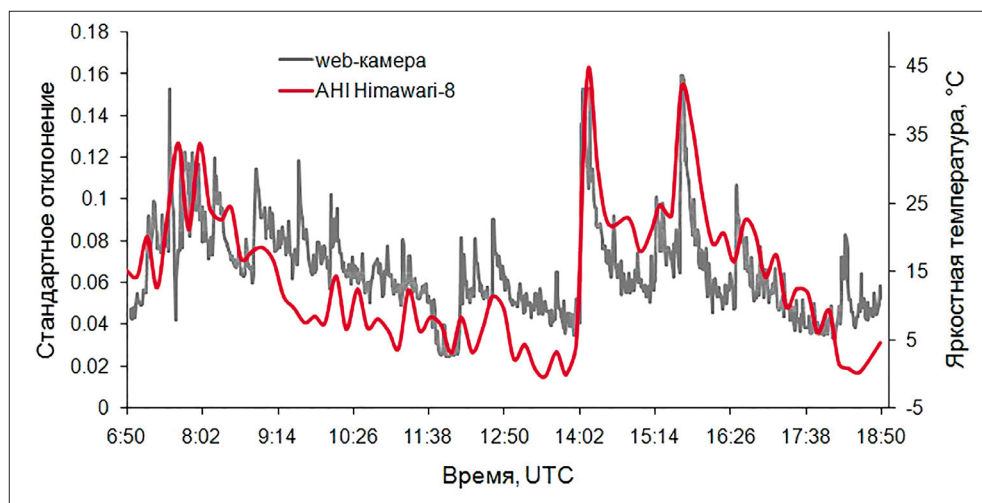


Рис. 3.8. Распределение яркостной температуры в районе вулкана Шивелуч по данным: Himawari-8 (периодичность 1 снимок в 10 мин) и среднеквадратичного отклонения для снимков с веб-камеры (периодичность 1 снимок в мин) за ночное время по UTC 18 октября 2016 г.

Увеличение временной детализации данных позволяет улучшать информативность оперативного мониторинга извержений вулканов, выделять этапы подготовки и развития их эруптивной деятельности. Представленные методы обработки и анализа спутниковых и видео данных могут применяться как самостоятельно, так и совместно, дополняя друг друга.

3.2.2. Выделение и анализ пепловых эксплозий и распространения пепловых облаков

На спутниковых снимках достаточно сложно визуально отделить метеорологические облака от пепловых. Для решения этой задачи проводится анализ изображения в инфракрасных каналах. Согласно закону Планка, температуру объекта можно определить исходя из количества энергии, которую он выделяет, то есть определяется яркостная температура объекта. Выделение пепловых облаков на спутниковых снимках осуществляется по разности яркостных температур, измеренных в различных спектральных диапазонах инфракрасного излучения. Суть метода в том, что разные длины электромагнитных волн ведут себя по-разному в зависимости от состава облака. Водяной пар преимущественно поглощает инфракрасное излучение на более длинных волнах, чем вулканический пепел (рис. 3.9). Поскольку вулканический пепел состоит преимущественно из вулканического стекла (SiO_2), а силикаты имеют полосу поглощения на длине волны около 10 мкм, связанной с вибрацией при растяжении связи Si-O, разделить пепловые и метеорологические облака можно благодаря разным величинам яркостных температур, полученным при измерении в двух инфракрасных каналах (Prata, 1989a, 1989b). Обычно берется разница между каналами 11 и 12 мкм. Для вулканических (пепловых) облаков эта величина будет отрицательной, для метеорологических – положительной (Prata, 1989a, 1989b, Gangale et al., 2010). Разность

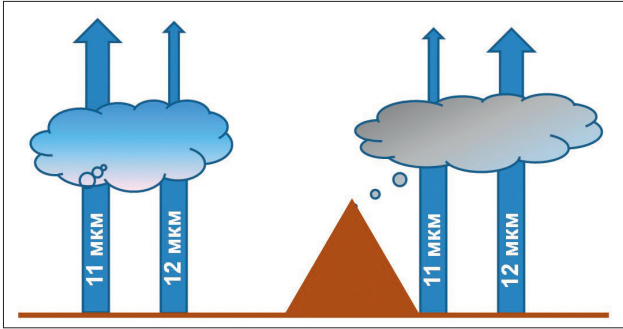


Рис. 3.9. Электромагнитное излучение поверхности земли частично поглощается при прохождении через толщу облаков. Вулканический пепел поглощает значительное количество излучения на более коротких инфракрасных волнах (11 мкм), чем метеорологические облака (12 мкм)

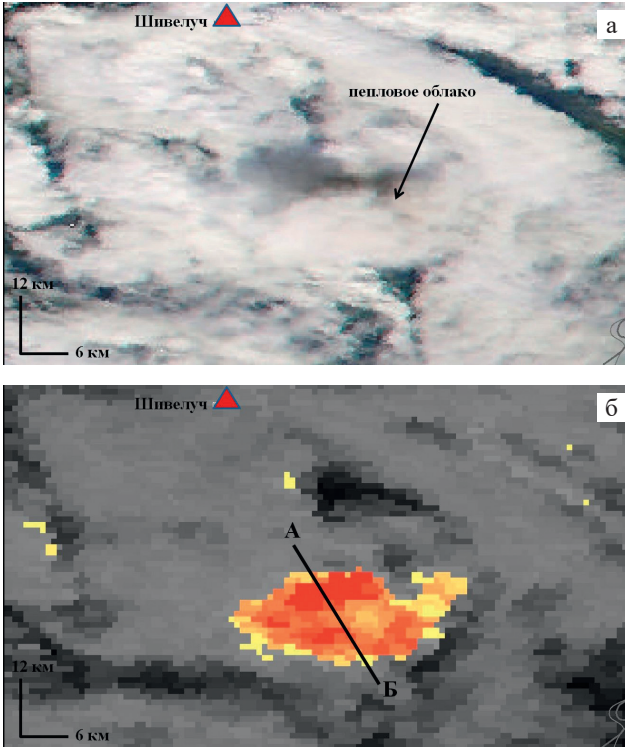


Рис. 3.10. Спутниковый снимок Terra MODIS от 01:18 UTC 13 сентября 2017 г.: а) комбинация каналов видимого диапазона; б) разность яркостных температур в 31 и 32 каналах (11 и 12 мкм, соответственно). Цветовой палитрой показана интенсивность яркости от жёлтого (минимальная) к красному (максимальная). Визуализация в системе VolSatView

яркостных температур наиболее ярко выражена, если диаметр пепловых частиц немного меньше длины волны инфракрасного спектра (Prata, 1989a, 1989b, Wen, Rose, 1994).

Для определения высоты пепловых облаков используется температура атмосферы на различных высотах. Эти данные могут быть получены из различных источников. Ученые KVERT используют данные метеорологических радиозондов, запускаемых два раза в сутки с метеостанций гг. Петропавловск-Камчатский и Северо-Курильск и п. Ключи. Также информацию о состоянии атмосферы можно получать из прогнозных метеорологических моделей, например GFS (Global Forecast System). Если предположить, что пепловое облако находится при той же температуре что и окружающая его атмосфера, можно сопоставить яркостную температуру облака и его высоту согласно метеорологическому профилю.

Рассмотрим извержение вулкана Шивелуч 13 сентября 2017 г. На комбинации каналов в видимом диапазоне спутникового снимка Terra MODIS за 01:18 UTC 13 сентября 2017 г. (рис. 3.10а) практически невозможно выделить пепловое облако,

которое сливается с окружающими его метеорологическими облаками. Если применить разность инфракрасных каналов 11 и 12 мкм (для сенсора MODIS это 31 и 32 каналы, соответственно), можно ясно наблюдать пепловое облако и его границы (рис. 3.10б). Рассмотрим разрез облака по профилю А-Б (см. рис. 3.10б): отрицательные значения разности каналов 31 и 32 указывают на присутствие пепла в атмосфере (рис. 3.11). Величины самых низких яркостных температур пеплового облака равны 40–42 °С

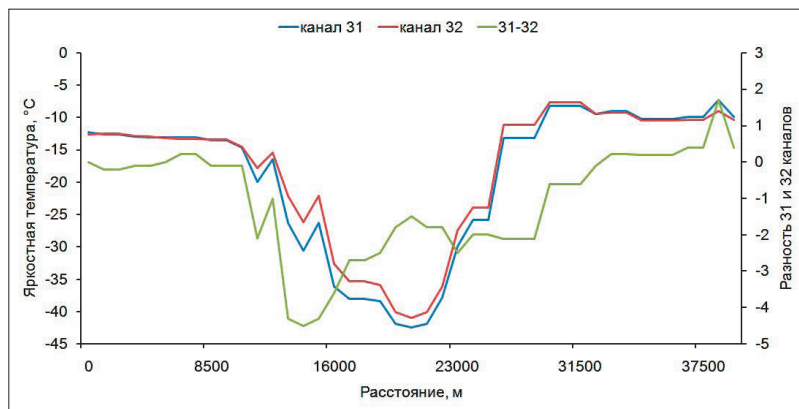


Рис. 3.11. Изменение яркостных температур в каналах 31, 32 и их разности (31–32) по профилю А-Б через пепловое облако вулкана Шивелуч 13 сентября 2017 г. (см. рис. 3.10б)

32389 Kljuchi Observations at 00Z 13 Sep 2017

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	°C	°C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1011.0	29	8.6	4.1	73	5.10	315	4	280.9	295.1	281.7
1006.0	76	8.0	0.0	57	3.82	313	7	280.7	291.5	281.3
1000.0	132	8.0	0.0	57	3.84	310	10	281.1	292.1	281.8
925.0	768	2.2	-2.8	70	3.38	315	19	281.6	291.2	282.1
920.0	812	2.2	-2.8	70	3.40	315	21	282.0	291.8	282.6
890.0	1080	-0.1	-9.1	51	2.17	334	17	282.3	288.7	282.7
872.0	1243	-1.3	-9.4	54	2.17	345	14	282.8	289.1	283.1
850.0	1448	-2.7	-9.7	59	2.16	335	16	283.3	289.7	283.7
747.0	2453	-11.9	-13.3	89	1.85	311	21	284.0	289.5	284.3
741.0	2515	-12.0	-13.2	91	1.88	310	21	284.5	290.2	284.8
734.0	2587	-12.1	-13.0	93	1.92	317	20	285.2	290.9	285.5
721.0	2724	-11.9	-14.8	80	1.69	330	17	286.8	292.0	287.1
700.0	2950	-11.7	-17.7	61	1.37	325	17	289.5	293.8	289.7
680.0	3172	-11.1	-22.1	40	0.96	334	17	292.6	295.7	292.8
671.0	3274	-11.5	-24.5	33	0.79	337	17	293.2	295.8	293.4
643.0	3597	-13.7	-28.8	27	0.56	350	16	294.3	296.2	294.4
617.0	3910	-15.9	-32.9	22	0.39	342	16	295.3	296.7	295.4
577.0	4412	-17.2	-35.0	20	0.34	330	16	299.5	300.7	299.6
567.0	4543	-17.5	-35.5	19	0.33	334	15	300.6	301.8	300.7
528.0	5068	-21.1	-37.4	22	0.29	350	14	302.5	303.5	302.5
512.0	5295	-22.7	-38.3	23	0.28	5	17	303.2	304.2	303.3
500.0	5470	-23.9	-38.9	24	0.26	350	16	303.8	304.8	303.9
497.0	5514	-23.9	-37.9	26	0.30	346	16	304.4	305.4	304.4
496.0	5528	-24.0	-38.0	26	0.29	345	16	304.4	305.4	304.4
434.0	6479	-32.0	-44.8	27	0.16	345	16	306.1	306.7	306.1
411.0	6867	-35.3	-47.5	27	0.13	320	14	306.7	307.2	306.7
400.0	7060	-36.9	-48.9	28	0.11	335	14	306.9	307.4	307.0
388.0	7270	-38.8	-50.1	29	0.10	345	16	307.1	307.5	307.1
384.0	7342	-39.5	-50.5	30	0.10	345	15	307.1	307.5	307.1
322.0	8526	-48.7	-59.7	27	0.04	345	10	310.3	310.4	310.3
300.0	8990	-50.7	-61.7	26	0.03	335	17	313.8	313.9	313.8
290.0	9211	-51.3	-62.3	26	0.03	335	19	316.0	316.1	316.0
284.0	9347	-51.5	-62.5	26	0.03	335	19	317.7	317.8	317.7

Рис. 3.12. Данные радиозонда метеостанции пос. Ключи за 00:00 UTC 13 сентября 2017 г. Красной рамкой выделены температуры и высоты, соответствующие температурам пеплового облака

согласно данным радиозонда, запущенного с метеостанции в п. Ключи в 00:00 UTC 13 сентября 2017 г., температурам диапазона – 39–40 °C соответствует высота 7,3 км н.у.м. (рис. 3.12), т. е. пепловое облако в 01:18 UTC 13 сентября 2017 г. находилось на высоте 7,0–7,5 км н.у.м.

3.2.3. Мониторинг диоксида серы (SO₂) для прогноза активности вулканов

Деятельность активных вулканов постоянно сопровождается эмиссией вулканических газов: они являются движущей силой эксплозивных извержений, в межэруптивных фазы состояние вулкана оценивается именно по их активности. Например, резкий рост высоты и мощности парогазовых шлейфов над вулканами часто проявляется перед их сильными эксплозивными извержениями. В составе вулканических газов преобладает водяной пар, содержится также значимое количество углекислого газа (CO₂) и диоксида серы (SO₂).

Диоксид серы является одним из основных магматических газов, сопровождающих извержения. Попадая в воздух, он превращается в аэрозоли сульфатов в течение суток близ поверхности земли и в течение месяца в стратосфере. Мониторинг содержания SO₂ в атмосфере позволяет судить об энергии извержения вулкана как в целом, так и отдельных его фаз. Мощные эмиссии SO₂ могут приводить к возникновению кислотных дождей и климатических флуктуаций. Так, например, в результате извержения вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. в атмосферу было выброшено более 20 млн тонн диоксида серы (Bluth et al., 1992), что оказало мощное влияние на состояние озонового слоя. Принципиальная модель взаимодействия вулканических газов и атмосферы приведена на рис. 3.13.

В настоящее время существует три основных метода изучения состава вулканических газов: а) отбор газа непосредственно на вулкане и его химический анализ

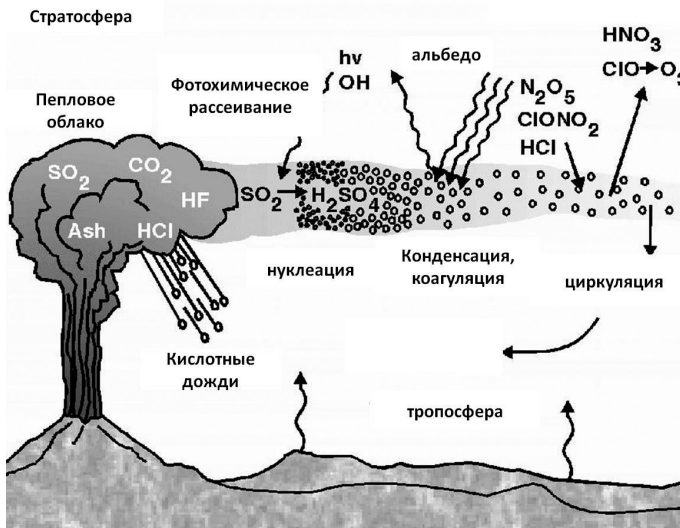


Рис. 3.13. Принципиальная схема распределения вулканических газов в атмосфере (https://volcanoes.usgs.gov/vhp/gas_climate.html)

в лаборатории; б) анализ состава газа дистанционными наземными системами; в) анализ концентрации диоксида серы в атмосфере спутниковыми системами.

Два последних метода основаны на принципах взаимодействия молекул вулканических газов с атмосферой, концентрации этих газов могут быть определены в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

Наземный дистанционный (спектроскопический) метод исследования вулканических газов, получивший в последние годы широкое распространение во всем мире, весьма информативный, точный и удобный. Дистанционные измерения и непосредственный отбор проб газов на fumarольных полях вулканов взаимно дополняют друг друга и при совместном применении дают наиболее полную информацию о составе газовой эмиссии вулкана.

История дистанционного мониторинга диоксида серы началась в 70-х гг. XX в. с появления спектрометра COSPEC (a correlation spectrometer). Вслед за ним появился метод ДООС – дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (DOAS – Differential optical absorption spectroscopy). Сканирующие DOAS-инструменты используют рассеянный солнечный свет в ультрафиолетовом диапазоне для определения концентраций SO_2 , NO_2 , BrO, HCHO. Приборы могут сканировать шлейф вулканического газа в любой пересекающей шлейф плоскости, что позволяет определить количество молекул газа; зная скорость движения шлейфа, можно вычислить общий расход газа (Galle et al., 2010). На этом принципе основаны практически все современные приборы, а также системы раннего обнаружения и предупреждения о повышении уровня диоксида серы в атмосфере (например, такая автоматизированная система создана на Гавайских островах). Самым крупным на сегодняшний день является проект Европейского союза – NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change), в рамках которого были созданы 64 автоматических станции мониторинга диоксида серы на вулканах Южной Америки (Galle et al., 2010).

Имеющийся в ИВиС ДВО РАН опыт работы по анализу содержания диоксида серы в атмосфере, связанного с извержениями вулканов, также показал хорошую информативность метода для оценки состояния активности вулканов и прогноза развития извержений.

Глобальный мониторинг концентраций SO_2 на основе измерений в ультрафиолетовом диапазоне (UV) в настоящее время осуществляется инструментом OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленном на спутнике AURA. OMI является совместной разработкой Голландского аэрокосмического агентства, Финского метеорологического института и NASA. Этот прибор в 2004 г. сменил на околоземной орбите своего предшественника – прибор TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). OMI обладает более широким спектральным и пространственным разрешением, он способен осуществлять ежедневный глобальный мониторинг состояния атмосферы в диапазоне 270–500 нм длины волны и спектральным разрешением 0,5 нм с пространственным разрешением 13×24 км/1 пиксель. Частота съемки – 1 раз в сутки. Алгоритм обработки данных дает информацию о повышенных концентрациях SO_2 на трёх высотах н.у.м.: 3, 5 км (пассивная дегазация вулканов) и 15 км (крупные эксплозивные извержения). Метод осно-

ван на измерении спектральных характеристик солнечного света, рассеянного в атмосфере и отраженного от поверхности Земли (Yang et al., 2007). Сравнение начального и отраженного спектра дает информацию о распределении и концентрации микропримесей озона и диоксида серы, так как эти газы поглощают и рассеивают часть приходящего солнечного света. В качестве единицы измерения концентрации SO_2 используются Единица Добсона (Dobson Unit – DU). Одна Единица Добсона равна 0,01 мм толщины сжатого слоя озона при 0 °С или $2,69 \times 10^{20}$ молекул озона на 1 м². Типичное фоновое значение концентрации SO_2 в атмосфере составляет ≤ 1 Единицы Добсона. Используя информацию этого прибора, можно рассчитать концентрацию и массовое содержание диоксида серы в атмосфере на момент пролета спутника над вулканом. Помимо концентраций SO_2 на основе аэрозольного индекса OMI могут предоставлять информацию о наличии в атмосфере частиц пепла.

В связи с тем, что анализ газа с помощью OMI основан на интенсивности солнечной радиации, появляются соответствующие ограничения – необходим достаточно яркий световой поток. Для территории Камчатки в период короткого светового дня с ноября по март на спутниковых снимках данные о диоксиде серы проявляются в виде сильно зашумленной информации, непригодной для качественной обработки.

Инструментом, способным определять пепловые облака и высокие концентрации SO_2 в атмосфере, является AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленный на спутнике AQUA. AIRS, в отличие от OMI, работает в инфракрасном диапазоне, для которого характерно интенсивное поглощение молекул диоксида серы в спектральном окне размером 7,34 мкм (Prata, Bernardo, 2007; Thomas et al., 2011). Два этих инструмента удачно дополняют друг друга, т. к. инфракрасный диапазон может использоваться в отсутствии солнечного света, предоставляя информацию об извержениях вулканов в ночное время.

3.2.3.1. Характеристика активности вулканов Камчатки по данным мониторинга SO_2

Ежегодно в атмосферу из различных источников привносится около 102 000 килотонн диоксида серы, из которых наибольшая масса (около 67 000 килотонн в год) приходится на промышленное производство, с деятельностью вулканов связано от 14 000 до 23 000 килотонн в год (Andres, Kasgnoc, 1998; Carn et al., 2017). Для вулканизма характерна дегазация диоксида серы: 1) во время извержений вулканов (эксплозии пепла до 35 км н.у.м. в течение ч/суток, излияния лавы в течение дней/лет) в атмосферу поступает от 500 до 4 000 килотонн в год; 2) в течение пассивной дегазации вулканов (фумарольная активность с подъемом парагазовых столбов до 5 км н.у.м., продолжающаяся недели/столетия) в атмосферу выносится от 5 000 до 10 000 килотонн в год.

Вулкан Ключевской. Извержение продолжалось с февраля по июль 2007 г., причем наиболее активным вулкан был в мае–июле (Гирина и др., 2009). В начале извержения (февраль–март) концентрации SO_2 были слишком малы для обнаружения с помощью прибора OMI. В этот период происходила стромболианская активность

вулкана (фонтанирование лавы в кратере), по визуальным данным она отмечалась как умеренное свечение над кратером и мощная парогазовая деятельность. С 20–21 апреля содержание SO_2 начинает расти – происходят излияния лавы и вулканская активность с подъемом пепловых колонн до 6–8 км н.у.м. Всего за активную фазу извержения в атмосферу поступило более 120 кило тонн диоксида серы.

Вулкан Мутновский является ярким примером пассивной дегазации вулкана. Наземными инструментальными методами (COSPEC) в 1999 г. было определено, что средний объем дегазации SO_2 этого вулкана составляет примерно 50 тонн/день (Fisher et al., 1999). По данным OMI, на протяжении всего апреля 2007 г. над кратером вулкана фиксировалась повышенная концентрация диоксида серы (рис. 3.14 и 3.15), которая постепенно росла и достигла максимума 17 апреля (на момент пролета спутника в 02:50 UTC масса SO_2 составляла 330 тонн), затем начала снижаться. Известно, что 17 апреля 2007 г. произошло небольшое фреатическое извержение вулкана, в результате которого на дне Активного кратера появилась новая взрывная воронка диаметром около 200 м и западные склоны вулкана были покрыты тонким слоем рзургентного пепла (Гавриленко, Мельников, 2008; Гирина и др., 2009).

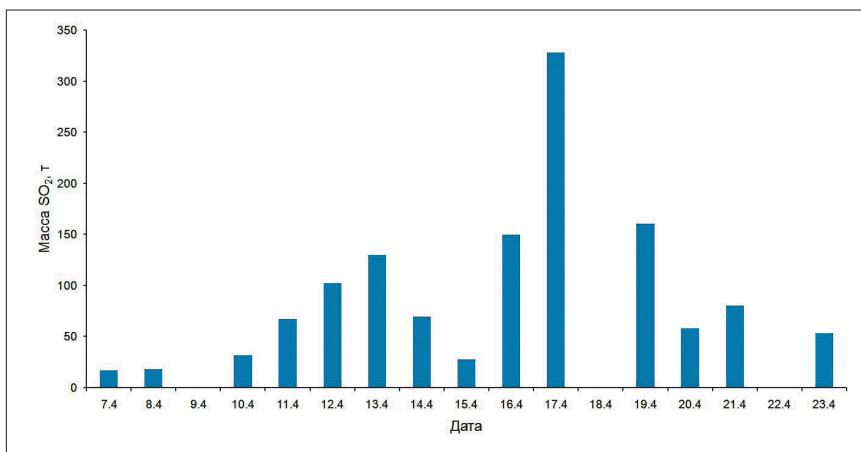


Рис. 3.14. Распределение концентрации SO_2 (тонн в день) над вулканом Мутновский в апреле 2007 г. по данным прибора OMI (спутник Aura)

Вулкан Шивелуч. Для вулкана характерна постоянная пассивная дегазация, однако SO_2 (по данным прибора OMI) регистрируется только во время крупных эксплозивных событий, причем даже в это время концентрации SO_2 , как правило, незначительны. Возможно, это связано с кратковременностью эксплозивных событий (часы), и диоксид серы успевает рассеяться в атмосфере. Учитывая то, что OMI/Aura пролетает над территорией Камчатки только 1 раз в сутки, вероятность фиксации таких событий слишком мала.

Например, за период 2009–2011 гг. было отмечено всего несколько крупных эруптивных событий, сопровождавшихся крупными пепловыми облаками и мощной эмиссией диоксида серы. Самое сильное событие из указанных произошло 28 октября 2010 г. (Гирина и др., 2011б; Овсянников, Маневич, 2010).

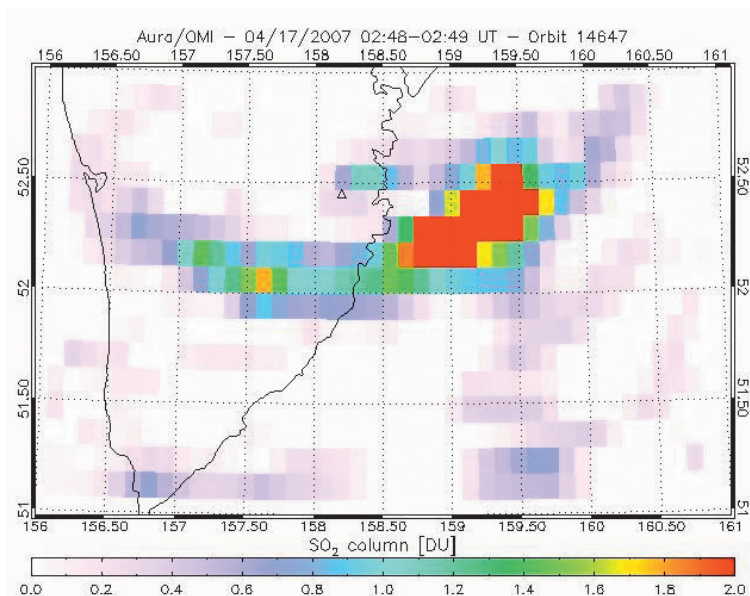


Рис. 3.15. Облако с высоким содержанием SO_2 , образовавшееся в результате фреатического извержения вулкана Мутновский. Данные OMI за 02:48 UTC 17 апреля 2007 г.

Извержение вулкана началось 28 октября, он постоянно был закрыт плотной облачностью. В 12:06 UTC 28 октября, согласно сейсмическим данным, возможно, происходили выбросы пепла до 6 км н.у.м.; с 14:00 до 20:00 UTC (серии сейсмических событий с амплитудой 41,7 мкм/с) – вероятно, до 8 км н.у.м. В результате извержения вулкана был частично разрушен лавовый купол и образовался крупный пирокластический поток (Гирина и др., 2011б; Овсянников, Маневич, 2010). Это извержение было зафиксировано инструментом AIRS (рис. 3.16). По состоянию на 01:29 UTC 28 октября при площади пеплового облака 20 767 км² масса диоксида серы составляет 8,6 килотонн, на 15:05 UTC 28 октября при площади пеплового облака 39 687 км² – 9,4 килотонны. В свою очередь, прибор OMI в 01:39 UTC зафиксировал облако пепла на расстоянии 300 км от вулкана с массой диоксида серы 6 килотонн на высоте 5 км н.у.м. и 21,2 килотонны на уровне 3 км н.у.м. (рис. 3.17). Различия в оценке массы по этим двум инструментам объясняются тем, что OMI измеряет концентрацию SO_2 в пределах всей газовой колонны (на разных уровнях, что повышает точность), а AIRS измеряет концентрации лишь в нижних слоях тропосферы.

Вулкан Кизимен. В октябре 2010 г. началось извержение вулкана Кизимен, до этого было отмечено лишь одно извержение в 1928–1929 гг. Во второй половине октября 2010 г. в привершинной части вулкана на его юго-восточном склоне образовалось две новых fumaroles: одна непосредственно под вершиной, вторая на 50–70 м ниже кромки Восточного кратера. Первые эксплозии с небольшим содержанием вулканической пыли отмечены в ночь с 12 на 13 ноября 2010 г. (Малик, Овсянников, 2011).

9 декабря началось эксплозивное извержение Кизимена вулканического типа (рис. 3.18). Эксплозивная фаза извержения продолжалась до декабря 2011 г., пепел

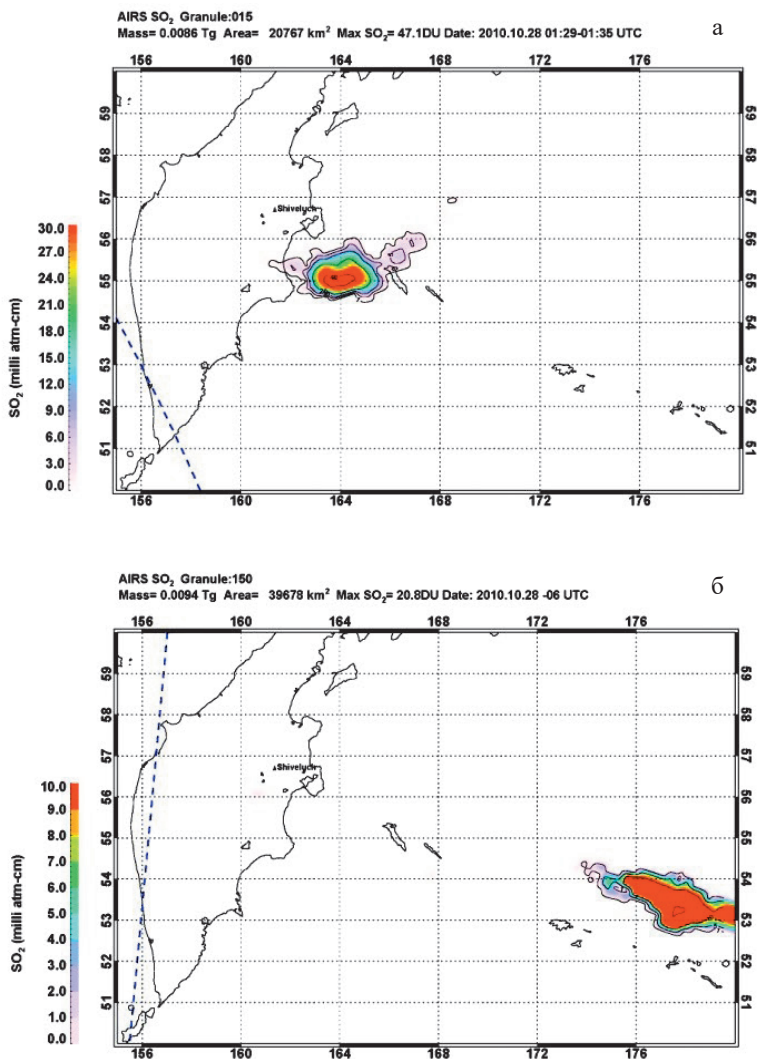


Рис. 3.16. Пепловое облако вулкана Шивелуч 28 октября 2010 г.: а) в 01:29 UTC, б) в 15:05 UTC, по данным прибора AIRS

выпадал в пп. Козыревск, Тигиль, Атласово, Лазо, Анавгай, гт. Петропавловск-Камчатский и Елизово.

В декабре 2010 г. данных ОМІ нет в связи с низкой интенсивностью солнечного света в это время года, но данные AIRS восполнили этот пробел. Например, по сейсмическим данным, 12 декабря в 19:46 UTC произошла серия пепловых выбросов. 13 декабря 01:47 UTC (через 6 ч после эксплозий) на снимке AIRS было зарегистрировано пепловое облако площадью 29 000 км² с концентрацией диоксида серы равной 15,8 килотонн (Мельников и др., 2011) (рис. 3.19).

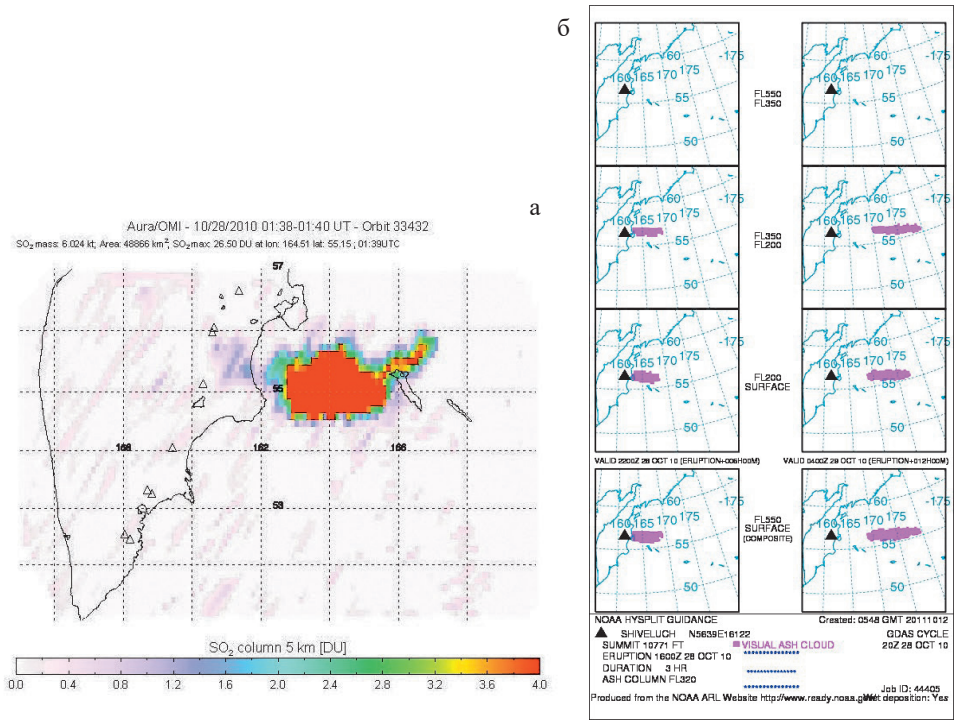


Рис. 3.17. Концентрация диоксида серы вулкана Шивелуч 28 октября 2010 г. по данным прибора ОМІ (слева) и схема распространения пеплового облака вулкана по модели HYSPLIT (справа)



Рис. 3.18. Эксплозивное извержение вулканского типа вулкана Кизимен: а) 9 декабря 2010 г., фото Don Page; б) 27 октября 2011 г., фото А. Сокоренко

За 2009–2011 гг. с помощью инструмента ОМІ было выполнено 106 измерений содержания диоксида серы в пепловых облаках камчатских вулканов, общая масса SO_2 составила примерно $0,223 \cdot 10^6$ тонны (табл. 3.1, рис. 3.20). Следует отметить, что содержание диоксида серы в пепловых облаках извержений, происходивших в период с ноября по март каждого года, не измерены в связи с ограниченностью этого метода (см. его описание выше).

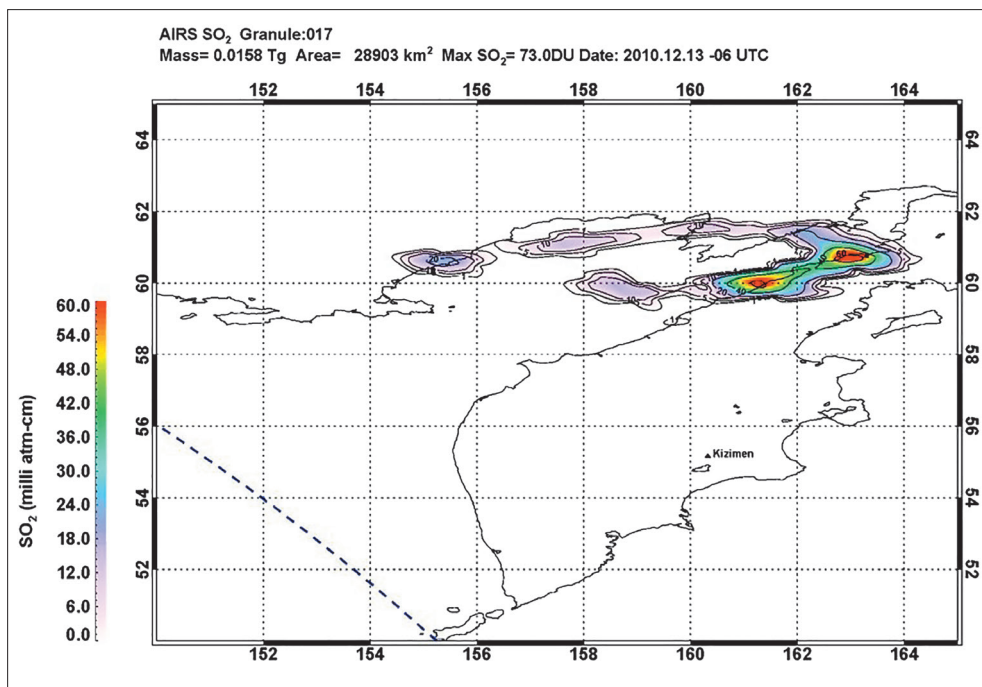


Рис. 3.19. Пепловое облако вулкана Кизимен 12 декабря 2010 г., содержащее диоксид серы по данным прибора AIRS

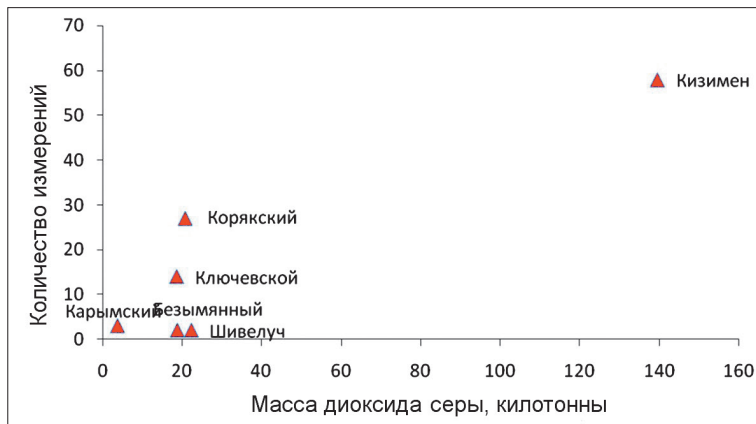


Рис. 3.20. Соотношение количества измерений и общей массы диоксида серы в районах камчатских вулканов в течение 2009–2011 гг. по данным сенсора OMI

Таблица 3.1. Общая масса диоксида серы (в килотоннах), поступившая в атмосферу во время извержений вулканов Камчатки в 2009–2011 гг. по данным сенсора OMI

Кизимен	Ключевской	Безымянный	Шивелуч	Корякский	Карымский
139,46	18,53	18,70	22,24	20,66	3,65

Анализ содержания диоксида серы в фумарольных (парогазовых) и пепловых облаках различных вулканов Камчатки показал, что для каждого вулкана можно выделить индивидуальные параметры дегазации диоксида серы. С помощью наземного и спутникового мониторинга диоксида серы можно будет определить:

1) текущее состояние вулкана (есть ли поступление в атмосферу диоксида серы). Следует отметить, что для слабоактивных вулканов с постоянной пассивной дегазацией (Мутновский, Горелый и др.) концентрации SO_2 в низких слоях тропосферы будут примерно постоянны; для вулканов с высокой эксплозивной активностью в межэруптивных периоды концентрация SO_2 в фумарольных шлейфах будет низкой или практически отсутствовать.

2) стадию роста вулканической активности. Для большинства вулканов на этом этапе характерно повышение концентраций диоксида серы – можно определить момент начала активизации, объемы дегазации, прогнозировать дальнейшее развитие процессов.

3) активную фазу извержения. Возможно определение энергии эксплозивного события, рассчитанной по общему объему дегазации диоксида серы. Для крупных эксплозивных магматических извержений вулканского и плинианского типа будут характерны относительно кратковременные, но значительные по объему (десятки-сотни килотонн) концентрации диоксида серы в средних и высоких слоях тропосферы. Для преимущественно фреатических, фреато-магматических и эффузивных извержений будет наблюдаться относительно продолжительное по времени содержание диоксида серы (до десятков килотонн) в нижних и средних слоях тропосферы.

Глава 4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ VOKKIA И KVERT ДЛЯ СБОРА, ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

4.1. Инфраструктура пространственных данных

За многие годы исследований вулканов и их извержений в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН накоплен большой объем уникальных научных данных (публикации, данные в различных аналоговых и цифровых форматах и т. д.). Распределенный характер хранения информации, сформированной различными программно-аппаратными средствами и имеющей разные методы и технологии доступа, затрудняет поиск данных и не позволяет эффективно использовать их в научных исследованиях. В связи с этим актуальной задачей являются интеграция данных в тематические информационные ресурсы, организация доступа к ним в сети Интернет, а также создание инструментов для их комплексного анализа.

Для обеспечения доступа всех заинтересованных пользователей к научной информации в ИВиС ДВО РАН с 2008 г. формируется инфраструктура пространственных данных (ИПД) на основе единых международных стандартов, обеспечивающих interoperability данных и сервисов в глобальном информационном пространстве (Романова, 2015; Романова, Гирина, 2017). На сегодняшний день ИПД включает: каталог метаданных, описывающих информационные ресурсы ИВиС ДВО РАН (коллекции данных, слои пространственных данных (ПД), сервисы и др.) (<http://geoportal.kscnet.ru/geonetwork/>); геопортал, обеспечивающий единую точку входа в распределенную среду ПД и сервисов (<http://geoportal.kscnet.ru>) и репозиторий открытого доступа – архив научных публикаций по геологии, геофизике, вулканологии, сейсмологии и другим разделам наук о Земле (<http://repo.kscnet.ru>) (Романова, 2013а, 2013б) (рис. 4.1).

В рамках этих работ, начиная с 2010 г., разрабатываются информационные системы: «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (Volcanoes of Kurile-Kamchatka Island Arc Information System – VOKKIA IS) для интеграции данных по вулканам и их извержениям (Романова и др., 2012б, 2012в) и Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team Information System – KVERT IS) для подготовки и интеграции данных оперативного мониторинга активности вулканов (Романова, Гирина, 2017) (рис. 4.2).

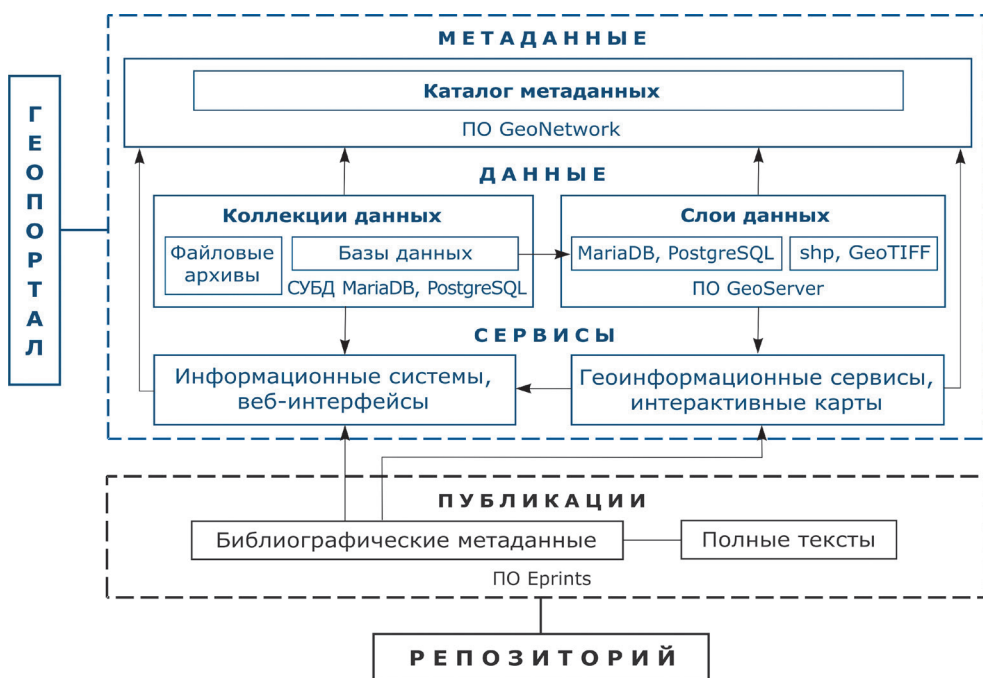


Рис. 4.1. Архитектура ИПД ИВиС ДВО РАН

Эти ИС обеспечивают систематизацию и хранение разнородных вулканологических данных и позволяют проводить их анализ, используя современные информационные и вычислительные технологии. Для хранения атрибутивных данных в ИС созданы базы данных (БД) в среде системы управления базами данных (СУБД) MariaDB, распространяемой под лицензией GPL – GNU General Public License 9.

4.2. ИС VOKKIA

4.2.1. Назначение системы и особенности ее реализации

ИС «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/>) предназначена для интеграции и систематизации гетерогенных научных данных по наземным вулканам Камчатки, Курильских островов и подводным вулканам омывающих морей. ИС обеспечивает хранение и представление данных об исторических извержениях из литературных источников и оперативных данных, полученных с использованием дистанционных, геологических и геофизических методов за период с 1935 г. по настоящее время.

При разработке ИС были решены задачи модификации первичных научных данных в направлении их интеграции в единую информационную среду, разработки основных принципов их организации и обеспечения свободного доступа к ресурсам вулканологической тематики, представляющим интерес как для научного сообщества, так и для широкого круга пользователей сети Интернет. Сложность создания

такой системы связана с многоплановостью проявления вулканических процессов, уникальностью каждого вулкана и неповторимостью каждого отдельного извержения. В связи с этим, одной из первоочередных задач при разработке системы стала формализация разнородной информации по вулканам и их извержениям и выбор основных критериев для их описания.

ИС VOKKIA обеспечивает качество и полноту данных и возможность пополнения ее как результатами последних исследований, так и различными архивными материалами. Система на сегодняшний день включает информационные модули: «Вулканы», «Извержения», «Мониторинг», «Изображения», «Породы», «Библиография», «Геосервисы». Логическая структура ИС обеспечивает согласованность и взаимодействие ее компонентов, возможность расширения системы дополнительными программными решениями для повышения ее функциональности. ИС VOKKIA предоставляет единый веб-интерфейс ко всем составляющим ее информационным модулям и обеспечивает удобный доступ к разнородным атрибутивным данным и связанным с ними геоинформационным сервисам (геосервисам) (см. рис. 4.2).

Главный модуль «Вулканы», обеспечивающий взаимосвязь всех модулей системы, содержит основные сведения о вулканах: название, синонимы, номер по каталогу Global Volcanism Program (GVP) (Siebert et al., 2010), географические координаты вершины, высоту вулканической постройки (абсолютную и относительную) (рис. 4.3). Кроме этого, для каждого вулкана приведены: географический регион, вулканический район, статус вулкана (действующий, потенциально действующий или потухший), период активности, тип постройки, состав пород, краткое описание вулкана со списком использованной литературы и др. Для действующих вулканов дополнительно приведены координаты и название активного центра (если они не совпадают с координатами вершины или названием вулкана), дата последнего известного извержения, сведения о потенциальной опасности и другие характеристики (рис. 4.4). Координаты наивысших точек вулканических построек уточнены С.О. Боровковым с помощью сервиса Google Earth (<https://earth.google.com/>). Названия и синонимы вулканов на русском языке соответствуют их написанию в сводных трудах (Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, 1957; Действующие... 1991), на английском – в каталоге (Siebert et al., 2010) и в работах ученых KVERT (Girina et al., 2018; Gordeev, Girina, 2014; и др.).

Источниками информации о вулканах стали научные статьи, книги и каталоги (Влодавец, Пийп, 1957; Геология ..., 1964; Горшков, 1957; Действующие ..., 1991; Новейший ..., 2005; Новограбленов, 1932; Огородов, 1972; Подводный вулканизм ..., 1992; и др.), а также созданные ранее в ИВиС ДВО РАН электронные коллекции: базы данных, файловые архивы, тематические разделы веб-сайта, в которых данные о вулканах представлены в структурированном виде. Описания вулканов постоянно пополняются результатами новых исследований, отраженных в последних научных публикациях.

Модуль «Извержения» содержит сведения об исторических извержениях – произошедших на памяти людей и имеющих документальные свидетельства (для Камчатки и Курил на период с конца XVII – начала XVIII вв. по настоящее время). Источниками данных об извержениях являются каталоги (Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, 1957; Гущенко, 1979; Действующие ..., 1991; Новейший ..., 2005; Siebert et al., 2010), научные статьи, данные KVERT.

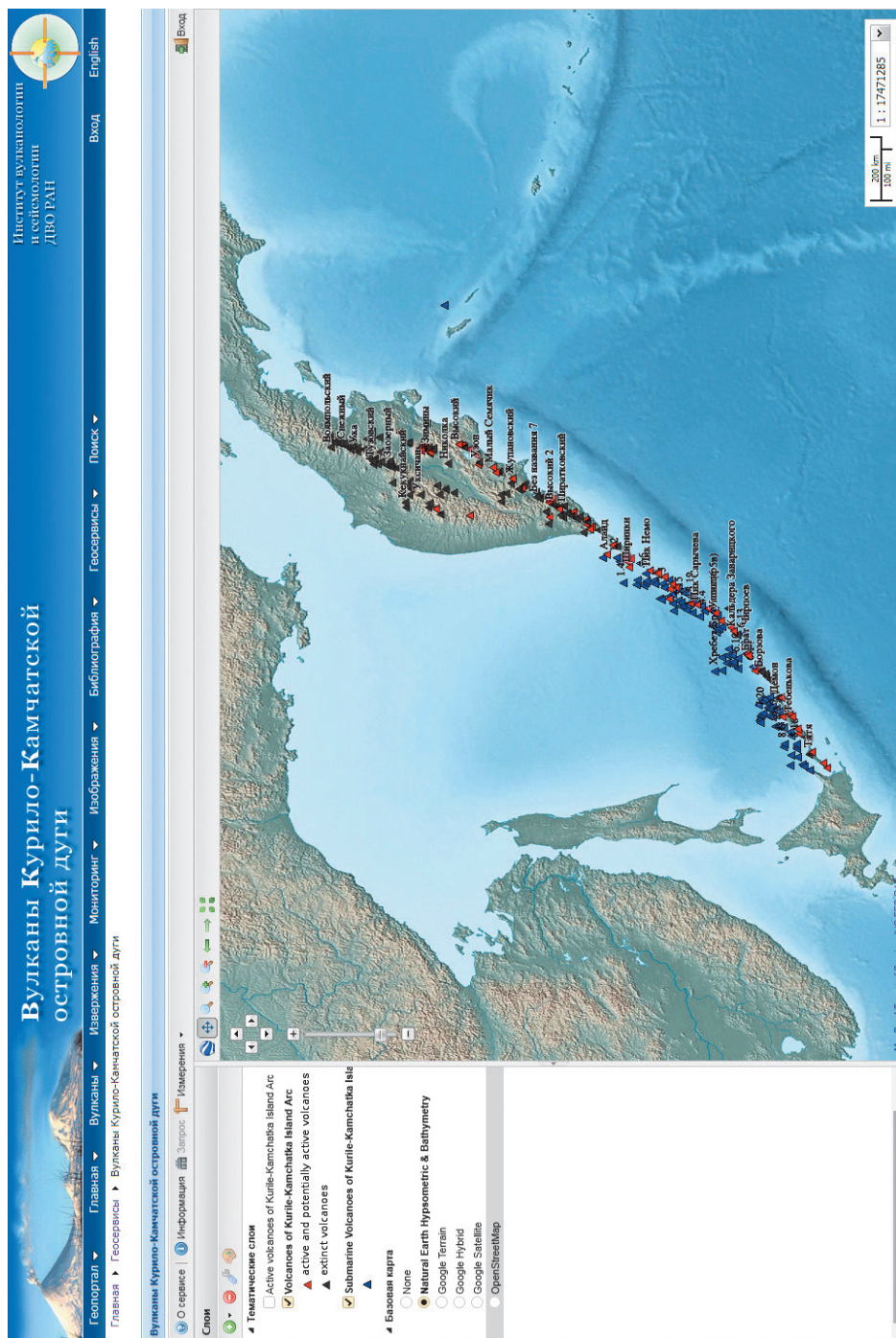


Рис. 4.3. Обзорная карта вулканов Курило-Камчатской островной дуги

Институт вулканологии
и сейсмологии
ДВО РАН

Вход

English

**Вулканы Курило-Камчатской
островной дуги**

Поиск

Геоportal

Вулканы

Действующие вулканы

Ключевской

Мониторинг

Изображения

Библиография

Госсервисы

Основные характеристики

Ссылки

- Описание
- Извержения
- Отопления
- Изображения
- Библиография

Мониторинг

- Текущая активность
- VOVA Releases
- Веб-камеры
- Спутниковые снимки

Карта

Спутник

Название: Ключевской

Номер GPR: 300260

Синонимы: Ключевская сопка, Камчатская гора

Регион: полуостров Камчатка

Вулканический район: Центральная Камчатская депрессия

Координаты: 56°3'20" с.ш., 160°38'31" в.д.

Абсолютная высота: 4750 м

Относительная высота: 1750 м

Статус: Действующий

Текущий адвационный цветовой код: **ЗЕЛЁНЫЙ**

Географическое положение: Камчатской вулканической области. Вулкан принадлежит Ключевской группе вулканов Камчатской депрессии на правом берегу р. Камчатка и левом берегу р. Халцаз, в 30 км от п. Ключи, в 360 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Тип постройки: Стратовулкан

Состав пород: высокомагнезиальные базальты, андезитобазальты

Последнее известное извержение: 2018/5/14 - 2018/6/15

Краткое описание

Ключевской вулкан — типичный стратовулкан с конусом правильной формы и абсолютной высотой около 4750 м, самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии; сложен базальтовыми породами. Вулкан был открыт в 1812 г. в экспедиции В.М. Беринга. Вулкан был описан (Влодавек, 1940; Действующие вулканы Камчатки, 1957; Заварский, 1935; Пилп, 1956). Фундамент вулкана сложен осадочными отложениями и вулканическими образованиями, наиболее древние из них (Р⁰-N2) - туфобрикции, туфо-конгломаты, граувакковые и туфовые песчаники — имеют слоистое строение и сняты в пологие складки. Выше залегают прослои туфов и лав базальтового состава (N2-Q), образующие формы типа плато-базальтов. Самая верхняя часть разреза пород Fundamenta сложена лавами нег⁰ и невоплотлённого облака базальтового и андезитобазальтового состава, которые залегают в основании всех вулканов Ключевской группы. Верхинный конус вулкана, диаметр которого около 700 м, постоянно активен и изменяет свою форму. Вулкан имеет 47 кратеров, так же, как и все вулканы Камчатки. Для вулкана характерны кратеры, расположенные на склонах вулкана, так же, как и все вулканы Камчатки. В настоящее время их насчитывается более 80.

Список литературы

Влодавек В.И. Ключевская группа вулканов // Труды Камчатской вулканологической станции. 1940. № 1. С. 2-124.

Влодавек В.И., Пилп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюлл. вулканол. станции. // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 5-95.

Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. / Отв. ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. 1991. Т. 1. 302 с.

Заварский А.Н. Северная группа вулканов Камчатки // Камчатка. 1935. Вып. 1. 55 с.

Пилп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды лаборатории вулканологии. 1956. № 11. С. 3-303.

Потенциальная опасность

Опасность при извержениях вулкана представляют тепловые облака, лавоплавы, лавовые и газавые потоки. При ночных лавоплавах, возникающих при пароксизмальных эксплозивных извержениях, и образовании газавых потоков существует реальная угроза п. Ключи и его коммуникациям.

Высока потенциальная опасность вулкана для нехиднородных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т.к. высота его тепловых выходов может достигать 10-15 км над уровнем моря, продолжение тепловых шлейфов — до нескольких тысяч км в различных направлениях от вулкана, продолжительность извержений — от нескольких лет до полутора лет.

Лавоплавы возможны в:

- п. Ключи (30 км к северу от вулкана)
- п. Козыревск (47 км к западу)
- п. Усть-Камчатск (120 км к северо-востоку)
- п. Мильково (200 км к юго-западу)
- г. Петропавловск-Камчатский (360 км к юго-юго-западу)

Рис. 4.4. Пример описания вулкана в ИС VOKKA. Вулкан Ключевской

Для каждого извержения приведены краткие описания и, если известны: точные или приблизительные даты их начала и окончания, предвестники, динамика, состав и объем изверженных продуктов (лавы и пирокластики), энергия, VEI, максимальная высота эруптивной колонны и другие характеристики (рис. 4.5).

Вулкан Ключевской. Извержения															
1697	1720	1727	1737	1762	1767	1770	1772	1788	1807	1812	1821	1829	1840	1848	1852
1865	1877	1882	1890	1896	1904	1907	1909	1913	1915	1922	1923	1925	1929	1931	1932
1937	1938	1944	1945	1946	1951	1953	1956	1960	1965	1966	1971	1974	1980	1983	1984
1988	1989	1993	1995	1997	1998	1999	2003	2005	2007	2008	2009	2012	2013	2015	2016
2017	2018														

Начало: 1720
Окончание: 1721

Характеристика: в центральном кратере, эксплозивное стромболианское, эксплозивное вулканское

Продукты извержения: андезитобазальты

Описание: Из работы (Пийп, 1956, стр. 83-84): "Геодезисты Евреинов и Лужин, посланные Петром Первым исследовать Курильские острова, зимовали с октября 1720 г. по апрель 1721 г. в селении Ключи (тогдашний Нижнекамчатск), откуда они ежедневно могли наблюдать Ключевскую сопку. Очевидно, на основании этих наблюдений Евреинов в своем каталоге пунктов Камчатки сообщает о Ключевской сопке (Евтеев, 1950, стр. 96): «Гора каменная горит днем и ночью». Утверждение в этой фразе ясно говорит, что вулкан в это время находился в состоянии извержения, вероятнее всего умеренного. О состоянии вулкана между 1698 и 1720 гг. определенных сведений нет, но очевидно, что извержения происходили и в эти годы. На основании каких-то неизвестных нам данных Кулаков (1936) указывает, например, на одно из извержений, случившихся между 1702 и 1711 гг. О том, что Ключевская сопка в течение этого периода временами извергалась, можно судить из отдельных сообщений И. П. Козыревского, который с 1700 по 1720 г. безвыездно прожил на Камчатке. Например, «Санктпетербургские ведомости» (№25, 26 марта 1730 г.), сообщая о приезде Козыревского в Москву, говорят о нем: «В протчем привез он также о имеющейся недалеко от реки Камчатки огонь испускающей горе Сопке имянуемой, которая огонь дым горящие камни и пепел выбрасывает... обстоятельное известие»."

Литература:
Евтеев О.А. Первые русские геодезисты на Тихом океане / Отв. ред. Салищев А.К. 1950. 105 с. 📄
Кулаков В.С. О деятельности Камчатских вулканов // Природа. 1936. № 8. С. 21-28. 📄
Пийп Б.И. Ключевская сопка и её извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды лаборатории вулканологии. 1956. № 11. С. 3-303. 📄

Рис. 4.5. Пример описания извержения в ИС VOKKIA. Извержение 1720 г. вулкана Ключевской

Модуль «Библиография» содержит библиографические списки литературы по каждому вулкану. Реализовано их автоматическое формирование на основе метаданных, извлекаемых с помощью SQL-запросов из БД репозитория научных публикаций ИВиС ДВО РАН (рис. 4.2). По состоянию на октябрь 2018 г. в системе имеется 1 947 библиографических ссылок на публикации по 172 наземным и 46 подводным вулканам.

Модуль «Мониторинг» содержит сведения о текущем состоянии, Авиационных цветовых кодах, назначаемых действующим вулканам Камчатки и Курил учеными KVERT и SVERT, и прогнозе опасности вулканов для авиации. Реализована возможность визуализации фотоснимков вулканов, полученных с использованием систем видеонаблюдения за вулканами Камчатки ИВиС ДВО РАН/ИЦ ДВО РАН (Sorokin et al., 2016) и КФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 4.6); спутниковых снимков Himawari-8 с пепловыми облаками и шлейфами с сайта Токио VAAC (<http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/>) и Terra и Aqua (MODIS) с термальными аномалиями близко к реальному времени с сайта Гавайского Университета (<http://modis.higp.hawaii.edu>) и др.

Модуль «Изображения» содержит фотографии вулканов и их извержений, рисунки, карты, схемы, спутниковые и аэрофотоснимки, анимации, а также видео-изображения в различных форматах. Каждое изображение сопровождается сведениями об авторах и дате создания, ссылкой на источник, текстовыми комментариями.

Модуль «Геосервисы» включает интерактивные карты, для создания которых применяются технологии, основанные на международных стандартах OGC WMS (Web Map Services), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service) и KML (Keyhole Markup Language). Основным источником данных для геосервисов являются ГИС, созданные в ИВиС ДВО РАН разными коллективами авторов. Векторные и растровые слои ПД публикуются на картографическом сервере, реализованном с использованием ПО GeoServer. Каждый слой ПД сопровождается подробным описанием в Каталоге метаданных, включающим сведения о пространственном охвате, источнике данных, авторах, дате создания и публикации, список литературы и др. На сегодняшний день в ИС VOKKIA реализованы геосервисы: «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги», «Ледники Северной группы вулканов Камчатки», «Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ-50)», «Голоценовый вулканизм Камчатки», «Карта ночных инфракрасных источников (вулканы и пожары)».

Например, геосервис «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» показывает местоположение наземных и подводных вулканов региона и их основные характеристики, источниками данных для него являются БД «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги и их извержения» и БД «Позднекайнозойские подводные вулканы Тихого океана» (Рашидов и др., 2010; Романова и др., 2012а) (рис. 4.3). Геосервис «Карта ночных инфракрасных источников (вулканы и пожары)» отображает термальные аномалии, полученные методом Nightfire (<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/9/4423>) по спутниковым данным прибора VIIRS.

Основные возможности геосервисов включают навигацию по изображению, его масштабирование, отображение легенды, измерение расстояний и площадей, получение информации об отмеченном на карте объекте, поиск объектов с помощью многокритериальных запросов к связанной со слоем атрибутивной таблице и отображение результатов поиска на карте.

4.2.2. База данных ИС VOKKIA

Для хранения атрибутивных данных в ИС VOKKIA служит БД «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги и их извержения» (Романова и др., 2012а). БД включает таблицы: основные – «Вулканы», «Извержения», «Изображения»; справочники, используемые при заполнении полей основных таблиц; служебные – для хранения информации о пользователях, истории создания и редактирования записей и др.

В настоящее время база данных содержит описания 289 вулканов (177 наземных и 112 подводных), в том числе 70 действующих наземных вулканов; краткие описания 348 исторических извержений 52 наземных вулканов; 2 122 изображения вулканов и их извержений.



Рис. 4.6. Изображения вулканов с веб-камер систем видеонаблюдения ИВИС ДВО РАН/ВЦ ДВО РАН и КФ ФИЦ ЕГС РАН

4.2.3. Анализ вулканологических данных в ИС VOKKIA

Для наглядного представления ряда эруптивных событий в хронологической последовательности в системе используются интерактивные графики типа лент времени – таймлайн (от английского *timeline*), позволяющие выделять периоды покоя и активности вулканов. Например, для вулкана Безымянный насчитывается 51 эксплозивное извержение, наибольшее количество которых произошло в период 1977–2017 гг. (рис. 4.7).

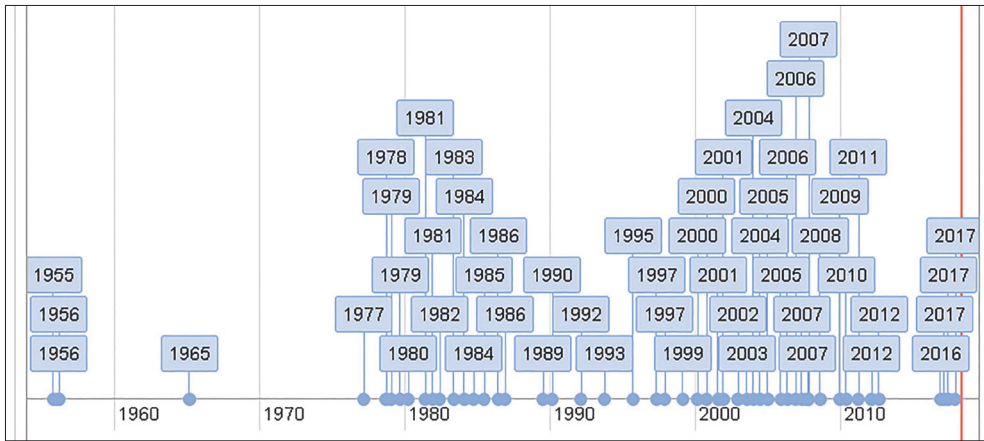


Рис. 4.7. Даты исторических извержений вулкана Безымянный. Данные ИС VOKKIA

Веб-интерфейс ИС дает возможность поиска извержений по различным параметрам – названию вулкана, дате, характеру извержения (эффузивное, эксплозивное, экструзивное), типу эксплозивных событий (стромболианский, вулканский, плиннианский, пелейский) и др. Характер извержения вулкана, форма его постройки, типы эруптивных продуктов обусловлены составом магматического вещества. Например, для вулканов, поставляющих на поверхность земли магму среднего и кислого составов, характерны экструзивные, эксплозивные и эффузивные извержения, форма построек вулканических аппаратов – экструзии или лавовые куполы, продукты эксплозивных извержений – тефра, пирокластические потоки, пирокластические волны, пеплы облаков пирокластических потоков; продукты эффузивных извержений – короткие вязкие лавовые потоки (Гирина, 1998).

4.3. ИС KVERT

4.3.1. Назначение системы и особенности ее реализации

С 2012 г. мониторинг вулканов выполняется с использованием ИС KVERT (Гирина и др., 2018a; Gordeev, Girina, 2014). Основное назначение системы – автоматизация процесса подготовки KVERT-сообщений, в том числе VONA, обеспечение хранения оперативных данных в БД и их статистического анализа. Реализовано разграничение прав доступа к ресурсам системы в зависимости от статуса пользователя.

Доступная всем пользователям сети Интернет на официальном сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) часть ИС содержит каталог с краткими сведениями об активных вулканах (основные характеристики, виды мониторинга, потенциальная опасность для авиации и населения, даты последних извержений и т. д.) (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcano>), описание АЦК опасности вулканов для авиации (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/color>), интерактивную карту активных вулканов с их АЦК (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/map>), архив KVERT-сообщений (VONA, Weekly и Daily Releases на английском языке и еженедельных на русском языке) (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/>) и др. Веб-интерфейс ИС позволяет просматривать сообщения из БД для одного или всех вулканов за любую дату с 2012 г. по настоящее время (архив содержит 4 110 сообщений), а также информационные и оперативные сообщения в текстовом формате за период 2003–2012 гг. (1 383 сообщения) (рис. 4.8).

Часть ИС, доступная только сотрудникам KVERT, включает сервисы:

- управление справочными таблицами БД;
- оперативная подготовка и рассылка по e-mail VONA и других сообщений о состоянии активности вулканов пользователям;

(1) VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR AVIATION (VONA)		
(2) Issued:	20181015/0015Z	
(3) Volcano:	Ebeko (CAVW #290380)	
(4) Current aviation colour code:	ORANGE	
(5) Previous aviation colour code:	orange	
(6) Source:	KVERT	
(7) Notice Number:	2018-105	
(8) Volcano Location:	N 50 deg 41 min E 156 deg 0 min	
(9) Area:	Northern Kuriles, Russia	
(10) Summit Elevation:	3791.68 ft (1156 m)	
(11) Volcanic Activity Summary:	A moderate explosive activity of the volcano continues. Visual data from Severo-Kurilsk showed an explosion sent ash up to 3.5-4 km a.s.l., an ash plume is extending to the east from the volcano. A moderate eruptive activity of the volcano continues. Ash explosions up to 19,700 ft (6 km) a.s.l. could occur at any time. Ongoing activity could affect low-flying aircraft and airport of Severo-Kurilsk.	
(12) Volcanic cloud height:	11480-13120 ft (3500-4000 m) AMSL Time and method of ash plume/cloud height determination: 20181015/0012Z - Visual data	
(13) Other volcanic cloud information:	Distance of ash plume/cloud of the volcano: 3 mi (5 km) Direction of drift of ash plume/cloud of the volcano: E	
(14) Remarks:		
(15) Contacts:	Dr. Olga A. Girina, Head of KVERT, IVS FEB RAS girina@kscnet.ru +74152202044 Duty scientist: +79622825253	
(16) Next Notice:	A new VONA will be issued if conditions change significantly or the colour code is changed. VONAs are posted at http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index_eng.php . In Russia, KVERT, on behalf of the Institute of Volcanology and Seismology (IVS) FEB RAS, is responsible for providing information on volcanic activity to international air navigation services for the airspace users.	

Рис. 4.8. Пример отображения VONA-сообщения № 2018–105 за 15 октября 2018 г.

- графическая визуализация и статистический анализ данных об эруптивных событиях;
- поиск и визуализация результатов моделирования распространения пепловых облаков от вулканов.

4.3.2. База данных ИС KVERT

Справочная информация о вулканах, KVERT-сообщения об их состоянии и текущих АЦК и др. хранятся в БД «Активность вулканов Камчатки и Северных Курил» (Романова и др., 2016). БД включает основные таблицы: «Активные вулканы», «VONA-сообщения», «Weekly-сообщения», «Daily-сообщения», «Эруптивные события» и др., а также вспомогательные таблицы-справочники, используемые при заполнении полей основных таблиц.

В настоящее время база данных содержит 4110 KVERT-сообщений, в том числе 906 VONA, 332 Weekly, 2338 Daily Releases, 349 еженедельных, а также основанные на VONA характеристики 891 взрывчатого события 11 вулканов, извергавшихся в 2012–2018 гг. (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик (Толбачинский дол), Кизимен, Карымский, Жупановский, Камбальный – на Камчатке; Алаид, Эбеко, Чикурачки, пик Сарычева – на Курилах).

4.3.3. Сервис подготовки и рассылки сообщений ИС KVERT

Для повышения оперативности и упрощения процесса подготовки сообщений KVERT разработано автоматизированное рабочее место дежурного, находящееся в закрытой части ИС и доступное только сотрудникам KVERT после авторизации. Процесс создания сообщений состоит из нескольких этапов: пошагового заполнения полей веб-форм, разработанных для каждого вида сообщений, предварительного просмотра сформированного сообщения, автоматической отправки его по электронной почте всем заинтересованным службам и пользователям.

KVERT-сообщения сохраняются в БД «Активность вулканов Камчатки и Северных Курил» и отображаются на сайте KVERT (см. рис. 1.4) и в модуле «Мониторинг» ИС VOKKIA. В случае выпуска VONA о пепловом облаке или о смене АЦК в БД поступает детальная информация о событии – дата, время, минимальная и максимальная высоты эруптивной колонны н.у.м., продолжительность события, направление и протяженность пеплового шлейфа, источник данных, АЦК и т. д. Одновременно автоматически запускается процесс репликации данных о событии в АИС «Сигнал», при этом СУБД ИС VOKKIA и KVERT (MariaDB) является master-сервером, а СУБД (MySQL) АИС «Сигнал» – slave-сервером (Королев и др., 2018).

4.3.4. Сервис поиска и визуализации результатов моделирования

Результаты моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов, выполненного в АИС «Сигнал» по модели PUFF на основе VONA, синхронно копируются с сервера ВЦ ДВО РАН на сервер ИВиС ДВО РАН с помощью протокола rsync (<https://download.samba.org/pub/rsync/rsync.html>) (см. главу 5). Актуальные на текущие сутки анимированные результаты моделирования (рис. 4.9) отображаются на сайте KVERT в соответствующих этим событиям сообщениях

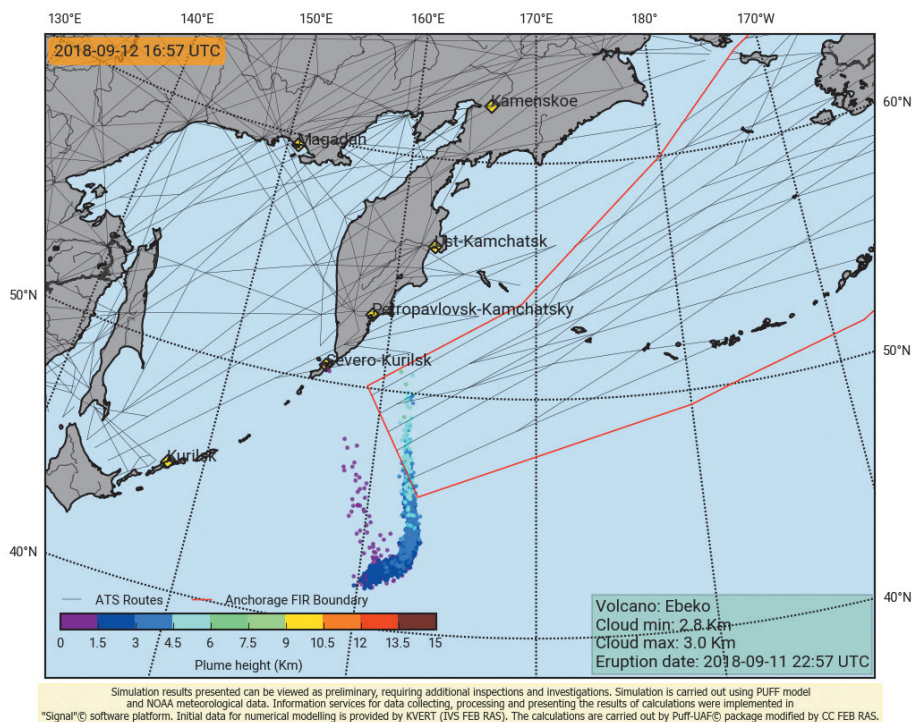


Рис. 4.9. Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа от вулкана Эбеко 11 сентября 2018 г., размещенные на сайте KVERT ИВиС ДВО РАН

VONA и в модуле «Мониторинг» ИС VOKKIA. Доступ к полному архиву результатов моделирования (gif-файлы анимаций и до 24 кадровых png-файлов) имеют сотрудники KVERT. Для работы с архивом создан сервис, позволяющий выбирать результаты моделирования для конкретного вулкана или сообщения VONA на заданную дату или за определенный период времени (рис. 4.10). С октября 2016 г. по октябрь 2018 г. в архив ИС KVERT поступило 409 результатов моделирования (8 492 файла .gif и .png).

4.3.5. Сервис графической визуализации данных и их анализ в ИС

Для анализа постоянно растущего объема данных, связанных с взрывными событиями, описанными в VONA, в системе создан сервис online-инструментов для их графической визуализации.

Инструмент «Высота подъема пепловых облаков» позволяет выявлять наиболее активные вулканы в заданный отрезок времени; частоту выбросов пепла, максимальную высоту подъема пепловых облаков для одного, нескольких или всех вулканов и т. д. Для визуализации результатов выборки событий в хронологической последовательности используются интерактивные диаграммы (столбчатые, линейные или точечные), размещенные на шкале таймлайн (рис. 4.11). Для любого события во всплывающем окне показываются: название вулкана, дата и время события, высота подъема пеплового облака. В случае построения диаграммы для

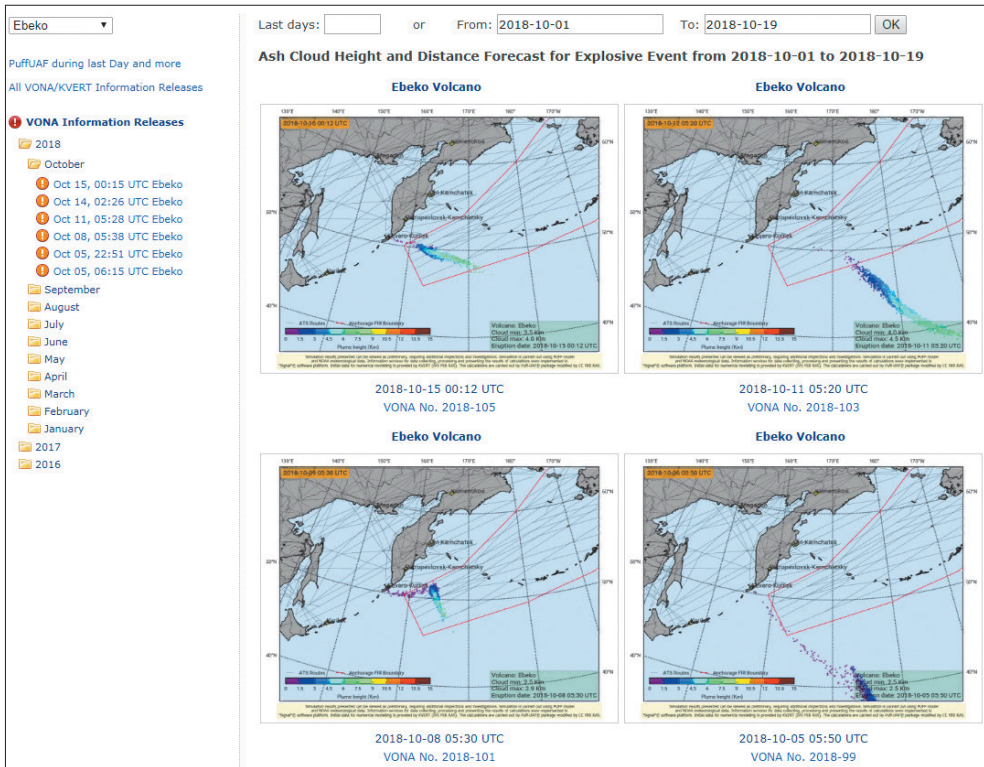


Рис. 4.10. Пример визуализации результатов моделирования для вулкана Эбеко за период с 1 по 15 октября 2018 г.

одного вулкана под ней отображаются распределение количества выбросов по месяцам и изменение АЦК вулкана в течение рассматриваемого периода времени. Например, в 2013–2018 гг. во время извержения вулкана Жупановский пепловые облака при эксплозиях поднимались максимально на 10,5 км н.у.м. (7 сентября 2014 г.), в этот же месяц отмечалось наибольшее количество пепловых выбросов – 22 (рис. 4.11а). Максимальный подъем пепловых облаков на вулкане Ключевской был на 9 км н.у.м. (2 марта 2017 г.), на вулкане Шивелуч – на 12 км н.у.м. (14 июня и 23 июля 2017 г.) Время от времени эксплозивные события на Ключевском и Шивелуче происходили одновременно (рис. 4.11б). Среди вулканов Камчатки и Северных Курил, извергавшихся в этот период, максимальным, на 15 км н.у.м., был подъем пепловых облаков на вулкане Безымянный (20 декабря 2018 г.), на 10 км н.у.м. и выше неоднократно поднимались пепловые облака вулканов Шивелуч, Безымянный и Жупановский (рис. 4.11в).

Инструмент «Распространение пепловых облаков» дает возможность анализировать направления и дальность распространения пепловых облаков и шлейфов как для всех вулканов одновременно, так и для отдельных или нескольких за различные периоды наблюдений (рис. 4.12). Например, с октября 2012 г. по апрель 2018 г. отмечено 275 событий для вулкана Ключевской, 272 для вулкана Шивелуч и 106 для вулкана Жупановский.

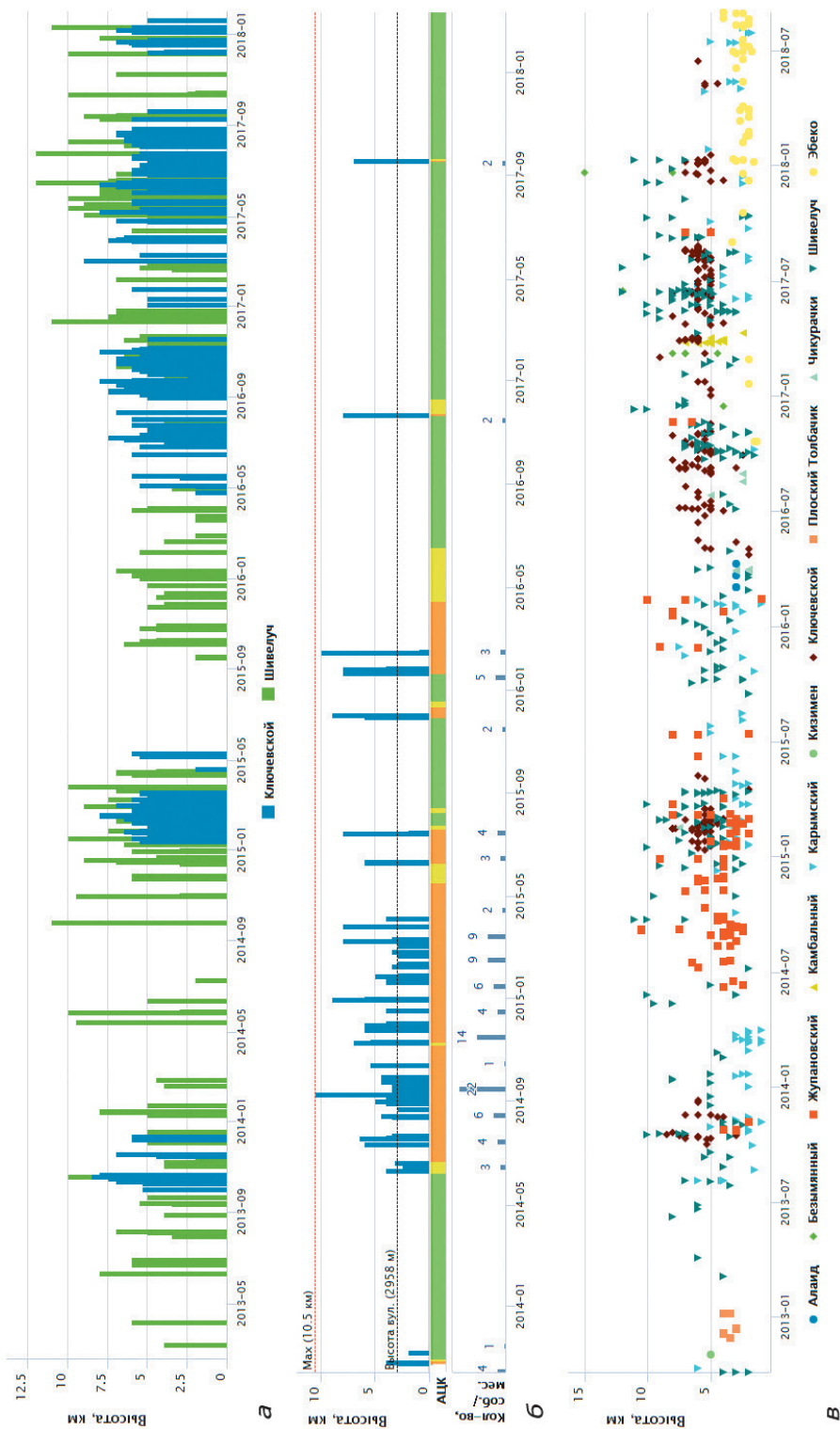


Рис. 4.11. Эксплозивные события на вулканах в 2013–2018 гг.: а) Жулановский, б) Ключевской и Шивелуч, в) Камчатки и Северных Курил. Данные ИС KVERT. АЦК – Авиационный цветовой код вулкана

Интерактивные диаграммы повторяемости показывают, что во время эксплозивных событий с выносом пепла выше 4 км н.у.м. (64,1 %) преобладающим направлением распространения пепловых облаков от вулкана Шивелуч было восточное (23,1 %), а дальность распространения наибольшего количества пепловых облаков была < 100 км (17,2 %) (рис. 4.12а). Преобладающим направлением распространения пепловых облаков для всех извергавшихся вулканов Камчатки и Северных Курил также было восточное (20,1 %) (несомненный вклад Шивелуча), наибольшее количество эксплозий поднимало пепловые облака на 3–6 км н.у.м. (56,4 %). Преобладающими направлениями перемещения пепловых облаков далее 200 км от вулканов были восточные (3,04 %) и восток-юго-восточные (3,4 %), далее 1000 км от вулканов – также восточные (0,2 %) и восток-юго-восточные (0,1 %) (рис. 4.12б).

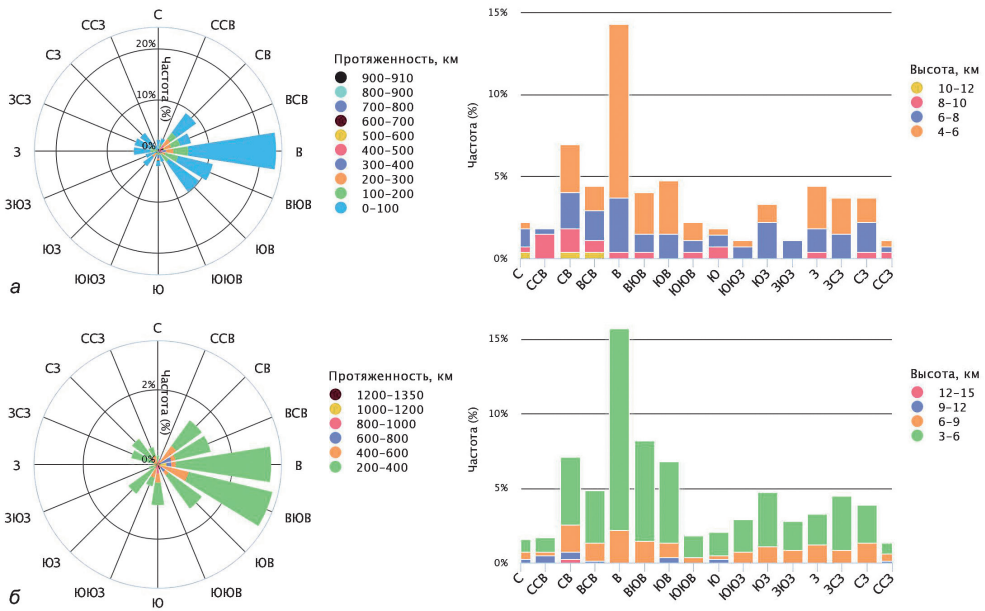


Рис. 4.12. Направления распространения пепловых шлейфов в 2012–2018 гг.: а) от вулкана Шивелуч, б) от всех вулканов Камчатки. Данные ИС KVERT

Созданные инструменты для графической визуализации данных и их статистического анализа могут помочь обнаружить взаимосвязи, закономерности и тенденции изменения вулканогенных процессов во времени – например, периоды активизаций вулканизма на полуострове, одновременность извержений тех или иных вулканов и т. д. Анализ оперативных данных, содержащихся в ИС KVERT, позволяет выявлять наиболее активные вулканы в определенный период времени; частоту и высоту выбросов пепла, преобладающие направления перемещения и протяженность пепловых облаков и шлейфов за различные периоды наблюдений.

4.4. Взаимодействие ИС VOKKIA и KVERT

Реализована интеграция ИС KVERT и VOKKIA на уровне данных (см. рис. 4.2). Например, данные БД системы KVERT, такие как АЦК, сведения о текущем состоянии и прогнозе опасности активных вулканов, видах их мониторинга и др., отображаются в модуле «Мониторинг» ИС VOKKIA. В свою очередь, данные БД ИС VOKKIA используются в ИС KVERT: информация об активных вулканах из модуля «Вулканы» – при формировании KVERT-сообщений и др.; даты последних извержений из модуля «Извержения» – в каталоге активных вулканов; фотографии и анимации из модуля «Изображения» – для демонстрации активности вулканов и т. д.

Глава 5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «СИГНАЛ» ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

5.1. Назначение АИС «Сигнал»

С 2008 г. в ДВО РАН в рамках целевых программ «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России» и «Информационно-телекоммуникационные ресурсы ДВО РАН» была начата работа по формированию новой инструментальной инфраструктуры для исследования и оперативного мониторинга опасных природных явлений в Дальневосточном регионе. Это позволило создать региональную сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН (Быков и др., 2009) и систему видеонаблюдения за вулканами Камчатки (Sorokin et al., 2016б).

Анализ причин и последствий природных катастрофических явлений, в том числе и таких как извержения вулканов, требует проведения комплексных исследований, основанных на использовании результатов обработки большого числа разнородных научных данных. Для решения этих задач и автоматизации операций, связанных с работой сетей наблюдений, была создана автоматизированная информационная система (АИС) «Сигнал» (Korolev et al., 2015; Sorokin et al., 2015), развернутая на базе ресурсов Центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (г. Хабаровск) (Sorokin et al., 2017б). Она обеспечивает решение следующих базовых задач:

- централизованное хранение информации по всем видам исследований и работ (инструментальные данные и результаты их обработки, технологические данные о состоянии оборудования и каналов связи и т. п.);
- паспортизация объектов и оборудования системы видеонаблюдения;
- многопользовательский режим работы, разграничивающий права пользователей для доступа к различным архивам данных, запуска сервисов по обработке информации, учету объектов и т. п.;
- наличие универсального интерфейса пользователя с единым центром аутентификации.

АИС «Сигнал» состоит из набора специализированных компьютерных модулей и подсистем (рис. 5.1), которые можно разделить на три вида:

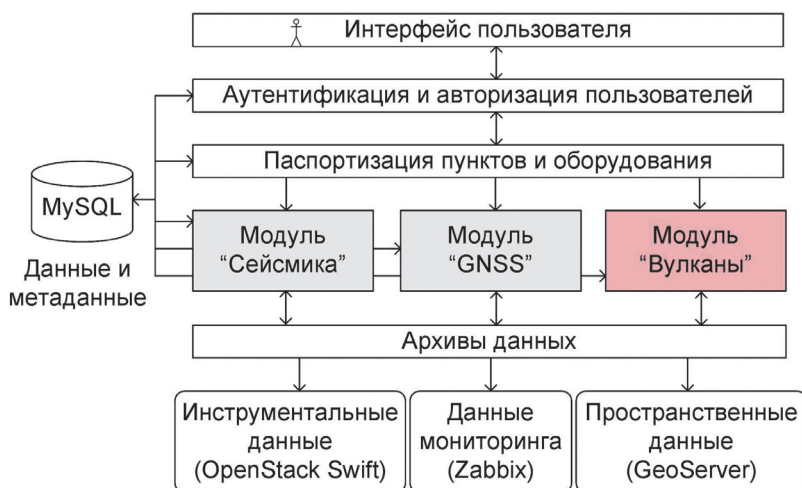


Рис. 5.1. Общая архитектура и схема взаимодействия программных модулей АИС «Сигнал»

- системные, отвечающие за решение вышеперечисленных базовых задач;
- тематические, обеспечивающие сбор и обработку инструментальных данных отдельных сетей наблюдений;
- сервисные, расширяющие возможности системного и тематического программного обеспечения, в частности, в использовании необходимых вспомогательных компьютерных решений, например, для работы с пространственной информацией (Geoserver, Leaflet), распределенного хранения данных (OpenStack Swift), мониторинга состояния измерительных средств (Zabbix).

В рамках тематического направления, связанного с комплексным анализом активности вулканов Камчатки и Северных Курил, в АИС «Сигнал» создан модуль «Вулканы», состоящий из набора программных средств, обеспечивающих работу систем видеонаблюдения и моделирования траектории движения пепловых облаков (рис. 5.2). Важнейшим вспомогательным инструментом является созданный сервис для обмена и взаимного доступа к справочным данным, содержащимся в различных специализированных компьютерных системах.

5.2. Система моделирования распространения пепловых облаков от вулканов

5.2.1. Источник данных для моделирования

Для проведения моделирования распространения пепловых облаков от вулканов необходимы наличие источника оперативной информации по произошедшему взрывному событию и набор формализованных значений его характеристик. Применяя реализованную репликацию баз данных ИС VOKKIA, ИС KVERT и АИС «Сигнал», стало возможным использовать в качестве такого источника VONA-сообщения, в которых содержатся данные об активности вулканов Камчатки и Северных Курил, их Авиационные цветовые коды, а также требуемая информа-

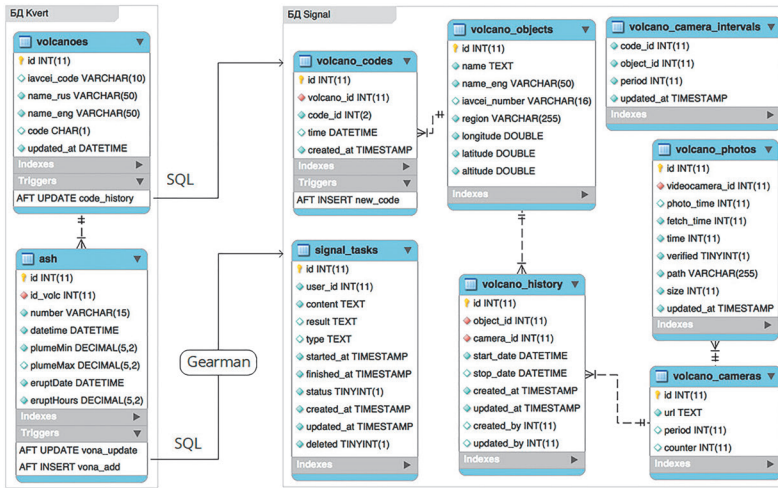


Рис. 5.2. Фрагмент схемы данных АИС «Сигнал», обеспечивающий работу модуля «Вулканы»

ция по датам, времени эксплозивных событий, высотам эруптивных колонн и т. д. В результате, на основе модифицированной программной реализации модели PUFF (см. главу 2) создана система моделирования распространения пепловых облаков (рис. 5.3). Алгоритм ее работы включает следующие шаги:

Данные из сообщения VONA, содержащие основные характеристики эксплозивного события (дата и время, длительность, высота пеплового облака н.у.м. и т. п.), передаются в базу данных АИС «Сигнал», где на их основе формируется расчетное задание на моделирование перемещения пеплового облака. Задание представляет собой JSON-объект, который с помощью UDF-расширения (<https://launchpad.net/gearman-mysql-udf>) для СУБД MySQL

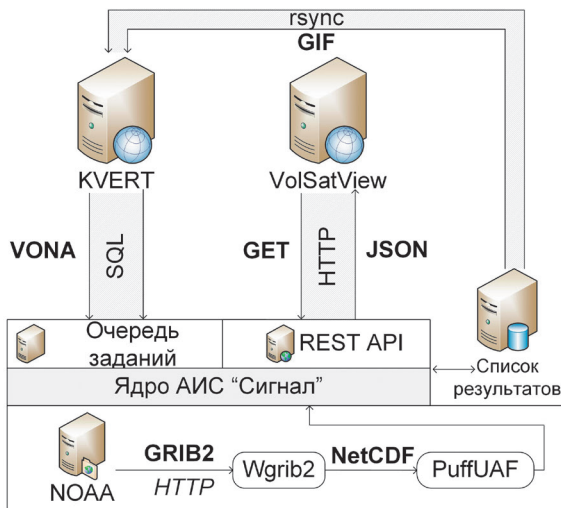


Рис. 5.3. Концептуальная схема работы системы моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов

Результаты PUFF-моделирования							
ID	Пользователь	Параметры	Создано	Выполнено	Статус	Файлы	
1455	SIGNAL Королев Сергей	Вулкан: Шивелуч Дата события: 2018-07-19 00:00:00 UTC Высота пеплового облака: 1000 - 2000 м	2018-07-19 11:41:07	2018-07-27 18:04:17	Завершено	11.76 МБ	✘
1453	VSV	Вулкан: Ключевской Дата события: 2017-10-05 12:00:00 UTC Высота пеплового облака: 1000 - 9000 м	2017-11-23 22:52:07	2017-11-23 22:54:31	Завершено		✘
1450	KVERT VONA: 2017-251	Вулкан: Эбеко Дата события: 2017-10-17 22:17:00 UTC Высота пеплового облака: 2000 - 2500 м	2017-10-18 08:35:56	2017-10-18 08:41:06	Завершено		✘
1449	KVERT VONA: 2017-249	Вулкан: Шивелуч Дата события: 2017-10-13 02:50:00 UTC Высота пеплового облака: 1500 - 2000 м	2017-10-13 13:33:16	2017-10-13 13:39:19	Завершено		✘
1444	KVERT VONA: 2017-245	Вулкан: Шивелуч Дата события: 2017-10-11 00:00:00 UTC Высота пеплового облака: 10000 - 10000 м	2017-10-11 13:06:27	2017-10-11 13:12:38	Завершено		✘
1443	KVERT VONA: 2017-242	Вулкан: Карымский Дата события: 2017-10-03 21:23:00 UTC Высота пеплового облака: 4000 - 5000 м	2017-10-04 07:56:33	2017-10-04 08:02:34	Завершено		✘
1440	VSV	Вулкан: Камбальный Дата события: 2017-03-24 21:10:00 UTC Высота пеплового облака: 2000 - 6000 м	2017-10-02 19:23:26	2017-10-03 14:38:36	Завершено		✘

Рис. 5.4. Экранная форма пользовательского интерфейса АИС «Сигнал» для отображения результатов моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов

передается на сервер очереди Gearman (<http://gearman.org>), где далее обрабатывается с помощью Puff-UAF.

Полученный результат публикуется в сводных каталогах совместно со справочной, оперативной и инструментальной информацией, доступной через разработанные пользовательский и сервис-ориентированный интерфейсы АИС «Сигнал» (рис. 5.4), и на сайте KVERT ИВиС ДВО РАН.

5.2.2. Подготовка метеорологических данных

Для организации работы с метеорологическими данными разработаны несколько вспомогательных подсистем, которые обеспечивают копирование и синхронизацию актуального локального архива с прогностической продукцией модели GFS, а также поиск в нем оптимального набора grib2 файлов для проведения моделирования относительно заданных временных условий. Реализованный алгоритм создания набора grib2 файлов (далее – «коллекции») имеет следующий вид:

1. Формирование коллекции начинается с поиска самого свежего прогноза, содержащего записи, актуальные на время, предшествующее началу моделирования.

2. Из набора файлов этого прогноза выбирается самый первый файл с данными, предшествующими по времени началу моделирования, и следующий за ним файл (если первый файл содержал данные анализа).

3. Если текущий прогноз является последним доступным, формирование коллекции продолжается путем выбора последующих файлов набора до тех пор, пока они не покроют все время моделирования.

4. В противном случае происходит переход к следующему по времени прогнозу и выбор из него (если выбранные до этого файлы еще не покрывают все время моделирования) первого файла с данными анализа и файла, следующего по времени сразу за ним.

5. Если выбранные файлы не покрывают все время моделирования, то происходит переход к третьему шагу алгоритма.

В качестве примера на рис. 5.5 схематически изображен процесс формирования коллекции метеоданных для моделирования распространения пеплового облака во время извержения, произошедшего между 18:00 и 21:00 UTC 10 мая 2014 г., запущенный на расчет между 06:00 и 12:00 UTC 11 мая 2014 г. Коллекция метеоданных покрывает временной интервал моделирования, равный 18 ч. Используется прогностическая продукция трех расчетов модели GFS.

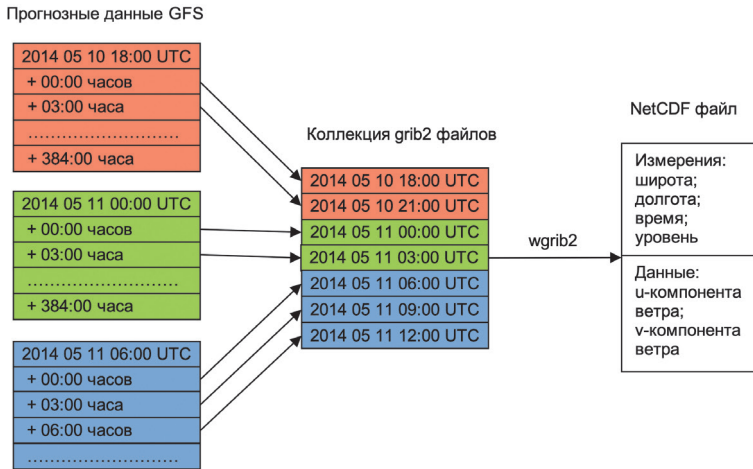


Рис. 5.5. Пример формирования коллекции метеоданных на период моделирования 18:00 UTC 10 мая 2014 г. – 12:00 UTC 11 мая 2014 г.

Метеорологические поля из всех файлов сформированной коллекции при помощи программы wgrib2 заносятся в результирующий NetCDF файл с четырехмерной структурой (latitude, longitude, time, level).

5.2.3. Выполнение численных расчетов

Полученный NetCDF файл, а также значения основных параметров моделирования, автоматически заполненных по данным VONA-сообщений, используются в качестве входных данных для исполняемого файла ruff пакета Puff-UAF. После запуска и выполнения программы создаются файлы с описанием координат и высот модельных частиц пеплового облака (их количество соответствует периоду и интервалу моделирования) с представлением информации в требуемом формате (GIF, KML, Shape и т. п.). Помимо автоматического режима расчетов, применяемого при выпуске VONA, в АИС «Сигнал» реализован пользовательский интерфейс, дающий возможность экспертам провести расчет траектории движения пепла с детальным указанием всех параметров модели PUFF. Пример его экранной формы приведен на рис. 5.6.

Оба режима расчетов позволяют заносить результаты моделирования в справочник (см. рис. 5.4), доступный также информационным системам VOKKIA, KVERT и VolSatView. Результаты моделирования, полученные в автоматическом режиме при создании VONA, передаются по протоколу rsync (<https://download.samba.org/pub/rsync/rsync.html>) в ИС KVERT (см. главу 4).

Вулкан:	Шивелуч	[-volc]
Время извержения (UTC):	20.05.2016 00:00	[-eruptDate]
Высота пеплового облака (в км):		
минимальная:		[-plumeMin] ?
максимальная:		[-plumeMax]
Дополнительные параметры		
Число частиц пепла:	2000	[-nAsh] ?
Нормальное распределение размера частиц в метрах		
log ₁₀ математического ожидания:	-6	[-ashLogMean]
log ₁₀ среднеквадратического отклонения:	1	[-ashLogSdev]
φ-распределение размеров частиц:		[-phiDist] ?
Начальное вертикальное рассеяние (в км.):	3	[-plumeZwidth] ?
Начальное горизонтальное рассеяние (в км.):	0	[-plumeHwidth] ?
Вертикальное распределение частиц:	linear	[-plumeShape] ?
Параметры моделирования (в часах):		
Длительность извержения:	3	[-eruptHours] ?
Длительность моделирования:	24	[-runHours]
Интервал моделирования:	6	[-saveHours]
Дополнительные параметры		
Шаг моделирования по времени (в мин.):	10	[-dtMins]
Коэффициент горизонтальной диффузии (в м ² /с):	10000	<input type="checkbox"/> turbulent [-diffuseH] ?
Коэффициент вертикальной диффузии (в м ² /с):	10	[-diffuseZ]
Модель осаждения пепла:	constant	[-sedimentation] ?
Не учитывать гравитацию	<input type="checkbox"/>	[-noFallout] ?
Результат расчетов представить в виде:		
<input type="checkbox"/>	набора графических файлов	
<input type="checkbox"/>	анимации	
<input type="checkbox"/>	файлов KML	
Создать задание		

Рис. 5.6. Пример экранной формы пользовательского интерфейса системы моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов от вулканов

5.3. Система видеонаблюдения за вулканами Камчатки

Видеонаблюдение является одним из видов инструментальных наблюдений, используемых для мониторинга и визуальной оценки состояния вулканов. Применение видеокамер позволяет удаленно непрерывно наблюдать за ними с безопасного расстояния, проводить анализ серий фотоснимков для анализа динамики извержений вулканов.

С 2009 г. сотрудниками ИВиС ДВО РАН и ВЦ ДВО РАН ведутся работы по созданию системы видеонаблюдения за вулканами Камчатки. В настоящее время в п. Ключи и г. Петропавловске-Камчатском установлены 7 видеокамер для визуального мониторинга состояния вулканов Шивелуч, Ключевской, Авачинский и Горелый (см. главы 1 и 4) (рис. 5.7) (Sorokin et al., 2016b).

С использованием АИС «Сигнал» обеспечена инвентаризация технологической и вспомогательной инфраструктуры системы видеонаблюдения за вулканами Камчатки. Для пунктов наблюдений указывается следующая информация: кодовое название на английском языке; ведомственная принадлежность; географические координаты; информация об организации, на территории которой расположен пункт наблюдений; контактные данные лица, осуществляющего надзор за работой оборудования; возможные способы и средства проезда к пункту наблюдений.

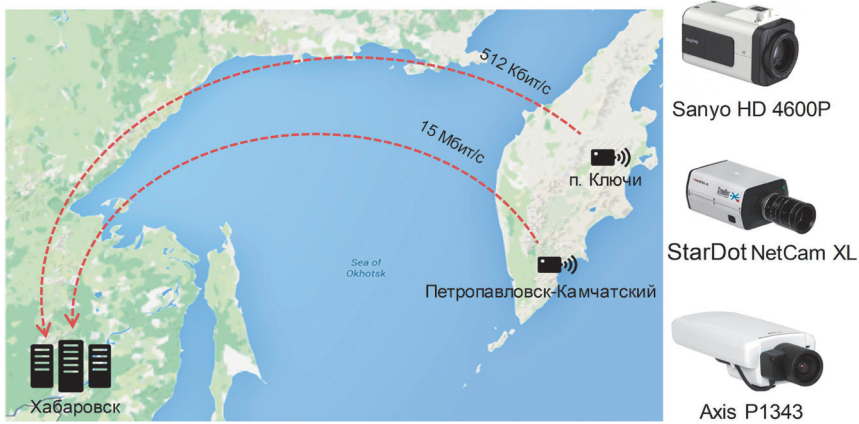


Рис. 5.7. Система видеонаблюдения за вулканами Камчатки и используемое оборудование

Паспорт видеокамеры содержит следующие поля:

- пункт наблюдений;
- организация, которой принадлежит оборудование;
- уникальное имя в сети наблюдений;
- географические координаты (могут наследоваться от пункта наблюдений);
- URL-адрес для получения фотоснимков.

Составной частью системы видеонаблюдений является Каталог активных вулканов Камчатки и Северных Курил, содержащий основную информацию о вулканах из ИС VOKKIA (название, географические координаты, номер по каталогу GVP, абсолютная высота), актуальные Авиационные цветовые коды вулканов из ИС KVERT и списки установленных видеокамер (рис. 5.8).

Список вулканов						
№	АЦК	Название	Название (англ.)	Высота (м.)	Номер IAVCEI	Видеокамеры
1.	O	Шивелуч	Sheveluch	3283	1000-27-	[SHV2] [SHV1] [SHV3]
2.	G	Ключевской	Klyuchevskoy	4750	1000-26-	[KLYU2] [KLYU]
3.	G	Ушковский	Ushkovsky	3943	1000-261	
4.	Y	Безымянный	Bezymianny	2882	1000-25-	[BEZ]
5.	G	Плоский Толбачик	Plosky Tolbachik	3085	1000-24-	[TOL]
6.	G	Ичинский	Ichinsky	3621	1000-28-	
7.	G	Кизимен	Kizimen	2485	1000-23-	[KIZ]
8.	G	Высокий	Vysoky	2161	1000-221	

Рис. 5.8. Экранная форма списка наблюдаемых вулканов Камчатки и Северных Курил

Для управления интервалом получения снимков с каждой видеокамеры предусмотрены два режима: зависящий от текущего АЦК вулкана – для Красного и Оранжевого – 1 мин, для Желтого – 5 мин, для Зеленого – 20 мин (рис. 5.9а); и постоянный, значение которого имеет приоритет по отношению к установленному для АЦК (рис. 5.9б).

При обновлении АЦК вулкана при выпуске VONA в ИС KVERT в таблицу `Signal.volcano_codes` (см. рис. 5.2) добавляется соответствующая запись. Идентификатор вулкана и его текущий АЦК передаются триггером в хранимую процедуру, выполняющую следующую последовательность действий:

– поиск всех видеокамер, осуществляющих наблюдение за этим вулканом;

– определение интервала съемки, соответствующего данному АЦК, по таблице `volcano_camera_intervals` для каждой найденной видеокамеры (см. рис. 5.2);

– установка интервала в качестве текущего для видеокамеры.

При получении каждого фотоснимка с видеокамеры для него формируется набор метаданных, содержащий следующие поля (таблица `volcano_photos` на рис. 5.2): идентификатор видеокамеры; дата и время снимка; путь к снимку в архиве; размер снимка.

Авиационные коды вулканов ([подробнее](#))

Периодичность получения снимков с видеокамер в зависимости от текущего АЦК наблюдаемого вулкана.

АЦК	Название	Интервал получения снимков (в минутах)
G	Зелёный	20
Y	Жёлтый	5
O	Оранжевый	1
R	Красный	1

Сохранить значения интервалов a

Интервал получения фотоснимков с видеокамеры KLYU2

Использовать **глобальные правила**
 Использовать **постоянный интервал**: 1 мин.

Сохранить интервал б

Рис. 5.9. Экранные формы для установки интервала получения снимков с видеокамеры: а) в зависимости от Авиационного цветового кода; б) отдельно для камеры

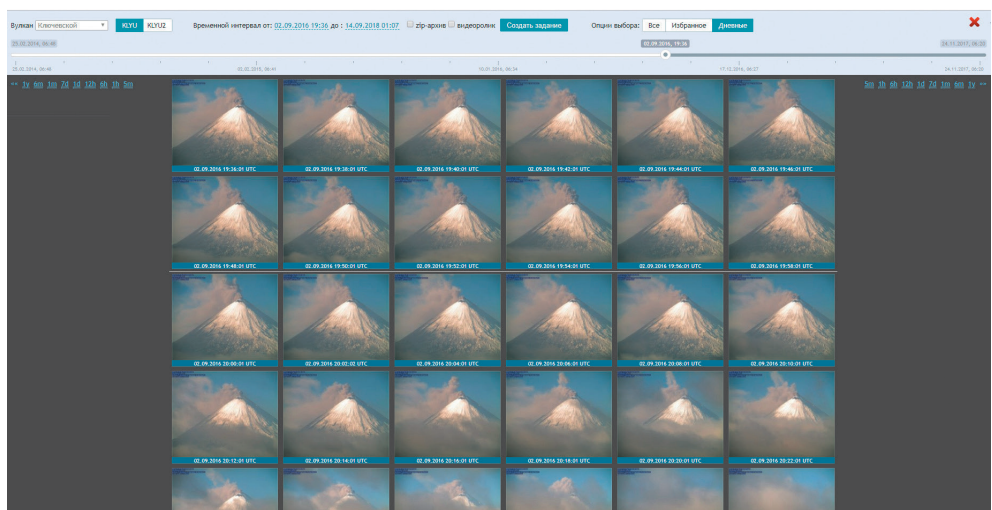


Рис. 5.10. Программный интерфейс галереи для работы с архивом фотоснимков

Сводная таблица метаданных используется при организации работы галереи фотоснимков (рис. 5.10). Интерфейс галереи позволяет формировать из архива наборы фотоснимков, отвечающие требуемым параметрам (видеокамера, временной интервал и т. п.), а также создавать видеофайлы из серии изображений по вулкану за определенный период времени.

5.4. Сервис-ориентированный интерфейс доступа к данным о вулканах Камчатки

Для оценки опасности эксплозивных извержений вулканов, подразумевающей комплексный анализ данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений, для специализированных информационных систем требуется организовать взаимный доступ не только к справочной и метаинформации, но и к средствам их обработки и полученным результатам. Это дает возможность создавать новые инструменты для совместной обработки и анализа разнородной информации. Для решения этой задачи в составе АИС «Сигнал» был создан специализированный веб-сервис, обеспечивший взаимодействие между информационными системами VOKKIA, KVERT, VolSatView и АИС «Сигнал» (Королев и др., 2018).

ИС VOKKIA и ИС KVERT являются источниками метаинформации по вулканам и их извержениям, АИС «Сигнал» и ИС VolSatView агрегируют на своих платформах архивы различных инструментальных данных, а также средства для их обработки. Реализованная репликация соответствующих таблиц систем управления базами данных (СУБД) ИС VOKKIA, ИС KVERT и АИС «Сигнал» (рис. 5.11), позволила сформировать источник управляющих команд для обеспечения оперативного режима работы систем компьютерного моделирования распространения

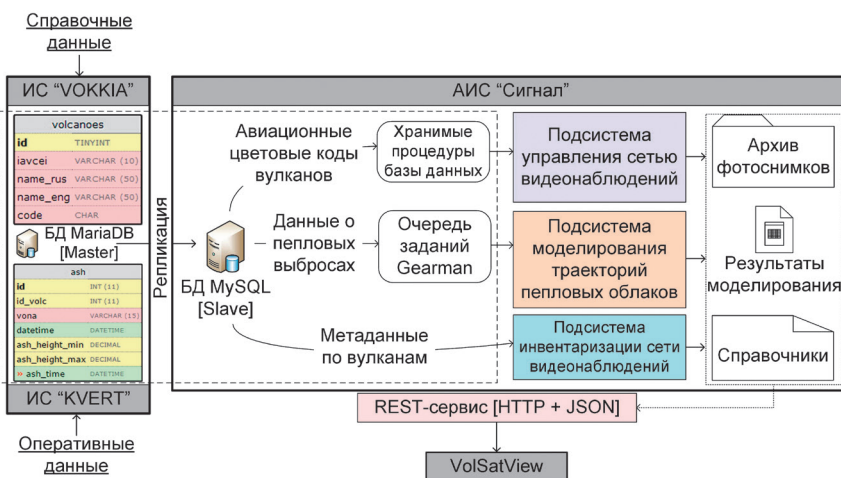


Рис. 5.11. Концептуальная схема взаимодействия ИС VOKKIA, KVERT и «Сигнал»

пепловых облаков и шлейфов от вулканов, а также видеонаблюдения за вулканами Камчатки. Из ИС KVERT в АИС «Сигнал» поступают оперативные данные, содержащиеся в сообщениях VONA: АЦК опасности вулканов для авиации и данные о пепловых облаках и шлейфах (дата, время, длительность события, высота н.у.м., номер VONA-сообщения). В случае изменения в ИС VOKKIA данных об активном вулкане (название, географические координаты, номер по каталогу GVP, абсолютная высота), происходит синхронное обновление соответствующих справочников в АИС «Сигнал» (см. рис. 5.2).

Необходимость удаленной работы с архивами и программными средствами систем видеонаблюдения и моделирования распространения пепловых облаков создала предпосылки для организации специализированного веб-сервиса. Для его создания были применены современные технологии, используемые сегодня в ведущих мировых научных центрах данных (IRIS Data Management Center, <http://service.iris.edu>; NASA Coordinated Data Analysis System, <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/WebServices/REST>; UCAR Research Data Archive, https://rda.ucar.edu/#!apps_api_desc). Интерфейс взаимодействия с ресурсами веб-сервиса реализован в соответствии с концепцией REST (Richardson et al., 2013) на основе фреймворка Yii2 (Safronov, Winesett, 2014). Работа с ним осуществляется путем отправки запросов GET и POST по протоколу HTTP (S) на адрес <http://api.signal.febras.net/<url>>, где <url> – относительный адрес, обозначающий вид запрашиваемого набора данных. В табл. 5.1 приведен сводный перечень относительных адресов, типов запросов и соответствующих им доступных наборов данных.

Таблица 5.1. Набор данных, предоставляемых веб-сервисом

URL	Тип HTTP-запроса	Набор данных
/volcanoes	GET	Информация обо всех активных вулканах
/volcanoes/#id	GET	Информация о вулкане с идентификатором #id
/cameras	GET	Информация обо всех видеокамерах
/cameras/#id	GET	Информация по видеокамере с идентификатором #id
/photos	GET	Поиск фотоснимков вулканов
/tasks	GET	Каталог результатов моделирования
/tasks	POST	Постановка моделирования на расчет
/tasks/#id	GET	Информация о задаче с идентификатором #id

При поиске фотоснимков также указываются параметры GET-запроса (табл. 5.2), поиск в архиве ведется по заданным вулканам и видеокамерам для временного периода [time – 1,5 ч; time + 1,5 ч].

При авторизованном доступе обращения к веб-сервису выдается результат, закодированный в формате JSON (Bassett, 2015). Он является текстовым, имеет простую (по сравнению, например, с XML) разметку, поддерживается большим числом языков программирования и программных библиотек. На рис. 5.12 показаны примеры запросов и соответствующих ответов при обращении к сервису.

Таблица 5.2. Параметры запроса для поиска в архиве фотоснимков

Параметр	Назначение
volcano_id	Список идентификаторов вулканов, разделенных запятыми
camera_id	Список идентификаторов видеокамер, разделенных запятыми
time	Дата и время, для которых ведется поиск; задается в формате YYYY-MMDDHHSS, где YYYY – 4 цифры года, MM – номер месяца с ведущим нулем, DD – день месяца с ведущим нулем, HH – часы с ведущим нулем, II – минуты с ведущим нулем, SS – секунды с ведущим нулем

Запрос: <http://api.signal.febras.net/volcanoes/2>

Ответ:

```
{
  "id": 2,
  "iavcei_number": "1000-26-",
  "name_rus": "Ключевской",
  "name_eng": "Klyuchevskoy",
  "code": "Y",
  "updated_at": "2018-02-09 01:45:12"
}
```

а

Запрос: <http://api.signal.febras.net/cameras/28>

Ответ:

```
{
  "id": 28,
  "name": "KLYU",
  "latitude": 56.3167,
  "longitude": 160.85,
  "volcanoes": [
    2
  ]
}
```

б

Запрос: http://api.signal.febras.net/photos?volcano_id=1&camera_id=28&time=20170303030303

Ответ:

```
"data": [
  {
    "photo_url": "http://volcano.febras.net/archive/2017/03/03/SHV1/SHV1_20170303013401.jpg",
    "thumb_url": "http://volcano.febras.net/preview/2017/03/03/SHV1/SHV1_20170303013401.jpg",
    "time": "1488504841"
  },
  {
    "photo_url": "http://volcano.febras.net/archive/2017/03/03/SHV1/SHV1_20170303013501.jpg",
    "thumb_url": "http://volcano.febras.net/preview/2017/03/03/SHV1/SHV1_20170303013501.jpg",
    "time": "1488504901"
  },
  .....
]
```

в

Рис. 5.12. Пример взаимодействия с веб-сервисом для получения информации: а) по исследуемым объектам; б) по средствам видеонаблюдения; в) из архива изображений

Создание сервиса для взаимодействия между ИС VolSatView и АИС «Сигнал» дало возможность не только обеспечить доступ к наборам структурированных научных данных и результатам численных расчетов (см. табл. 5.1), инициированных из интерфейсов ИС VolSatView, но и проводить совместный анализ спутниковых данных и результатов компьютерного моделирования распространения пепловых облаков (см. главу 6).

Глава 6. СИСТЕМА VOLSATVIEW – БАЗОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ИССЛЕДОВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КАМЧАТКИ И КУРИЛ

6.1. Основные задачи системы

Данные дистанционных, в первую очередь спутниковых, наблюдений являются сегодня незаменимыми для решения различных задач мониторинга и изучения вулканической активности. В настоящее время такую информацию предоставляют десятки систем наблюдения Земли, установленных на большом числе космических аппаратов. Получение, обработка и распространение данных большинства современных спутниковых систем сегодня осуществляется различными крупными центрами приема и обработки спутниковых данных. Эти центры осуществляют предоставление базовой информации, получаемой на основе спутниковых данных, различным научным и прикладным проектам и информационным системам, которые используют ее для решения различных конкретных задач (Лупан и др., 2011а, 2015а).

Объемы получаемой сегодня спутниковой информации по региону, на который влияет активность вулканов Камчатки и Курил, составляет около 250 Гб в сутки, при этом уже существуют системы (геостационарный спутник Himawari-8), которые позволяют наблюдать этот регион каждые 10 мин, в некоторых ситуациях и каждые 2,5 мин (Bessho et al., 2016). Следует также отметить, что для наблюдения и изучения вулканических процессов во многих случаях возникает необходимость комплексного анализа спутниковой информации совместно с данными наземных наблюдений, метеоданными, результатами компьютерного моделирования и другой информацией. Естественно, что организовать эффективную работу со значительным объемом быстро обновляющихся данных невозможно без построения специализированной информационной системы, которая обеспечила бы вулканологам, выполняющим мониторинг и изучение вулканической активности на Камчатке и Курилах, возможность удобного доступа к различным данным и инструментам для их анализа. Фактически такая система должна:

– обеспечить автоматизированное потоковое получение данных из различных источников и размещение их в собственные архивы или быстрое (онлайн) по-

лучение данных из архивов сторонних систем непосредственно в момент, когда пользователю необходимо провести их анализ;

- постоянно осуществлять автоматизированную потоковую обработку данных для получения различных информационных продуктов, использующихся при мониторинге и изучении вулканической активности;

- организовать постоянное автоматизированное ведение различных архивов спутниковых данных и результатов их обработки, в том числе и их постоянное пополнение;

- предоставить пользователю различные инструменты анализа данных, при этом такие инструменты должны быть рассчитаны на возможность распределенной обработки и анализа данных.

Основной задачей подобной системы является предоставление специалистам инструментов для работы с разнородной информацией, поступающей из различных источников. При этом пользователь должен иметь возможность работы из любого места, используя для обработки и анализа данных не только ресурсы своего компьютера, но и все распределенные вычислительные ресурсы, предоставляемые системой.

Создание такой информационной системы для решения задач мониторинга и изучения вулканической активности Камчатки и Курил было начато специалистами ИВиС ДВО РАН, ВЦ ДВО РАН, НИЦ «Планета» и ИКИ РАН в 2011 г. В настоящее время создана информационная система «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)» (Гордеев и др., 2016а, 2016б; Ефремов и др., 2012). Доступ к системе можно получить по адресу: <http://volcanoes.smislab.ru>.

В основу ИС VolSatView были положены технологии работы с различными данными, развиваемые в ИВиС ДВО РАН, ВЦ ДВО РАН, НИЦ «Планета» и ИКИ РАН, в том числе, технологии построения систем дистанционного мониторинга, созданные в ИКИ РАН (Егоров и др., 2004; Лупян и др., 2004, 2011а, 2015а, 2018; Прошин и др., 2016), а также компьютерные алгоритмы для управления сетями специализированных наблюдений и обработки инструментальных данных, разработанные в ВЦ ДВО РАН (Korolev et al., 2015; Sorokin et al., 2015).

В настоящей главе описаны основные возможности системы: ее архитектура, основные типы данных и информационных продуктов, которыми оперирует система, возможности базовых и специальных инструментов анализа данных, созданных для решения различных задач мониторинга и изучения вулканической активности.

6.2. Архитектура построения и основные элементы системы VolSatView

Как уже отмечалось, информационная система VolSatView предназначена для обеспечения специалистов-вулканологов оперативными и архивными спутниковыми и метеорологическими данными и информационными продуктами, получаемыми на их основе, а также предоставления им различных инструментов для комплексной обработки и анализа вышеуказанной информации совместно с данными, поступающими из других информационных систем. В связи с тем,

что в системе используются значительные объемы данных (в том числе архивы многолетних наблюдений, накопленные различными научными организациями), архитектура системы ориентирована на обеспечение работы с распределенными информационными и вычислительными ресурсами различных научных центров. Это позволяет пользователям работать с данными, оперативно поступающими из различных источников, а также с историческими архивами спутниковых данных и результатов их обработки, хранящимися в ведущих научных центрах. Общий вид архитектуры ИС VolSatView представлен на рис. 6.1. На схеме показаны основные функции, реализованные в различных узлах системы, и базовые информационные потоки между ними. Также на схеме представлены различные внешние компьютерные системы, являющиеся в настоящее время основными поставщиками информации в VolSatView. В системе фактически реализовано четыре основных узла, обеспечивающих ее работу, которые расположены в гг. Петропавловск-Камчатский (ИВиС ДВО РАН), Хабаровск (ДЦ НИЦ «Планета» и ВЦ ДВО РАН) и Москва (ИКИ РАН). Ниже обсудим основные задачи и функции этих узлов. Взаимодействие между узлами системы осуществляется на основе сети Интернет и телекоммуникационной инфраструктуры ВЦ ДВО РАН и Центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017б). Информационные узлы ИС VolSatView решают следующие задачи и имеют следующие основные особенности:

Центральный информационный узел (ЦИУ), расположенный в ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), ориентирован на обеспечение вулканологов (в первую очередь специалистов KVERT) возможностями получения оперативного доступа к различной информации, необходимой для мониторинга и изучения вулканической активности. В узле размещены архивы спутниковых данных по региону Камчатки и Курил, оперативное автоматизированное пополнение которых организовано из ДЦ НИЦ «Планета» и приемной станции ИВиС ДВО РАН (обеспечивает получение данных со спутников Terra, Aqua, NPP, JPSS-1). В ЦИУ также организовано оперативное поступление метеоинформации и возможность взаимодействия с информационными системами VOKKIA и KVERT (см. главу 4) и «Сигнал» (см. главу 5) (Романова, 2013а; Романова, Гирина, 2018; Сорокин и др., 2010; Korolev et al., 2015). В узле установлен полнофункциональный интерфейс VolSatView, который обеспечивает работу со всей информацией, имеющейся в системе. Подробно о возможностях интерфейса и реализованном в нем функционале, обеспечивающих проведение анализа различных данных, будет рассказано ниже.

Информационный узел (ИУ) ДЦ НИЦ «Планета» (г. Хабаровск) обеспечивает автоматическое получение и обработку спутниковых данных для формирования различных информационных продуктов, использующихся в ИС VolSatView. В центре организован прием данных от спутниковых систем NOAA, Terra, Aqua, NPP, Meteor M, Канопус, Ресурс и др. Организовано также получение данных спутника Himawari-8 из Японского агентства аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA). Информационные продукты по зоне интересов ИС VolSatView, которые необходимы для оперативного мониторинга вулканической активности (продукты, получаемые в основном на основе данных различных метеорологических спутников), автоматически передаются в ЦИУ. В центре осуществля-

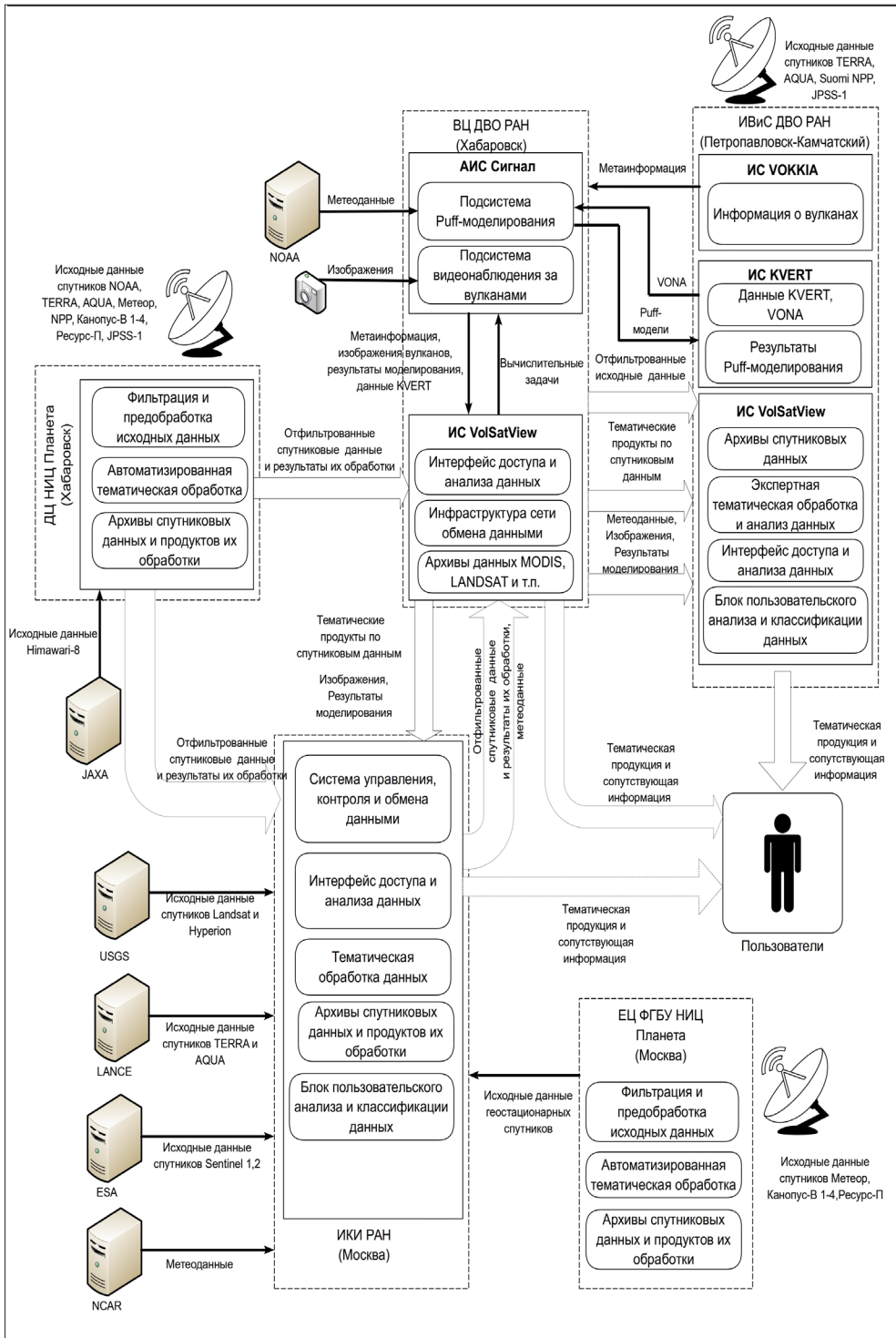


Рис. 6.1. Архитектура построения ИС VolSatView

ется оперативное хранение всех информационных продуктов и онлайн доступ к ним с использованием возможностей объединенной системы работы со спутниковыми данными центров НИЦ «Планета» (Бурцев и др., 2012; Лупян и др., 2014). Также организована система автоматической передачи данных в ЦИУ и ИУ ВЦ ДВО РАН.

ИУ ВЦ ДВО РАН (г. Хабаровск) обеспечивает ведение долговременных и оперативных архивов данных, поступающих в ИС VolSatView из ДЦ НИЦ «Планета». В ИУ организовано информационное взаимодействие с АИС «Сигнал», обеспечивающее возможность получения данных из систем видеонаблюдения за вулканами Камчатки и моделирования распространения пепловых облаков (см. главу 5). Также в ИУ установлен полнофункциональный интерфейс для распределенной работы с данными ИС VolSatView, что позволяет пользователям работать со всей имеющейся в системе информацией.

ИУ ИКИ РАН (г. Москва) обеспечивает оперативный сбор и автоматическую обработку данных из различных российских и зарубежных центров, необходимых для работы ИС VolSatView. Так, например, в нем осуществляется получение данных Landsat, Hyperion, Sentinel 1, Sentinel 2, Метеор М, Канопус В и др., а также получение и обработка метео данных. ИУ обеспечивает оперативный доступ к данным, предоставляемым различными информационными сервисами Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б), например, к долговременным архивам спутниковых данных и др. Часть обработанной информации автоматически поступает в ИУ ВЦ ДВО РАН. В этом узле также развернут резервный web-интерфейс для работы с данными. ИУ обеспечивает работу в ИС VolSatView различных инструментов распределенной онлайн обработки спутниковых данных. Также в ИУ создан стенд, на котором проводится разработка и тестирование новых функциональных возможностей, создающихся в интересах ИС VolSatView.

ИУ ЕЦ ФГБУ НИЦ «Планета» (г. Москва), используя функционал объединенной системы работы со спутниковыми данными центров НИЦ «Планета», обеспечивает пользователям ИС VolSatView возможность анализа информации, получаемой со спутников Метеор, Канопус-В, Ресурс-П.

6.3. Спутниковые и метеорологические данные в ИС VolSatView

6.3.1. Основные типы спутниковых данных

В ИС VolSatView используются данные различных установленных на спутниках приборов. Основные типы получаемой в системе информации и задачи, для решения которых она используется, представлены в таблице 6.1. Работа с различной спутниковой информацией в системе позволяет анализировать различные особенности вулканогенных процессов. На рис. 6.2. приведены примеры информационных продуктов, используемых в ИС VolSatView для анализа извержений вулканов и их отложений: а) продукт по данным Sentinel-2 (MSI) (результат синтеза с использованием каналов Red, NIR, SWIR) – на склоне вулкана Жупановский хорошо выражены отложения нескольких обвалов с различной структурой; б) продукт «Термальная аномалия» (результат синтеза с использованием каналов Red, NIR, SWIR по данным Landsat 8, прибор OLI) – на снимке ярко-красным и желтым

Таблица 6.1. Основные виды спутниковой информации в ИС VolSatView

Диапазон	Разрешение	Прибор (спутник)	Частота наблюдения	Основные решаемые задачи
Оптика 0,4–0,9 мкм	более 2 км	АНИ (Himawari 8)	10 мин	Детектирование пепловых шлейфов и оценка их параметров. Картирование и определение характеристик отложений
	1 км	MODIS (Terra/Aqua) AVHRR (NOAA) VIIRS (Suomi NPP, JPSS1) МСУ МР (Метеор М)	От 15 до 25 в сутки*	
	100–300 м	Terra/Aqua (MODIS) VIIRS (Suomi NPP, JPSS1)	От 5 до 8 в сутки*	
	10–60 м	TM, ETM+, OLI (Landsat), MSI (Sentinel 2A/B) МСС (серия спутников Канопус В), КМСС (Метеор М)	От одного раза в двое суток до раза в сутки*	
	Лучше 10 м	ПСС (серия спутников Канопус В), Геотон-П (Ресурс П) ORBVIEW-3	Несколько раз в год по отдельным участкам	
Ближний ИК 1,4–3,9 мкм	более 2 км	АНИ (Himawari 8)	10 мин	Выделение аномалий и оценка характеристик температуры. Анализ характеристик термальных аномалий. Анализ характеристик пепловых облаков и шлейфов
	1 км	MODIS (Terra, Aqua) VIIRS (Suomi NPP, JPSS1) AVHRR (NOAA) МСУ МР (Метеор М)	От 15 до 25 в сутки*	
	200–800 м	VIIRS (Suomi NPP, JPSS1) МС-ИК-СРМ (Канопус В ИК)	От 5 до 8 в сутки*	
	10–30 м	TIRS (Landsat), MSI (Sentinel 2 A/B)	От одного раза в пять суток до раза в трое суток*	
ИК 11–12 мкм	более 2 км	АНИ (Himawari 8)	10 мин	Выделение аномалий и оценка характеристик температуры. Детектирование пепловых шлейфов и оценка их параметров. Анализ характеристик термальных аномалий. Анализ характеристик пепловых облаков и шлейфов
	1 км	Terra/Aqua (MODIS) VIIRS (Suomi NPP, JPSS1) AVHRR (NOAA), МСУ МР (Метеор М)	От 15 до 25 в сутки*	
	200 м	МСУ-ИК-СРМ	Раз в 2–3 дня	
	60 м	TIRS (Landsat)	Раз в 14 дней	
Радиолокаторы	20 х 40 м	C_SAR (Sentinel 1A/B)	1 раз в 5 дней	Анализ вулканических отложений
Гиперспектрометры	30 м	Hyperion (EO-1)	Несколько раз в год	Анализ вулканических отложений. Анализ пепловых облаков и шлейфов

Примечание. * цифры приведены для районов от Южных Курил до северной части Камчатки.

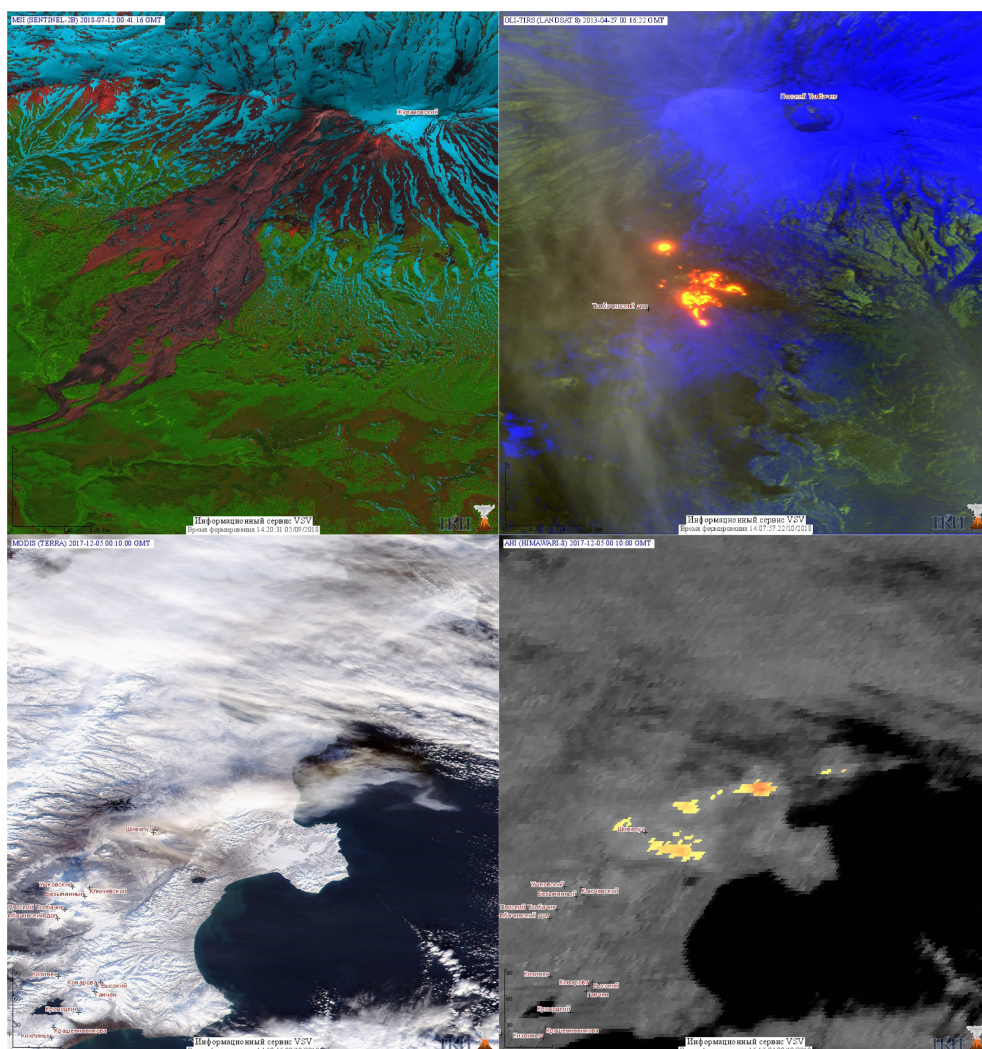


Рис. 6.2. Примеры различных информационных продуктов, использующихся в ИС VolSatView для анализа извержений вулканов и их отложений (пояснения в тексте)

цветом выделяется лавовый поток Трещинного Толбачинского извержения им. ИВиС ДВО РАН 2012–2013 гг.; в) продукт «Дымы и облачность» по данным TERRA (MODIS) – пепловый шлейф, образовавшийся вследствие эксплозивного события на Шивелуче, перемещается на северо-восток от вулкана; шлейф ресуспендированного пепла (Гирина и др., 2016б) протягивается на восток-юго-восток от вулкана; г) продукт «Пепел» по данным Himawari-8 (AHI) (разность радиоярких температур в каналах 11–12 мкм) – пепловый шлейф, образовавшийся вследствие эксплозивного события на Шивелуче, перемещается на северо-восток от вулкана; шлейф ресуспендированного пепла протягивается на восток-юго-восток от вулкана.

Важно отметить, что в системе доступны не только оперативные данные, но и многолетние архивы наблюдений Камчатки и Курил. В основном, возможности

доступа к долговременным архивам спутниковых данных и результатам их обработки предоставляет система ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б). Базовые характеристики основных архивов, доступных в системе, приведены в таблице 6.2.

6.3.2. Основные типы метеоданных

Интеграция метеорологических данных в систему ИС VolSatView обусловлена необходимостью их совместного анализа со спутниковыми данными и другой информацией, используемой при изучении и мониторинге вулканической активности, поэтому в системе ведется оперативнопополняемый архив прогнозных данных, полученных с помощью модели GFS Национальных центров прогнозов по окружающей среде США (NCEP) (Kalnay et al., 1996). Прогнозы описывают состояние атмосферы с интервалом в 3 ч на срок до 10 дней и с интервалом 12 ч на срок до 16 дней. Пространственное разрешение данных составляет 0,25°.

Для создания архива данных был использован в качестве источника сервер Национального центра атмосферных исследований США – NCAR (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1>). Также используется сервер NCEP (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>). Собираемые данные представлены в формате GRIB, стандартизированном Всемирной метеорологической организацией.

Постоянное оперативное обновление архива обеспечивается специализированной подсистемой получения данных, обеспечивающей полную автоматизацию всех необходимых процессов, связанных с получением и обработкой данных. Она регулярно отслеживает наличие обновлений в исходных архивах, ведет каталог файлов данных, управляет очередью загрузки и обработки данных. Подробно схема организации автоматизированного получения метеоданных описана в работе (Балашов и др., 2013).

Прогнозы большинства метеорологических показателей локализованы в узлах регулярной сетки на поверхности Земли с постоянным шагом по широте и долготе. Некоторые из них (температура, скорость ветра) также представлены в различных слоях атмосферы, в привязке к серии изобарических поверхностей. Фактически архив метеоданных представляет собой пятимерный массив, измерениями которого являются географические координаты, давление изобарической поверхности (или высота), время и наименование метеорологического показателя. Задачей подсистемы хранения данных является обеспечить эффективную выборку любых срезов этого массива. Решение для хранения данных основано на использовании СУБД MariaDB и специально спроектированной структуры базы данных, обеспечивающей масштабируемость и расширяемость. Достаточно подробно схема организации работы с метеоинформацией, которая используется в ИС VolSatView, описана в работе (Уваров и др., 2013). Отметим также, что необходимым элементом интеграции метеоданных в систему мониторинга является специализированный программный интерфейс приложения (API), позволяющий быстро выбирать информацию из архивов для проведения ее обработки, анализа и отображения. Предусмотрены запросы одного или нескольких показателей, временных, пространственных и вертикальных разрезов, а также пространственных массивов для построения карт. Разработанный API ориентирован на использование системами дистанционного мониторинга, созданными на основе технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011а), которая использовалась для создания картографических web-интерфейсов ИС VolSatView.

Таблица 6.2. Архивы основных спутниковых данных, доступные в ИС VolSatView (по состоянию на 1.09.2018)*

Спутники	Приборы	Тип данных (уровень обработки)	Источники данных	Диапазон дат	Кол-во сеансов (сцен)	Объем про-дуктов (Тб)	Средняя скорость поступления, ГБ/день
Himawari 8	AHI	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета» (JAXA)	2015-08-25	65 145	11	27
NOAA 15 NOAA 16 NOAA 18 NOAA 19	AVHRR	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2014-03-19	19 785	2	2
AQUA TERRA	MODIS	Продукты уровня (L1B) Тематические продукты по данным LANCE (L2): – «Дым и облачность» – «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм) – «Термальная аномалия»	ИКИ РАН ФГБУ НИЦ «Планета» ИВиС ДВО РАН	2012-03-25 -	120 501	25	20,2
Suomi NPP JPSS1	VIIRS	Продукты уровня (L1B) Тематические продукты по данным LANCE (L2): – «Дым и облачность» – «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм) – «Термальная аномалия»	ФГБУ НИЦ «Планета» ИВиС ДВО РАН	2013-05-03	19 393	5,8	8,6
Метеор-М № 1, 2	МСУ-МР	Продукты уровня (L1B) Тематические продукты по данным LANCE (L2): – «Дым и облачность» – «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм) – «Термальная аномалия»	ФГБУ НИЦ «Планета»	2014-03-07 -	53 901	6,5	11
Метеор-М № 1, 2	КМСС	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2011-10-01	64 472	9,6	13
LANDSAT 4 LANDSAT 5 LANDSAT 7 LANDSAT 8	TM ETM+ OLI OLI_TIRS	Продукты уровня (L1B) Тематические продукты по данным LANCE (L2): – «Термальная аномалия»	ИКИ РАН (USGS,ISA)	1984-04-17	141 922	54	15

Окончание табл. 6.2

Спутники	Приборы	Тип данных (уровень обработки)	Источники данных	Диапазон дат	Кол-во сеансов (сцен)	Объем продуктов (Тб)	Средняя скорость поступления, ГБ/день
Sentinel-2A Sentinel-2B	MSI	Продукты уровня (L1B) Тематический продукт по данным LANCE (L2): – «Термальная аномалия»	ИКИ РАН (ESA)	2015-08-28	15 924	72	118
EO-1	HYPERION	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA, USGS)	2001-07-14	2 100	561	-
Sentinel-1A Sentinel-1B	C-SAR	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA)	2014-10-03	18 114	31	36
Канопус-В № 1, 3, 4, ИК	ПСС	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2011-12-30	8 860	0,7	-
Канопус-В № 1, 3, 4, ИК	МСС	Продукты уровня (L1B)		2011-12-30	8 721	0,2	-
Ресурс-П № 1, 2, 3	ГЕОТОН	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2015-03-19	580	0,5	-
Канопус-В-ИК	МСУ-ИК-СРМ	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2017-08-18	389	0,3	1,7
Sentinel-3A	SLS TR OLCI	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA)	2016-11-17	4 672	0,1	-
МЕТОР-В	IASI	Продукты уровня (L1B)	ФГБУ НИЦ «Планета»	2017-05-02 2017-09-20	35	0,1	-

Примечание. * Указаны только «статические» продукты, которые формируются и физически хранятся в доступных ИС VolSatView архивах. Кроме этого, в системе имеется значительный набор динамических информационных продуктов, которые формируются в режиме онлайн по запросам пользователей.

Пользователи системы могут проводить анализ метеоинформации совместно с другой информацией, доступной в ИС VolSatView, с помощью картографических интерфейсов и системы анализа рядов данных. В картографическом интерфейсе системы пользователям доступно построение изолинейных карт различных показателей: температура, влажность, давление и др., с возможностью отображения на них значков направления и силы ветра. Карты температуры и ветра могут быть построены также для высоты выбранной изобарической поверхности. Представляет интерес совместное отображение условий погоды и спутниковых изображений. В интерфейсах реализованы различные механизмы, позволяющие проводить совместный анализ спутниковой и метеоинформации (рис. 6.3а).

В системе реализованы также интерфейсы, позволяющие анализировать как временные, так и пространственные ряды метеопараметров, например, интерфейс для анализа вертикальных профилей температуры (рис. 6.3б). Анализ таких профилей совместно с данными о температуре, получаемыми на основе спутниковой информации, в частности, может использоваться для оценки высоты пепловых шлейфов.

6.4. Основные возможности анализа данных, реализованные в ИС VolSatView

6.4.1. Основа для реализации системы анализа данных в ИС VolSatView и ее базовая функциональность

Основой системы анализа данных в ИС VolSatView являются подходы, технологии и решения, которые разрабатывались, поддерживаются и развиваются в ИКИ РАН в интересах создания и развития систем коллективного пользования со сверхбольшими распределенными архивами спутниковых данных и результатов их обработки, в первую очередь в интересах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лурия и др., 2015б) и входящего в его состав информационного сервиса «ВЕГА – Science» (<http://sci-vega.ru/>) (Лурия и др., 2011б; Толпин и др., 2011б). Главной задачей сервиса «ВЕГА – Science» является не только обеспечение удобного доступа к данным, но и предоставление различных интерфейсов и инструментов для анализа спутниковых данных и результатов их обработки, а также различной сопутствующей информации.

Для работы с данными и проведения их обработки и анализа в ИС VolSatView реализованы различные пользовательские интерфейсы: картографический; для анализа одномерных рядов данных; для работы с информацией о различных объектах (пепловых шлейфах, термальных аномалиях и т. д.) (Кашницкий и др., 2015, 2016; Лурия и др., 2011б; Толпин и др., 2011а, 2011б; Savorsky et al., 2016). Здесь кратко остановимся на задачах и возможностях основных базовых интерфейсов, использующихся в ИС VolSatView.

6.4.1.1. Картографический web-интерфейс

Интерфейс ориентирован на работу с пространственной информацией, разработан на основе технологии GEOSMIS, созданной в ИКИ РАН (Толпин и др.,

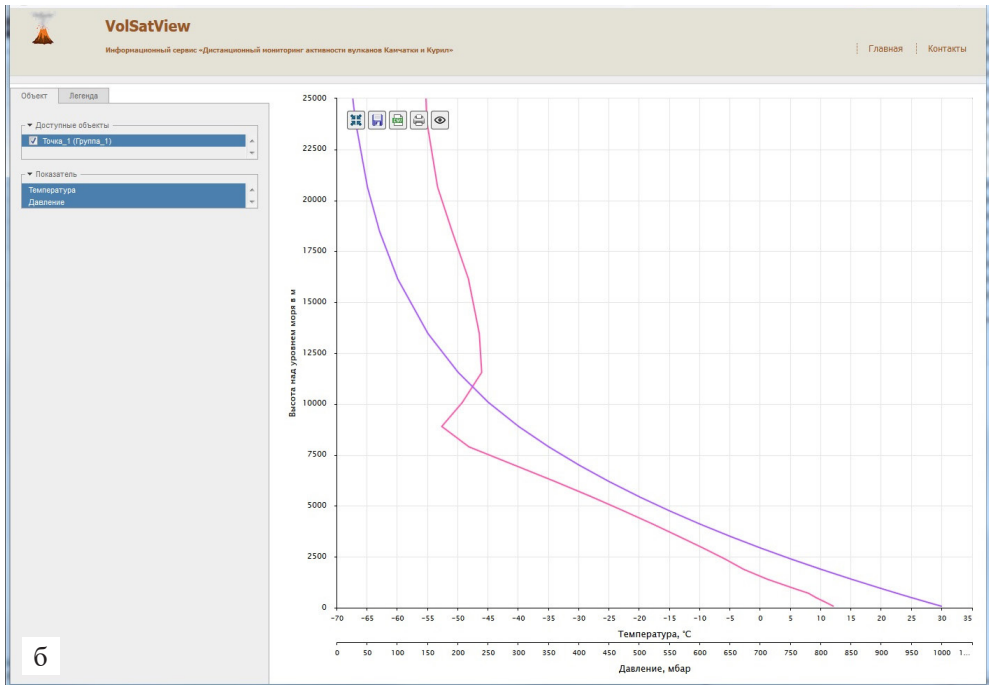
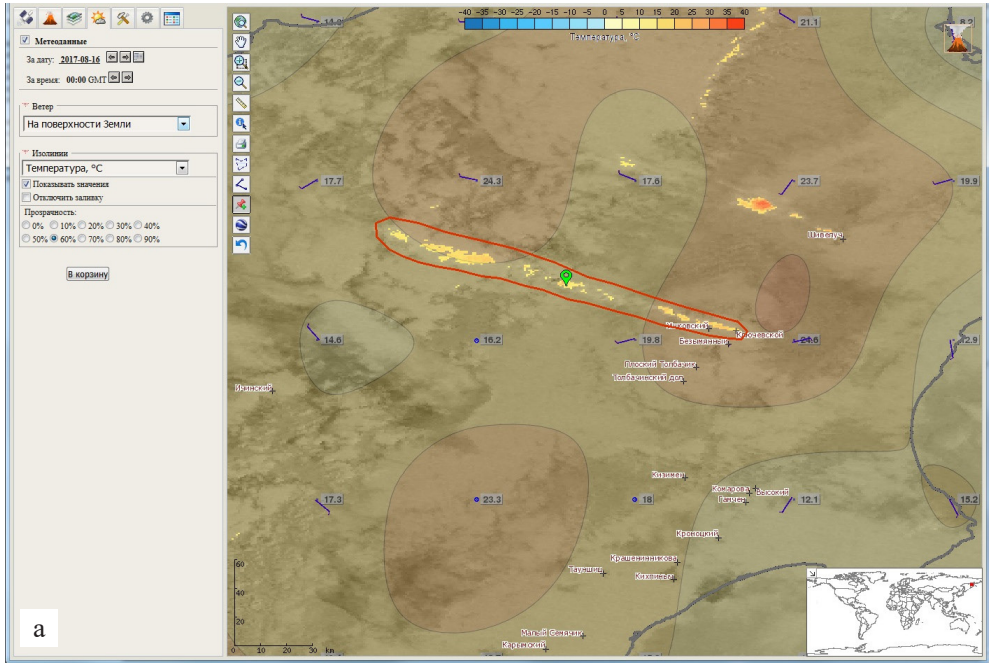


Рис 6.3. Пепловый шлейф от вулкана Ключевской 15 августа 2017 г.: а) на спутниковом снимке MODIS (разница каналов 11 и 12 мкм), карта температуры и направления ветра; б) анализ вертикального профиля температуры и давления в точке пеплового шлейфа, отмеченной на а) зеленым маркером

2011а). Интерфейс обеспечивает характерный для геоинформационных систем выбор параметров поиска, отображения и анализа информации. Интерфейс позволяет получать и визуализировать различные спутниковые данные, доступные в системе, а также продукты, получаемые на основе их обработки, в том числе виртуальные (формируемые «на лету» по запросу пользователей). Интерфейс позволяет также работать с различными пользовательскими объектами. Одной из основных его особенностей является доступность различных инструментов для обработки и анализа информации, в частности, позволяющих проводить:

- контрастирование и улучшение качества изображений;
- построение различных цветосинтезов;
- проведение различных арифметических операций с изображениями;
- расчет различных спектральных и гиперспектральных индексов;
- расчет различных гистограмм по выбранной области;
- расчет различных статистических показателей по выбранному набору данных для пользовательских объектов;
- проведение классификации как многоспектральных, так и разновременных данных;
- проведение структурного анализа и т. д.

Функционал анализа данных, имеющийся в интерфейсе, проиллюстрируем на примере инструмента для проведения классификации спутниковых данных. Инструмент позволяет проводить различные классификации выбранных каналов как одной сцены, так и серий данных, при этом классификация может проводиться с использованием различных типов данных, полученных по выбранной территории. Инструмент позволяет решать достаточно широкий класс задач, в том числе проводить классификацию типов пирокластических отложений и детектирование пепловых облаков и шлейфов. Вид элементов интерфейса инструмента «Классификация» представлен на рис. 6.4.

6.4.1.2. Анализ рядов данных

В системе VolSatView предусмотрен достаточно широкий набор интерфейсов, позволяющих анализировать ряды данных: временных, пространственных и спектральных. Например, на рис. 6.5 приведены отражательные характеристики отложений обвала вулкана Жупановский по данным спутника Sentinel 2. Подобные интерфейсы реализованы и для проведения анализа по гиперспектральным данным. Спектральный анализ также может проводиться по данным в произвольно выбранных точках наблюдений и в группах точек.

6.4.1.3. Специализированные интерфейсы для управления ИС VolSatView

Поскольку система является достаточно сложной и территориально распределенной, для ее управления созданы различные специализированные программные средства, обеспечивающие автоматизированный контроль различных ее элементов, определения и документирования сбойных ситуаций, информирование операторов об обнаруженных сбоях и предоставление им возможности анализа информации о работе системы. Для создания таких блоков были использованы технологии, разработанные в ИКИ РАН (Балашов и др., 2010, 2011; Кобец и др., 2017; Сычугов и др., 2014).

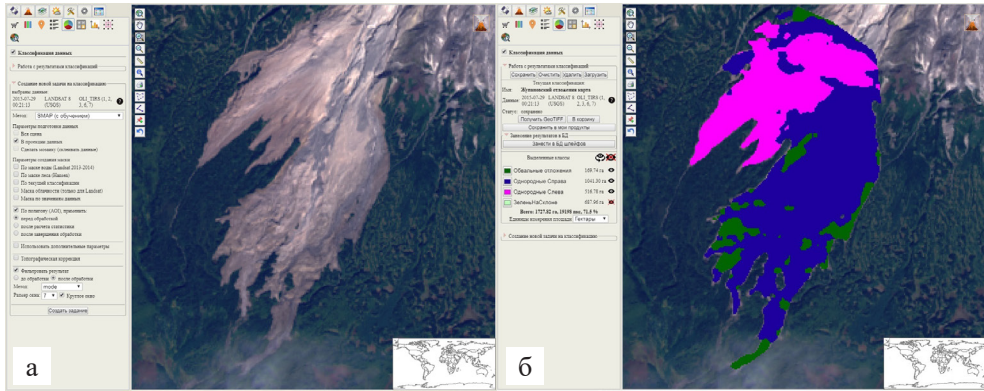


Рис. 6.4. Пример элементов управления инструмента «Классификация», реализованного в картографическом интерфейсе ИС VolSatView. В результате проведенного анализа выявилась различная структура отложений обвалов вулкана Жупановский, образовавшихся 12 и 14 июля 2015 г. (Гирина и др., 2018)

6.4.2. Специализированные возможности работы с данными в ИС VolSatView

В системе реализованы различные специализированные возможности анализа спутниковых данных, необходимые для мониторинга и изучения вулканической активности.

6.4.2.1. Интерфейсы для анализа информации специализированных баз данных

В системе ведется несколько специализированных БД, ориентированных на хранение различной информации об объектах, в том числе:

- термальных аномалиях;
- пепловых шлейфах;
- лавовых потоках;
- пирокластических потоках;
- регионах постоянных наблюдений.

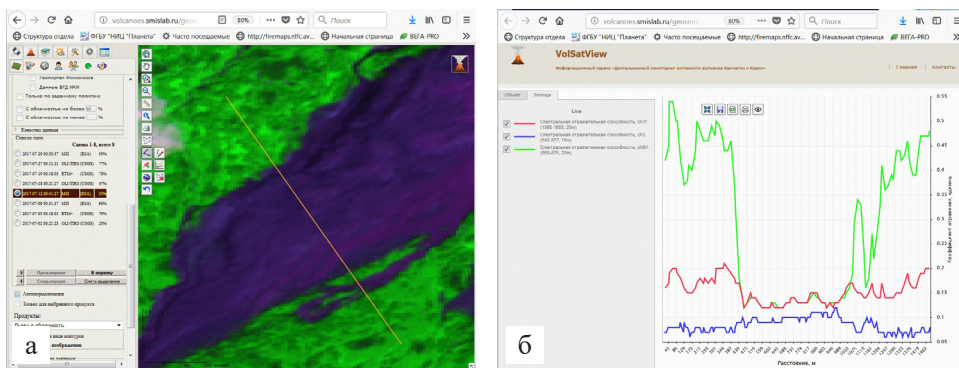


Рис. 6.5. (а) Пространственный разрез отложений обвала вулкана Жупановский, (б) поведение отражательной способности (альбедо) в различных спектральных каналах: красный – 1565–1655 мкм, зеленый 855–875 мкм, синий 542–577 мкм

Информацию об этих объектах можно отображать и анализировать в картографическом интерфейсе. Для анализа информации, накапливаемой в БД, в системе созданы специализированные интерфейсы, например, для работы с БД по термальным аномалиям вулканов (рис. 6.6).

6.4.2.2. Специализированные продукты, получаемые на основе данных мониторинга

Для анализа различных вулканогенных процессов в системе на основе спутниковых данных строятся разнообразные информационные продукты (табл. 6.3). Значительная их часть являются виртуальными, т. е. они строятся и отображаются в картографическом интерфейсе на конкретную выбранную область в момент их запроса пользователями.

6.4.2.3. Анализ термальных аномалий в районах вулканов

В системе реализованы следующие возможности их детектирования:

- автоматизированное на основе алгоритма MOD14 (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- автоматизированное на основе алгоритма MODVOLC (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- автоматическое на основе временных серий, получаемых по данным спутника Himawari-8;
- интерактивное (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- интерактивное на основе временных серий, получаемых по данным спутника Himawari-8.

Термальные аномалии

*К Выбор дат: с 2018-09-28 по 2018-09-29

Выбор спутников: Все спутники
 Только за одну дату
 Показывать только сеансы с температурными аномалиями
 Показывать только безоблачные сеансы

ΔT аном.
 Канал 3,7 мкм: 10
 Канал 11 мкм: 30

Время: За весь день

Выбор вулкана: Ключевской

▲ Вулкан Ключевской

	Время сеанса	Спутник	Канал 3,7 мкм					Канал 11 мкм					
			T фона	T макс.	T макс.-T фона	Аном. точки	S аном. (км ²)	R аном. (ГВт)	T фона	T макс.	T макс.-T фона	Аном. точки	S аном. (км ²)
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 19:12:03	NOAA 19	257.7	263.5	5.8	0	0	0	257.9	264.8	6.9	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 16:06:07	AQUA	25.9	26.5	0.6	0	0	0	25.9	26.4	0.5	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 11:58:02	TERRA	25.2	25.9	0.7	0	0	0	25.9	26.0	0.1	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 10:24:21	TERRA	23.1	24.4	1.3	0	0	0	23.0	23.4	0.4	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 09:22:02	NOAA 18	256.4	261.5	5.1	0	0	0	252.5	257.4	4.9	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-29 00:48:22	TERRA	27.1	29.2	2.1	0	0	0	26.3	27.3	1.0	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 23:31:53	NOAA 18	277.2	284.2	7.0	0	0	0	266.4	274.1	7.7	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 21:51:56	NOAA 18	269.6	281.4	11.8	8	6.48	22.7	265.0	274.0	9.0	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 19:23:38	NOAA 19	257.3	263.1	5.8	0	0	0	256.6	261.0	4.4	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 17:01:36	AQUA	25.7	26.0	0.3	0	0	0	25.7	26.0	0.3	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 15:23:03	AQUA	25.9	26.2	0.3	0	0	0	25.9	26.2	0.3	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 11:16:24	TERRA	26.0	26.3	0.3	0	0	0	26.0	26.3	0.3	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 09:33:29	NOAA 18	269.2	271.4	2.2	0	0	0	268.6	270.7	2.1	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 07:56:22	NOAA 18	264.9	269.2	4.3	0	0	0	263.7	267.8	4.1	0	0
<input type="checkbox"/>	2018-09-28 05:25:44	NOAA 19	284.6	301.3	16.7	11	9.75	43.5	263.3	269.9	6.6	0	0

Рис. 6.6. Интерфейс для работы с БД по термальным аномалиям вулканов

Таблица 6.3. Основные используемые в ИС VolSatView продукты

№	Название продукта	Спектральные каналы, из которых продукты формируются, информация об алгоритме	Тип продукта	Приборы, для которых продукт строится	Основная задача, для решения которой продукт используется в ИС VolSatView
1	Поверхность (для данных высокого пространственного разрешения)	RED, NIR, GREEN (для отдельных данных при отсутствии указанных, используются другие каналы)	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI, KMCC, Геотон-П, МСС, ORBVIEW-3, Нуретон, КШМ-СА-СР, КШМ-СА-ВР	Картирование и определения характеристик вулканических отложений, анализ текущей обстановки в области вулканов, анализ пепловых шлейфов
2	Поверхность (для данных среднего пространственного разрешения)	RED, GREEN, BLUE с нелинейным преобразованием измерений в различных каналах	Реальный	MODIS, VIIRS, MSU-MR	Картирование и определения характеристик вулканических отложений, анализ текущей обстановки в области вулканов, анализ пепловых шлейфов
3	Поверхность (для данных Himawari-8)	SWIR1, NIR, RED	Виртуальный	АНИ	Анализ текущей обстановки в области вулканов, анализ пепловых шлейфов
4	Льды и снег (высокого пространственного разрешения)	SWIR2, NIR, RED	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI, АНИ	Анализ снежного и ледового покрова в области вулканов, выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
5	Льды и снег (для данных среднего пространственного разрешения)	RED, GREEN, BLUE с нелинейным преобразованием измерений в различных каналах	Реальный	MODIS, VIIRS	Анализ снежного и ледового покрова в области вулканов, выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
6	Дым и облачность (для данных высокого пространственного разрешения и данных Himawari-8)	RED, GREEN, BLUE	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI, АНИ	Анализ пепловых шлейфов и облачной обстановки
7	Дым и облачность (для данных среднего разрешения)	RED, GREEN, BLUE с нелинейным преобразованием измерений в различных каналах	Реальный	MODIS, VIIRS, MSU-MR	Анализ пепловых шлейфов и облачной обстановки

Продолжение табл. 6.3

№	Название продукта	Спектральные каналы, из которых продукты формируются, информация об алгоритме	Тип продукта	Приборы, для которых продукт строится	Основная задача, для решения которой продукт используется в ИС VolSatView
8	Растительность	SWIR1, NIR, RED	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI	Анализ растительности и текущей обстановки в области вулканов, анализ вулканических отложений
9	Термальные аномалии на вулканах (для данных высокого пространственного разрешения)	SWIR2, SWIR1, NIR	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI, Nuregon	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
10	Термальные аномалии (для данных Himawari-8)	SWIR, NIR, RED	Виртуальный	АHI	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
11	Термальные аномалии по ИК (для данных Himawari-8)	3,9 мкм, 11 мкм, 3,9 мкм	Виртуальный	АHI	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
12	Естественный синтез	Результат синтеза каналов RED, GREEN, BLUE	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, MSI	Картирование и определения характеристик вулканических отложений, анализ текущей обстановки в области вулканов
13	Паншарпенинг	Паншарпенинг каналов RED, GREEN, BLUE и панхроматического канала с преобразованием Бровей и последующий синтез в цветное изображение	Виртуальный	TM, ETM+, OLI-TIRS	Картирование и определения характеристик вулканических отложений, анализ текущей обстановки в области вулканов
14	Тепловой канал (для данных высокого пространственного разрешения)	Тепловой канал (10400–12500 нм)	Реальный	TM, ETM+, OLI-TIRS	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
15	Панхром (для данных высокого пространственного разрешения)	Панхроматический канал	Реальный	TM, ETM+, OLI-TIRS, ORBVIEW-3, Геотон-П, ПСС, КШИМСА-ВР	Картирование и определения характеристик вулканических отложений, анализ текущей обстановки в области вулканов
16	Маска облачности	Модифицированный алгоритм FMASK для выделения облачности	Реальный	TM, ETM+, OLI-TIRS	Выделение облачности

Продолжение табл. 6.3

№	Название продукта	Спектральные каналы, из которых продукты формируются, информация об алгоритме	Тип продукта	Приборы, для которых продукт строится	Основная задача, для решения которой продукт используется в ИС VolSatView
17	Концентрация SO ₂	Концентрация SO ₂ , подсвеченная палитрой	Реальный	VIIRS, MODIS	Анализ газовых выбросов вулканов
18	Разница 11–12 мкм (BTD – пепел)	Разница радиояркостных температур в каналах 11–12 мкм, подсвеченная палитрой для разницы выше порога обнаружения пепла	Виртуальный или реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР	Анализ пепловых шлейфов
19	Разница 11–12 мкм (BTD – ч/б)	Разница радиояркостных температур в каналах 11–12 мкм в черно-белых тонах	Виртуальный или реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР	Анализ пепловых шлейфов
20	Тепловой канал	Тепловой канал (10400–12500 нм)	Реальный	TM, ETM+, OLI-TIRS	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры
21	Канал 3,7 мкм	Данные наблюдения в каналах, близких 3,7 мкм	Реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры, анализ пепловых шлейфов
22	Канал 11 мкм	Данные наблюдения в каналах, близких 11 мкм	Реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры, анализ пепловых шлейфов
23	Канал 12 мкм	Данные наблюдения в каналах, близких 12 мкм	Реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры, анализ пепловых шлейфов
24	Канал N (продукты по видимым каналам)	Данные наблюдения в соответствующих видимых каналах	Реальный	AHI, AVHRR, MODIS, МСУ-ГС	Анализ пепловых шлейфов и облачной обстановки
25	Канал N (продукты по инфракрасным каналам)	Данные наблюдения в соответствующих инфракрасных каналах, инвертированные	Реальный	AHI, AVHRR, VIIRS, MODIS, МСУ-МР, МСУ-ИК-СРМ, МСУ-ГС	Выделение термальных аномалий и оценка характеристик температуры, анализ пепловых шлейфов

Окончание табл. 6.3

№	Название продукта	Спектральные каналы, из которых продукты формируются, информация об алгоритме	Тип продукта	Приборы, для которых продукт строится	Основная задача, для решения которой продукт используется в ИС VolSatView
26	Поляризация ГГ	Данные об амплитудах в соответствующей поляризации (с калибровкой и коррекцией рельефа)	Реальный	C-SAR	Картирование и определения характеристик вулканических отложений
27	Поляризация ГВ	Данные об амплитудах в соответствующей поляризации (с калибровкой и коррекцией рельефа)	Реальный	C-SAR	Картирование и определения характеристик вулканических отложений
28	Поляризация ВГ	Данные об амплитудах в соответствующей поляризации (с калибровкой и коррекцией рельефа)	Реальный	C-SAR	Картирование и определения характеристик вулканических отложений
29	Поляризация ВВ	Данные об амплитудах в соответствующей поляризации (с калибровкой и коррекцией рельефа)	Реальный	C-SAR	Картирование и определения характеристик вулканических отложений

Примечание. Длины волн каналов, соответствующие условным именам: BLUE: 450–510 нм, GREEN: 530–590 нм, RED: 640–670 нм, NIR: 850–880 нм, SWIR1: 1570–1650 нм, SWIR2: 2110–2290 нм, Panchromatic: 500–680 нм.

Для анализа термальных аномалий имеются возможности: оценка температуры различных точек на спутниковых изображениях и температуры фона и расчет нормализованного теплового индекса (Wright et al., 2002, 2004).

6.4.2.4. Выделение (оконтуривание) пепловых шлейфов

Для решения задачи обнаружения и оконтуривания пепловых шлейфов в качестве основного информационного продукта по спутниковым данным используется разность радиояркихостных температур в каналах 11–12 мкм. Все пиксели с разницей больше некоторого порога окрашиваются и считаются пепловым шлейфом. Для каждого типа данных это пороговое значение было подобрано эмпирически, например, для данных прибора АНП (спутник Himawari-8) оно соответствует 0,365 градуса разницы, для данных прибора AVHRR (спутники NOAA) – 0,529 градуса разницы. Пример этого продукта, полученного по данным прибора VIIRS (спутник Suomi-NPP), приведен на рис. 6.7.

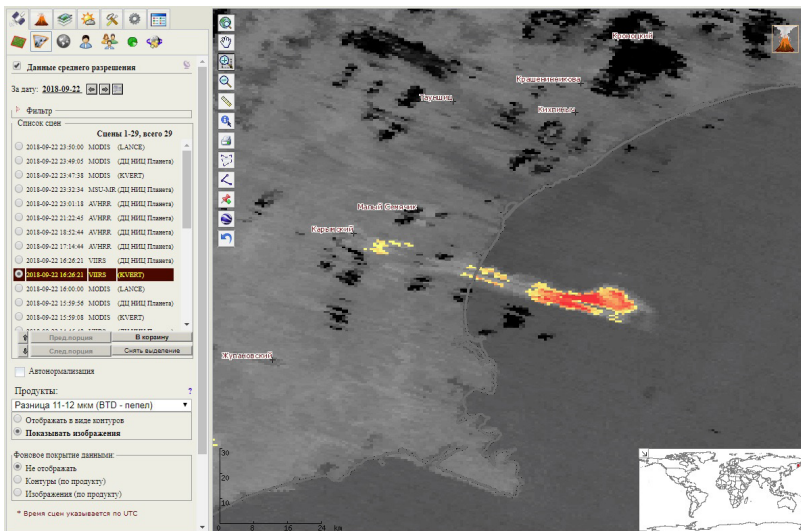


Рис. 6.7. Пример продукта «Пепел» (пепловый шлейф от вулкана Карымский) по данным прибора VIIRS (спутник Suomi-NPP)

В системе также имеется возможность интерактивного выделения пеплового шлейфа, которое может проводиться следующими методами: задание порога на продукте «разность температур», необучаемая кластеризация любых выбранных каналов или ручное оконтуривание. Пример процедуры выделения пеплового шлейфа с использованием механизма интерактивного задания порога показан на рис. 6.8. Отметим, что фиксированное задание порога на продукте «разность температур» не всегда верно выделяет шлейф, поэтому имеется возможность интерактивно изменить пороговое значение. На рис. 6.8а показан продукт «Пепел» (разность радиояркихостных температур в каналах 11–12 мкм) по данным прибора AVHRR (спутник NOAA 18) с заданным по умолчанию порогом 0,529 градуса

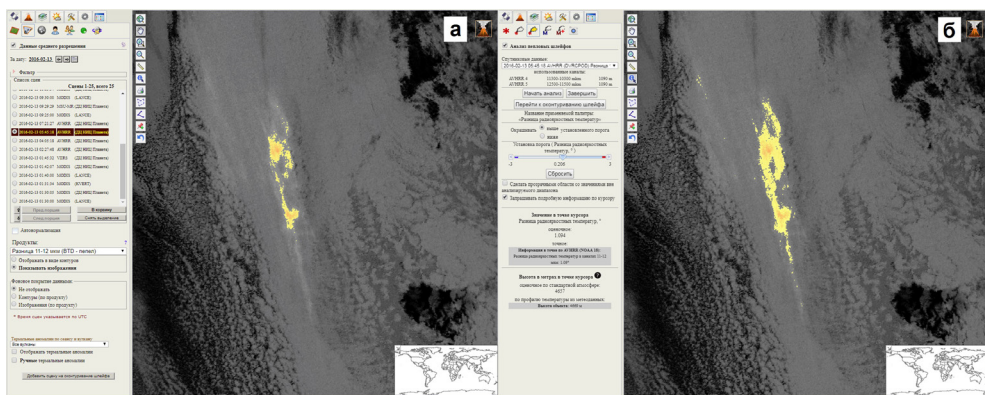


Рис. 6.8. Примеры выделения пеплового шлейфа с использованием механизма интерактивного задания разных порогов

разницы. На рис. 6.8б показан результат изменения этого порога до 0,206 градуса разницы в интерактивном режиме с помощью специального инструмента. После этого все пиксели со значением больше указанного считаются принадлежащими пепловому шлейфу, результат векторизуется и заносится в базу данных.

В случае невозможности качественного выделения пеплового шлейфа по порогу применяется его выделение на базе необучаемой кластеризации снимков низкого разрешения или снимков с геостационарных спутников. Выделение шлейфа через необучаемую кластеризацию проводится с помощью инструмента «классификация». Пользователем системы выбираются данные, по которым будет проводиться выделение пеплового шлейфа, грубо задается область пеплового шлейфа и внутри этой области проводится кластеризация выбранных каналов снимка. Пользователь системы в интерактивном режиме отбирает кластеры, соответствующие пепловому шлейфу, все кластеры объединяются, полученный результат векторизуется и заносится в базу данных.

В случае ручного оконтуривания пеплового шлейфа эксперт обводит область пеплового шлейфа на спутниковом снимке полностью в интерактивном режиме.

6.4.2.5. Оценка высоты пепловых облаков и шлейфов

В системе имеется две основных возможности оценки высоты верхней границы пепловых облаков и шлейфов: с использованием данных, полученных по метеорологическим прогнозам и спутниковой информации, и на основе сравнения наблюдений, полученных по данным геостационарных и низкоорбитальных спутников.

Оценка высоты пеплового облака с использованием данных, полученных по метеорологическим прогнозам и спутниковой информации. По тепловому каналу спутниковых данных находится радиояркостная температура верхней границы пеплового облака. Алгоритм поиска высоты основан на предположении, что радиояркостная температура, полученная на основе спутниковых данных, соответствует температуре атмосферы на определенной высоте. По профилю температур и высот из метеоданных выбирается высота, которой соответствует наблюдаемая температура, она считается высотой верхней границы пеплового облака.

Оценка высоты пеплового облака на основе сравнения наблюдений, полученных по данным геостационарных и низкоорбитальных спутников. Алгоритм поиска высоты пеплового облака основан на предположении, что облако на определенной высоте над поверхностью Земли будет иметь разные координаты на снимке с геостационара и с низкоорбитального спутника за счет разных углов съемки. На полученных с низкоорбитального спутника снимках и ближайшим по времени к ним снимкам геостационара выбирается одна и та же точка на верхней границе пеплового облака и вычисляются ее геодезические координаты с разных углов съемки – низкоорбитального и геостационарного спутников. С использованием модели движения находится точное положение низкоорбитального и геостационарного спутников в момент съемки. Далее путем пересечения плоскости съемки низкоорбитального и направления съемки геостационарного спутников получаются геоцентрические координаты точки на верхней границе пеплового облака. Выполнив преобразование координат из геоцентрических в геодезические, получаем высоту точки на верхней границе пеплового облака над поверхностью земного эллипсоида.

6.4.2.6. Инструменты для анализа динамических процессов

Поскольку процессы, связанные с активностью вулканов, достаточно динамичные, для их изучения, безусловно, необходимы инструменты, позволяющие анализировать разновременные данные и их ряды. В ИС VolSatView имеются различные инструменты, обеспечивающие эти возможности.

Так, в системе могут быть выбраны данные по одной и той же территории, полученные в разное время, но при примерно одинаковых условиях наблюдения, и осуществлен синтез изображений на основе этих данных. Это позволяет анализировать изменения, происходящие на исследуемых территориях. Например, на рис. 6.9 показан район вулкана Жупановский 12 сентября 2014 г. (до образования отложений обвала в 2015 г.), 15 сентября 2015 г. (после образования отложений обвалов 12 и 14 июня 2015 г.) и 25 августа 2016 г. (после образования отложений обвала 30 ноября 2015 г.) (Гирина и др., 2018в). Представлены RGB-синтезы изображений, в которых использованы различные каналы данных, при этом во всех случаях цвет R соответствует данным за 25 августа 2016 г., G – данным за 15 сентября 2015 г., B – данным за 12 сентября 2014 г. На представленном примере хорошо видны не только изменения общей структуры отложений обвалов, образовавшихся в результате взрывных событий, но и особенности их структур.

Для анализа динамики различных процессов достаточно эффективным также является инструмент, позволяющий анализировать ряды наблюдений в отдельных точках, полученные в различных спектральных каналах. На рис. 6.10 по данным спутника Himawari-8 представлено изменение яркостной температуры в районе вершины вулкана Безымянный за период с 1 декабря 2016 г. по 1 июля 2017 г. во время его экструзивно-взрывно-эффузивного извержения. Выделяются три явных пика значений яркостной температуры, соответствующие взрывным событиям 12 декабря 2016 г., 9 марта и 16 июня 2017 г. (Гирина и др., 2017а, 2017б; 2017в), и общее повышение температуры аномалии в течение рассматриваемого периода времени.

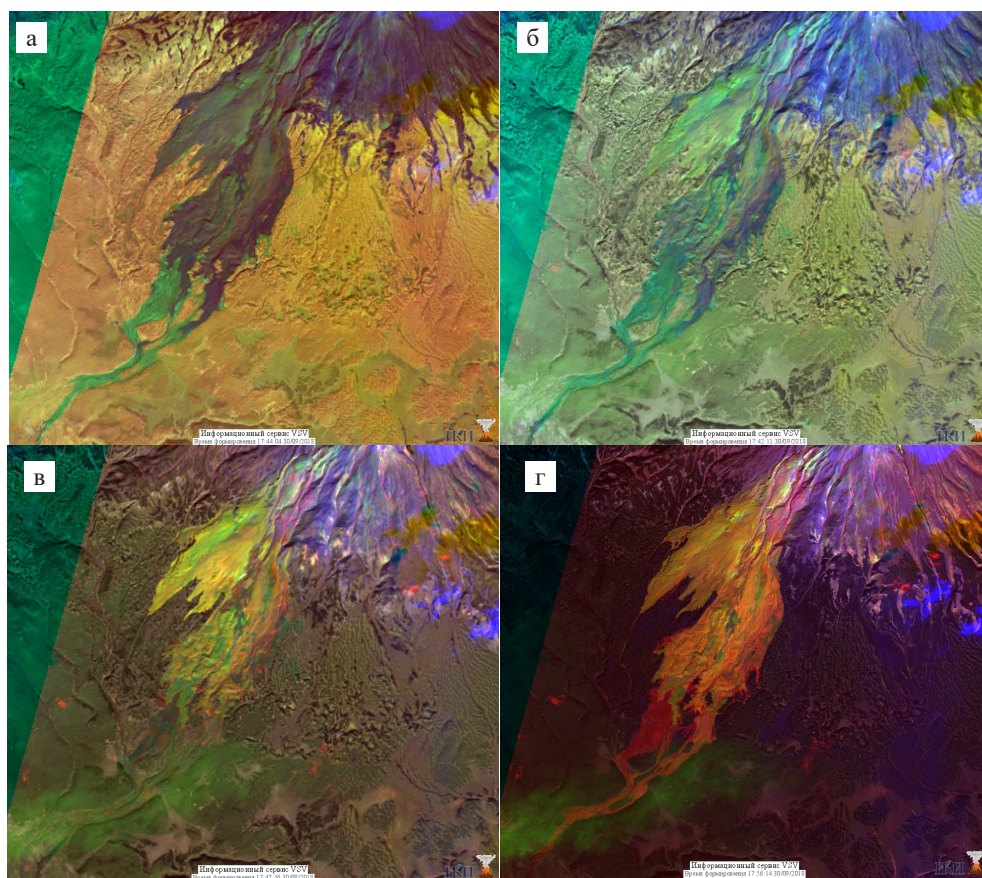


Рис. 6.9. RGB-синтезы данных спутника Landsat 8 по району вулкана Жупановский в период 2014–2015 гг. – до и после образования отложений обвалов. R (25 августа 2016 г.), G (15 сентября 2015 г.), B (12 сентября 2014 г.). Синтез каналов: а) 850–970 мкм, б) 1570–1650 мкм, в) 2110–2290 мкм, г) 500–680 мкм

Для анализа достаточно быстро развивающихся процессов извержений в ИС VolSatView реализована также возможность построения анимаций на основе различных спутниковых данных. Анализ анимаций позволяет, в частности, детально изучать процессы распространения пепловых шлейфов. Например, в работе (Гирина и др., 2017б), для анализа эруптивной активности в районе Северной группы вулканов 14–18 июня 2017 г. использовалась анимация (http://smis.iki.rssi.ru/data/download_free/volc_ash_plume/result_1706151500_170619133000_delay15.gif), созданная с использованием данных разности каналов 11,2 и 12,4 мкм прибора АНИ, установленного на спутнике Himawari-8. Анимация наглядно иллюстрирует скоротечность высокоэнергетичных эксплозивных извержений и долговременность существования в атмосфере пепловых облаков, представляющих реальную опасность для авиатранспорта (Gordeev, Girina, 2014) (см. главу 7).

Следует также отметить, что инструменты для анализа временных рядов данных, реализованные в VolSatView, позволяют не только визуализировать ряды

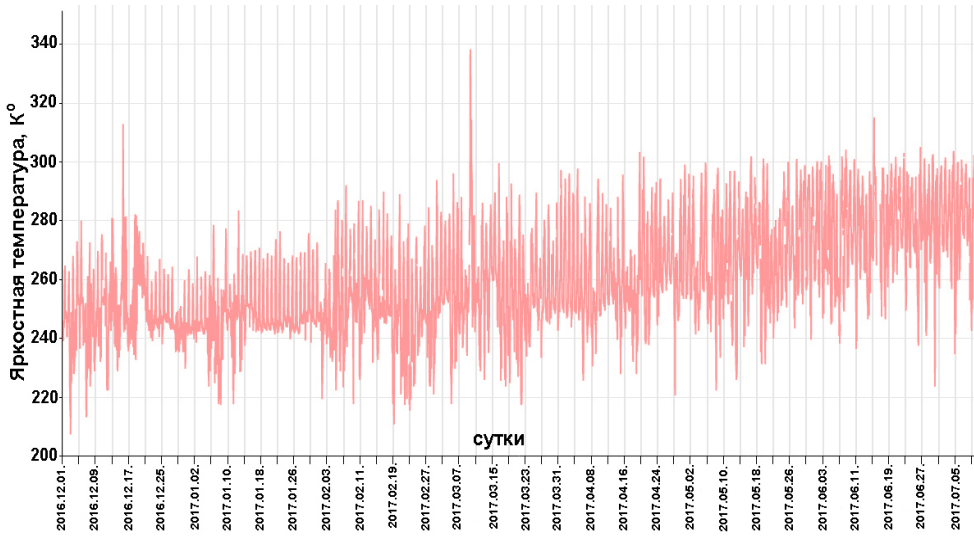


Рис. 6.10. Изменение яркостной температуры в районе вулкана Безымянный в течение извержения 2016–2017 гг. по данным Himawari-8 (7 канал, 3,9 мкм)

наблюдений, но и проводить с ними различные операции (вычислять различные индексы, производить временные осреднения и т. д.). Это, в частности, дает возможность выделять различные периоды активности вулканов. Достаточно яркий пример изменения активности вулкана Ключевской (излияния лавовых потоков – относительный покой – стромболианская активность) представлен на рис. 6.11.

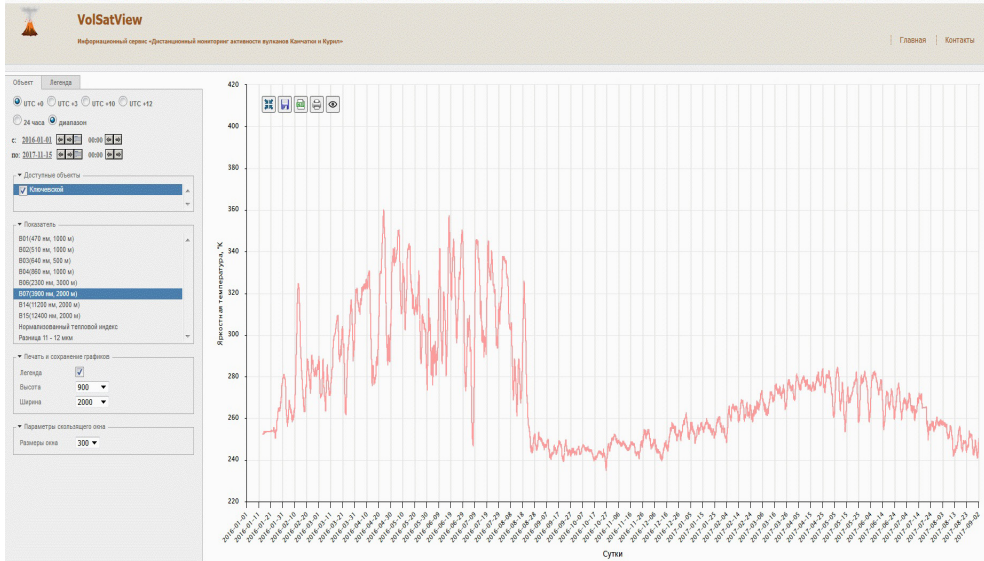


Рис 6.11. Динамика яркостной температуры в канале 3,9 мкм прибора АНТ спутника Himawari-8 участка постоянных наблюдений на вулкане Ключевской, осредненная окном в двое суток за период с января 2016 по ноябрь 2017 г.

6.4.2.7. Особенности работы с данными спутника Himawari-8

Первый геостационарный метеорологический спутник из серии Himawari (5 каналов) был запущен Японским метеорологическим агентством (Japan Meteorological Agency – JMA) 14 июля 1977 г. Спутники нового поколения Himawari-8 и Himawari-9 введены в эксплуатацию 7 июля 2015 г. и в марте 2017 г., соответственно (JMA: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/materials/Himawari89/himawari89_leaflet/201703_leaflet89.pdf). Предполагается, что спутники будут работать до 2029 г. Основным инструментом спутника Advanced Himawari Imager (AHI) имеет 16 каналов (3 в видимом, 3 в ближнем ИК (БИК) и 10 в тепловом ИК (ТИК) диапазонах) и вдвое увеличенное пространственное разрешение получаемых данных (видимые каналы имеют разрешение 500 м, а ИК каналы 1 км в подспутниковой точке). Важной особенностью спутников является то, что они позволяют получать информацию по своей зоне обзора каждые 10 мин (по некоторым районам – каждые 2,5 мин). Поскольку вся территория, на которой расположены действующие вулканы Камчатки и Курил, попадает в такую зону, спутник Himawari-8 предоставляет фактически уникальные возможности для их оперативного мониторинга.

Полный поток данных, получаемых со спутника Himawari-8, распространяется уполномоченными организациями национальных метеорологических агентств в рамках соглашений Всемирной метеорологической организации. В России это выполняет ДЦ НИЦ «Планета» (<http://www.dvrcpod.ru/>), через который были организованы получение и обработка данных со спутника Himawari-8 и их интеграция в ИС VolSatView для обеспечения оперативного мониторинга вулканов Камчатки и Курил. Схема организации получения, обработки и использования данных Himawari-8 в VolSatView представлена на рис. 6.12. Основной особенностью реализованной схемы является обеспечение получения постоянного потока данных (до 144 наблюдений в сутки) с задержкой не более 30 минут от времени съемки, произведенной спутником.

Эффективность получения и обработки данных Himawari-8 достигается в первую очередь тем, что в ИС VolSatView создается только базовый набор поканальных данных, на основе которого формируются «виртуальные» информационные продукты на момент конкретного запроса пользователя системы. Это дает возможность на порядки сократить необходимые для обработки данных мощности, а также объемы хранимой информации.

Как и для любой спутниковой информации, с которой работает ИС VolSatView, для анализа данных Himawari-8 можно использовать различные инструменты, реализованные в системе. При этом особое внимание при работе с данными Himawari-8 уделяется инструментам анализа временных рядов спутниковых наблюдений, в том числе, возможностям, обеспечивающим постоянное наблюдение отдельных участков вулканов. Примеры таких инструментов обсуждались в предыдущем разделе.

6.4.2.8. Анализ гиперспектральных данных

В связи с появлением в последние годы возможности массового использования данных спутниковых гиперспектрометров (ГС), они начали применяться в различ-

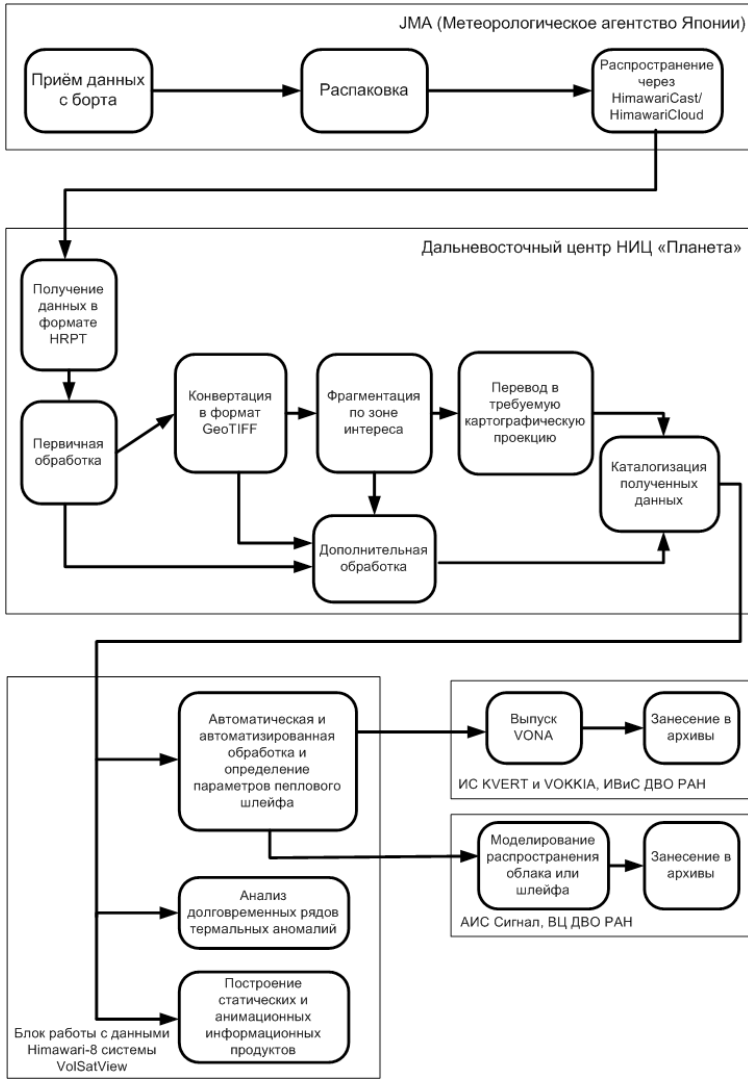


Рис. 6.12. Схема организации оперативного получения, обработки и использования для решения задач мониторинга и исследования вулканов Камчатки и Курил информации на основе данных спутника Himawari-8

ных областях знаний. В первую очередь это обусловлено тем, что ГС позволяют получить достаточно подробную информацию о спектральных характеристиках наблюдаемых объектов, другими словами, большое количество спектральных каналов гиперспектрометров дает возможность детализировать изображения на основе различных индексов и более точно анализировать и классифицировать изучаемые объекты. В последние годы появилось также значительное число работ, посвященных применению данных ГС в задачах исследования вулканической активности (Abrams et al., 2013; Коерпен et al., 2013; Wright et al., 2010, 2011; и др.).

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

- пепловых шлейфов, изменяющейся по мере их перемещения;
- лавовых потоков во время извержений вулканов;
- отложений пирокластических потоков вулканов и ее изменения с течением времени после завершения извержений;
- вулканогенных пород разного состава.

Поскольку данные ГС могут быть использованы для решения достаточно широкого круга задач, специалистами ИКИ РАН и ФИРЭ РАН (Филиал института радиоэлектроники Российской Академии наук) была разработана специализированная технология, позволяющая интегрировать эти данные в различные информационные системы дистанционного мониторинга, создающиеся на основе разработок ИКИ РАН (Саворский и др., 2016; Уваров и др., 2014). Технология позволяет: организовать автоматическое получение данных ГС из различных центров, обеспечивающих их распространение; проводить автоматическую обработку данных и преобразовывать их в вид, позволяющий осуществлять быстрый выбор необходимой для анализа информации (как пространственной, так и спектральной); осуществлять автоматическое ведение архивов данных ГС; создавать интерфейсы для удаленного анализа данных ГС совместно с информацией, получаемой от других систем наблюдения. Именно эта технология была использована при создании блока работы с данными ГС в ИС VolSatView.

Созданный блок ориентирован на работу в основном с данными гиперспектрометра Hyperion (High Resolution Hyperspectral Imager), установленного на спутнике EO-1 (Еремеев и др., 2003; Abrams, Hook, 2013; Chang et al., 2004; Griffin et al., 2000, 2005). Этот прибор позволяет получать информацию в 242 спектральных каналах в диапазоне 0,4–2,5 мкм (видимый + ближний ИК-диапазоны) со спектральным разрешением 10 нм и пространственным разрешением 30 м. Hyperion обеспечивает съемку в полосе 7,5 км кадрами протяженностью до 100 км. Прибор обладает достаточно высокой радиометрической точностью и обеспечивает хорошую географическую привязку. Выбор этого прибора для использования его в VolSatView во многом определялся доступностью его данных. Значительное количество информации, получаемой прибором Hyperion, свободно распространяется Геологической службой США (USGS). Это позволило организовать автоматизированное поступление данных в VolSatView из архивов службы (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). В системе сформирован архив данных с 2002 г. по районам Камчатки и Курил, он продолжает оперативно пополняться. Для работы с данными ГС в ИС VolSatView созданы специальные интерфейсы, позволяющие проводить анализ их данных (Гордеев и др., 2014, 2015). Ниже приводятся несколько примеров возможностей использования ГС данных в ИС VolSatView.

6.4.2.8.1. Анализ структуры отложений пирокластических потоков вулканов

Анализ спектральной яркости и спектральной отражательной способности поверхностей вулканогенных объектов позволяет выделять и анализировать вулканогенные образования одного типа, но различного возраста. Например, в южной

части вулкана Шивелуч в голоцене накоплены мощные толщи пирокластических отложений. В 1964 г. произошло очередное катастрофическое извержение вулкана, и отложения пирокластических потоков залили весь южный сектор вулкана. С 1980 г. начался рост лавового купола в эксплозивном кратере 1964 г., с 1984 г. до сегодняшнего дня время от времени происходят мощные эксплозии в районе лавового купола, раскаленные лавины и пирокластические потоки при таких событиях наращивают толщу современной пирокластики на отложениях 1964 г. Возможность разделения современных рыхлых пирокластических отложений и древних, возникших в результате извержений в 1854 г. и ранее, показана на рис. 6.13. Интересно то, что современные и древние вулканогенные образования сильно различаются в спектральных диапазонах 400–900 нм и 1400–1800 нм, в то время как в спектральных областях 1000–1300 нм и 2000–2400 нм их отличия не так заметны. Это позволяет надеяться, что появится возможность в одних спектральных диапазонах (например, 1000–1300 нм) выделять вулканические продукты одного генезиса, вне зависимости от его возраста, в то время как использование других диапазонов (например, 400–900 нм) позволит классифицировать образования по возрасту. Такая информация может обеспечить более точное восстановление динамики активности каждого из вулканов, и, следовательно, точнее прогнозировать развитие каждого вулкана в будущем и степень его опасности для населения.

6.4.2.8.2. Анализ пепловых шлейфов

При сильных эксплозивных извержениях вулканов эруптивные колонны выносят пепел на значительные высоты. Выше уже говорилось об опасности пепловых шлейфов для авиации, главной же проблемой для вулканологов и пилотов остается до настоящего времени оценка степени насыщенности пеплом таких шлейфов, а также определение порога количества в них пепла, ниже которого такие шлейфы будут относительно безопасны для авиации. Нужно сказать, что некоторые шаги в направлении решения этой проблемы сделаны и делаются (например, Wen, Rose, 1994). На рис. 6.14 показан пепловый шлейф вулкана Ключевской во время извержения в 2007 г. Кульминационная стадия извержения с подъемом пепловых шлейфов до 10–12 км н.у.м. отмечалась с 19 июня по 4 июля, затем активность вулкана стала постепенно снижаться – до середины июля пепловые колонны

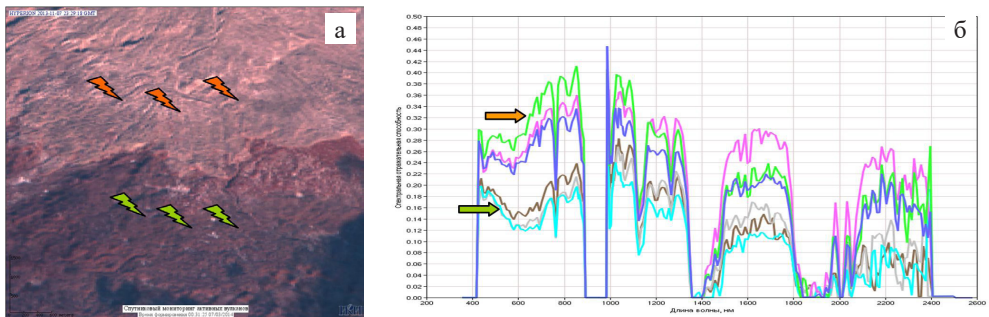


Рис. 6.13. Поверхности отложений пирокластических потоков в районе вулкана Шивелуч: современных (светлый тон окраски), древних – покрытые лесом (темный тон окраски) (а); кривые спектральной отражательной способности для светлых и темных областей в спектральном диапазоне (б). Данные прибора Hyperion от 07.11.2013

поднимались до 5–7 км н.у.м. (Гирина и др., 2009). Для характеристики пеплового шлейфа были получены кривые спектральной отражательной способности в нескольких точках по его оси (наибольшее количество пепла) и на его краях. Можно отметить, что в диапазонах 1000–1300 нм, 1500–1800 нм и 2100–2300 нм спектральные характеристики краевых и осевой частей шлейфа хорошо различаются (рис. 6.14). Точки, взятые на оси пеплового шлейфа (протяженность его на снимке – примерно 3,5 км от вулкана), показывают сближенные значения, хотя просматривается и некоторая зависимость – самый высокий показатель спектральной отражательной способности принадлежит точке в районе кратера вулкана, то есть наибольшему количеству пепла. Заметим, что хотя расстояние между двумя точками на краях шлейфа около 3 км, значения их спектральной отражательной способности почти совпадают (0,10–0,11), но они ниже, чем параметры точек на оси шлейфа (0,15–0,17). Необходимо сказать, что отложения на склоне вулкана Ключевской и пеплы в шлейфе имеют один состав (базальты – андезибазальты), характер их спектральных кривых похож, но величина спектральной отражательной способности отложений значительно меньше (0,03), чем насыщенного пеплом шлейфа. Возможно, гиперспектральные данные помогут выделять в пепловых шлейфах зоны с различной концентрацией частиц пепла.

6.4.2.8.3. Анализ парогазовых шлейфов

В периоды между эксплозивными извержениями активные вулканы, как правило, находятся в состоянии мощной или умеренной парогазовой деятельности. Пример кривых спектральной яркости различных участков парогазового шлейфа вулкана Ключевской 13 ноября 2013 г. приведен на рис. 6.15. Хотя точки взяты достаточно близко от вершины, хорошо видно, что и на таком расстоянии, судя по характеру кривых, плотность шлейфа на выбранных участках меняется. Особо следует отметить, что в диапазоне 1800–2100 нм, в котором находятся линии поглощения водяного пара и CO_2 , кривые спектральной яркости изучаемых участков сближены, что подтверждает преобладание в шлейфе водяного пара.

6.4.2.8.4. Анализ пород на склонах вулканов

Одной из уникальных особенностей Ключевской группы вулканов является, например, то, что вулканы, извергающие магматическое вещество контрастного состава, находятся практически рядом. Вулкан Ключевской извергает базальты и андезибазальты, вулкан Безымянный – типичные андезиты, хотя расстояние между их вершинами всего 10 км. Это позволяет на одном снимке Nuregion рассмотреть спектральные характеристики вулканогенных пород различного состава (рис. 6.16). Для склонов вулканов примерно с одной освещенностью отмечается следующее: если в спектральном диапазоне 400–900 нм величина спектральной отражающей способности базальтов Ключевского несколько выше, чем андезитов Безымянного, то в диапазонах 1500–1800 нм и 2100–2400 нм ее значение в 3–3,5 раза ниже таковой андезитов Безымянного. Полученные данные в диапазонах 1500–1800 нм и 2100–2400 нм согласуются с характеристиками базальтов и андезитов, имеющимися в базах спектральных данных (Clark et al., 2007; Wright et al., 2013). Возможно, анализ вулканогенных пород с помощью гиперспектральных данных

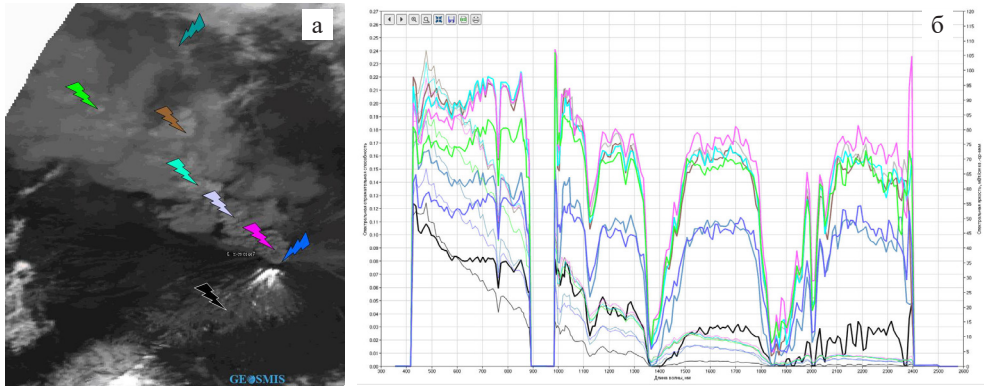


Рис. 6.14. Пепловый шлейф вулкана Ключевской 08.07.2007., «молниями» показаны точки, в которых восстанавливались спектральные профили (а); кривые спектральной отражательной способности для различных участков пеплового шлейфа (синяя и зелено-голубая – на краях шлейфа; остальные – по оси шлейфа; черная – вне шлейфа) (б). Данные прибора Nupregion.

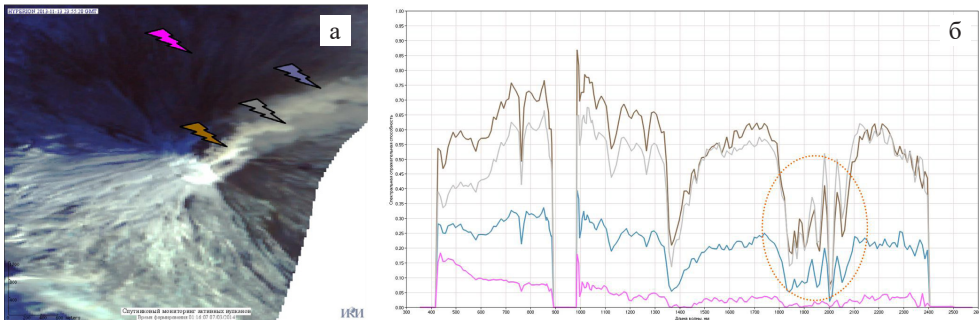


Рис. 6.15. Парогазовый шлейф вулкана Ключевской 13.11.2013.: «молниями» показаны точки, в которых восстанавливались спектральные профили (а); кривые спектральной отражательной способности для различных участков шлейфа и точка вне шлейфа (б). Данные прибора Nupregion

поможет более детально рассмотреть соотношения отложений разного состава в районе Ключевской группы вулканов и позволит выявить последовательность их образования.

6.4.2.8.5. Совместный анализ результатов моделирования распространения пепловых шлейфов и спутниковых данных

В картографическом web-интерфейсе ИС VolSatView для удаленной работы с системой моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов, описанной в главе 5, созданы специальные разделы, которые позволяют исследователю сформировать задание на проведение моделирования конкретного эксплозивного события, передать его в АИС «Сигнал», проследить статус его выполнения и получить доступ к результатам моделирования. При формировании задания исследователь может выбрать интересующий его вулкан и установить необходимые для моделирования параметры события, описанные выше.

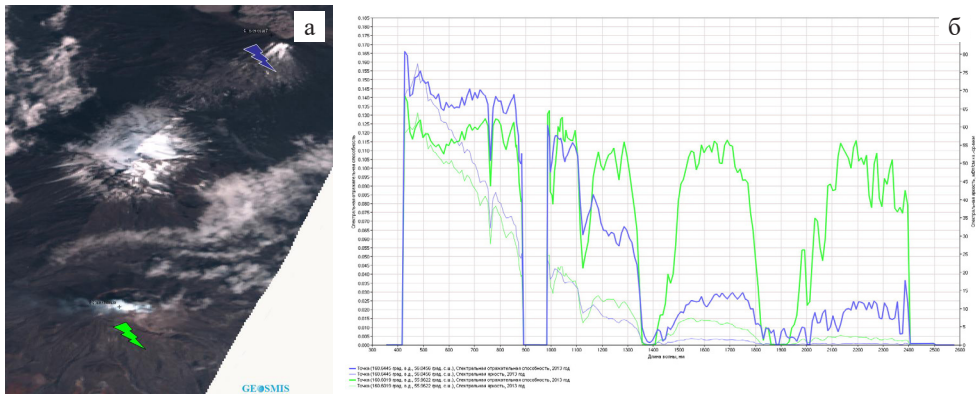


Рис. 6.16. Спектры пород на склонах вулканов Ключевской и Безымянный 08.07.2007., «молниями» показаны места, в которых восстанавливались спектральные профили (а); зеленый график – андезиты на склоне вулкана Безымянный, синий – базальты на склоне вулкана Ключевской (б).

Для анализа результатов моделирования распространения пепловых облаков и шлейфов реализован специальный интерфейс, управляющий выбором и визуализацией данных. Результаты моделирования представляются в картографическом интерфейсе системы в виде набора точек (модельных частиц пепла), цвет которых соответствует высоте н.у.м., на которой пепловые частицы находятся в заданный момент времени. Имеется возможность просмотра результатов по каждому шагу моделирования (географическое положение частиц и их высоты н.у.м.), а также на отдельных интервалах высоты н.у.м.

Результаты моделирования могут визуализироваться в системе совместно с различными информационными продуктами, получаемыми на основе спутниковых данных (см. главу 5). Пример восстановления динамики извержения вулкана на основе спутниковых данных и результатов моделирования распространения пепловых облаков см. в главе 7.

Глава 7. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НАЗЕМНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОБ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными в мире в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и их непредсказуемостью. Такие извержения протекают быстро, для обеспечения не только наблюдений за ними, но и их изучения, в том числе для прогнозирования связанных с ними явлений (например, распространение пирокластических потоков, пепловых облаков и шлейфов, лахаров и т. д.), необходимо проведение комплексного мониторинга вулканов с использованием данных всех доступных видов наблюдений (наземных и дистанционных инструментальных средств, метеорологической информации и т. д.).

Комплексность мониторинга вулканов Камчатки совместно с историческими данными об их извержениях позволяет оперативно отслеживать изменения в характере эруптивной активности каждого из извергающихся вулканов, определять направление и протяженность распространения пепловых шлейфов, выделять территории на склонах и у подножия вулканов, наиболее подверженные распространению пирокластических потоков, то есть оперативно и объективно оценивать опасность eksploзивных извержений для авиации и населения и своевременно предупреждать о такой опасности заинтересованных пользователей.

7.1. Комплексный анализ данных об извержениях вулканов Камчатки

Вулкан Шивелуч, eksploзивное событие 28 февраля 2015 г. Эруптивная активность вулкана, начавшаяся в августе 1980 г., продолжается до настоящего времени. Происходит рост экструзивного купола вулкана – выжимаются лавовые блоки, этот процесс сопровождается умеренной силы eksploзиями, раскаленными лавинами, свечением лавы и раскаленных лавин в темное время суток, сильной и умеренной парогазовой деятельностью.

По видеоданным, в 01:08 UTC 28 февраля 2015 г. с купола вулкана начала подниматься пепловая колонна, через минуту она достигла 5,5 км н.у.м. (рис. 7.1а), в следующую минуту вершинная часть колонны исчезла за кромкой кадра (рис. 7.1б). Максимальный подъем колонны пепла до 10 км н.у.м. наблюдался в 01:12 UTC

(рис. 7.2а), затем она начала снижаться и трансформироваться в пепловое облако (рис. 7.2б). По данным из ИС VolSatView, первый снимок, на котором был отмечен 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 радиоярких температур в каналах 11–12 мкм (31m32), были изме-

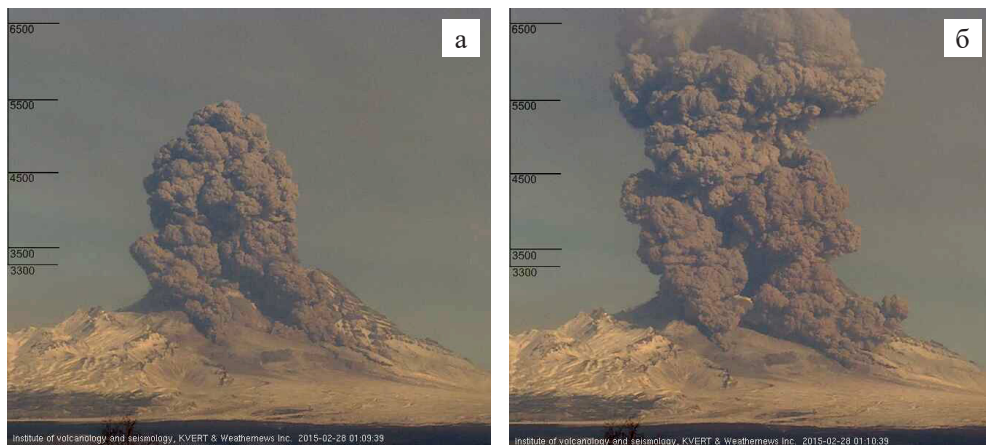


Рис. 7.1. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г.: (а) подъем эруптивной колонны до 5,5 км н.у.м. в 01:09 UTC; (б) выше 7 км н.у.м. в 01:10 UTC по видеоданным KVERT и Weathernews Inc.

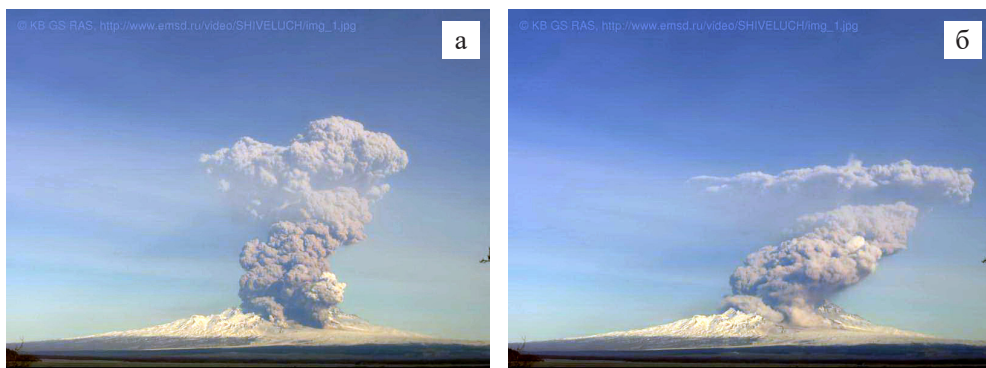


Рис. 7.2. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г.: (а) подъем эруптивной колонны до 10 км н.у.м. в 01:12 UTC; (б) снижение ее до 9 км н.у.м. в 01:15 UTC по видеоданным КФ ФИЦ ЕГС РАН

рены его протяженность (59 км) и направление перемещения от вулкана (азимут 72°), а также по температуре пеплового облака (рис. 7.3) и атмосферному профилю была определена высота его головной части, составившая 9 км н.у.м. Снижение пепловой колонны и трансформация ее верхней части в пепловое облако и затем в шлейф показано на рис. 7.2б и 7.4.

Комплексный анализ изображений с двух видеокамер (KVERT и Weathernews Inc. и КФ ФИЦ ЕГС РАН) и спутниковых данных из ИС VolSatView позволил



Рис. 7.3. Температура пеплового шлейфа вулкана Шивелуч на спутниковом снимке TERRA MODIS от 01:17 UTC 28 февраля 2015 г., по данным ИС VolSatView

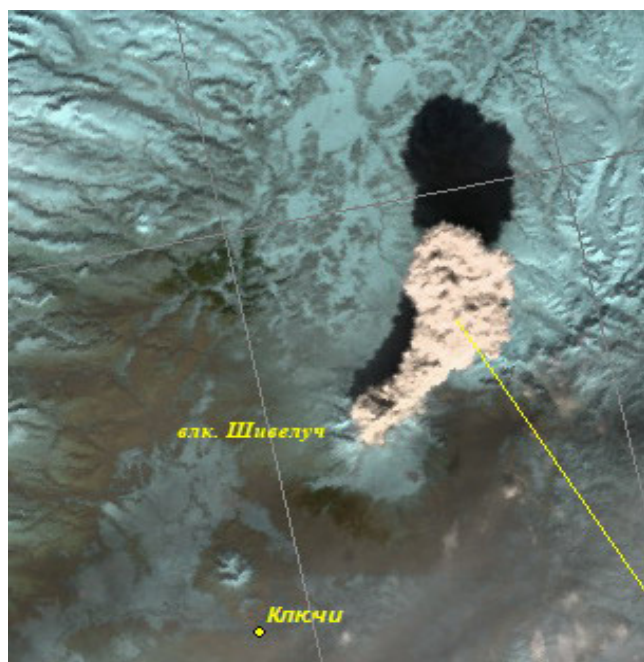


Рис. 7.4. Трансформация верхней части пепловой колонны вулкана Шивелуч в шлейф на спутниковом снимке Suomi NPP от 01:15 UTC 28 февраля 2015 г., по данным ИС VolSatView

оценить высоту пепловой колонны и направление смещения пеплового шлейфа и выпустить VONA с корректными данными об эксплозивном событии и прогнозе опасности вулкана для авиатранспорта (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/index.php?n=2015-105>). Визуализация в ИС VolSatView результатов моделирования перемещения пеплового шлейфа, полученных с помощью АИС «Сигнал», на спутниковом снимке, на котором ясно выделялся пепловый шлейф, показала хорошую сопоставимость (рис. 7.5) (Гордеев и др., 2016б).

Вулкан Жупановский, эксплозивное событие 24 марта 2016 г. Согласно данным со спутника Himawari-8, предоставленным Токио VAAC, эксплозивное событие начало развиваться в 13:50 UTC 24 марта. Пепловое облако, поднявшись до 8,5 км н.у.м., немного растягиваясь с севера на юг, перемещалось на северо-запад (азимут 289°) от вулкана. В 16:00 UTC головная часть облака, насыщенная пеплом, была на расстоянии 96 км от вулкана, в 16:25 UTC – в 107 км, в 17:13 UTC – в 134 км,

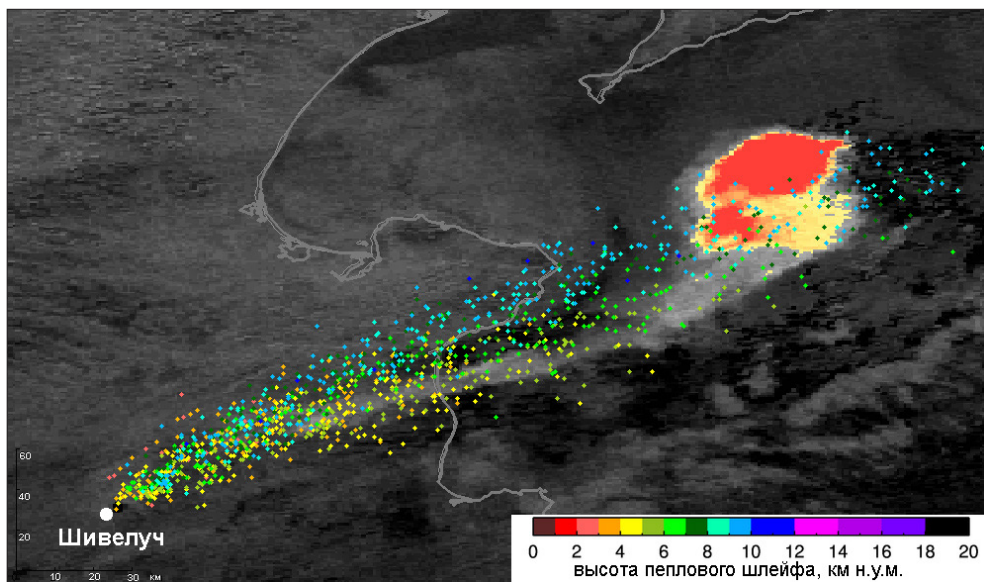


Рис. 7.5. Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа вулкана Шивелуч 28 февраля 2015 г., выполненные по модели PUFF в АИС «Сигнал» и визуализированные в ИС VolSatView на спутниковом снимке NOAA-19 (4m5) от 02:41 UTC 28 февраля 2015 г.

то есть пепловое облако перемещалось на северо-запад от вулкана со средней скоростью 42 км/ч. Вулкан был закрыт облачностью, поэтому видеоданные о событии отсутствуют.

Утром 24 марта в п. Малки в 110 км на запад-юго-запад от вулкана Жупановский были обнаружены отложения пепла, количество которого составило 7 г/м^2 (по данным Т.М. Маневич, ИВиС ДВО РАН). После улучшения погоды 28 марта на спутниковых снимках четко прослеживалась полоса пепла от вулкана Жупановский в сторону п. Малки (рис. 7.6), но пепловых отложений в направлении на северо-запад не отмечалось.

Моделирование распространения пеплового шлейфа от Жупановского 24 марта показало различное на разных высотах и расстояниях от вулкана перемещение пеплового облака, обусловленное сложными метеорологическими условиями в районе южной Камчатки в это время. В связи с различающимися скоростями ветра в нижних и верхних слоях атмосферы головная часть облака, состоящая, вероятно, из большого количества очень тонких легких частиц пепла, способных удерживаться на одном уровне в атмосфере, относительно быстро на высоте около 8 км н.у.м. перемещалась на северо-запад от вулкана (рис. 7.7а). Другое облако, возможно, сформированное при обрушении эруптивной колонны и/или части конуса Приемьш, насыщенное тяжелыми крупными частицами пепла и обломками пород, подхваченное приземными ветрами, перемещалось на запад-юго-запад от вулкана (азимут 267°) в сторону п. Малки (рис. 7.7б). Отложения этого пепла наблюдаются на спутниковых снимках на площади не менее 200 км^2 .

Комплексный анализ спутниковых и наземных наблюдений, а также результатов моделирования распространения пепловых облаков от вулкана позволил рекон-



Рис. 7.6. Отложения пепла вулкана Жупановский (эксплозивное событие 24 марта 2016 г.) на спутниковом снимке AQUA от 00:18 UTC 28 марта 2016 г.

струировать эксплозивные события 24 марта 2016 г. и лучше понять динамику эруптивного процесса вулкана Жупановский (Гордеев и др., 2016б).

Северная группа вулканов Камчатки 14–16 июня 2017 г. Эта группа включает вулканы Шивелуч, Заречный, Харчинский и Ключевскую группу вулканов (Ключевской, Камень, Безымянный, Ушковский, Крестовский, Средний, Острый Толбачик, Плоский Толбачик, Овальная Зими́на, Острая Зими́на, Горный Зуб, Большая Удина, Малая Удина). Пять из 16 вулканов Северной группы относятся к действующим (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский), причем три из них – наиболее активные вулканы не только Камчатки, но и мира. Они находятся в состоянии почти непрерывного слабого извержения, на фоне которого происходят кульминационные сильные эксплозивные события: Молодой Шивелуч активен с августа 1980 г., со времени начала роста лавового купола в эксплозивном кратере катастрофического извержения 12 ноября 1964 г.; Ключевской – в течение нескольких сотен лет; Безымянный – с 22 октября 1955 г., со времени пробуждения после длительного молчания (Горшков, 1957; Иванов и др., 1981; Пийп, 1956; Girina, 2013).

14–16 июня 2017 г. в районе Северной группы вулканов произошло уникальное явление – два мощных пароксизмальных извержения вулканов Шивелуч (14 июня в 16:20 UTC) и Безымянный (16 июня в 04:53 UTC) с подъемом пепловых облаков до 12 км н.у.м. на фоне продолжающегося непрерывно с 1 июня умеренного эксплозивного извержения вулкана Ключевской с выносом пепла до 7–7,5 км н.у.м. Сложная метеорологическая обстановка в районе Северной группы вулканов не позволяла провести детальные наземные наблюдения за развитием извержений, поэтому наиболее полная информация об извержениях трех вулканов была получена при анализе спутниковых данных в ИС VolSatView (Гирина и др., 2017а). По

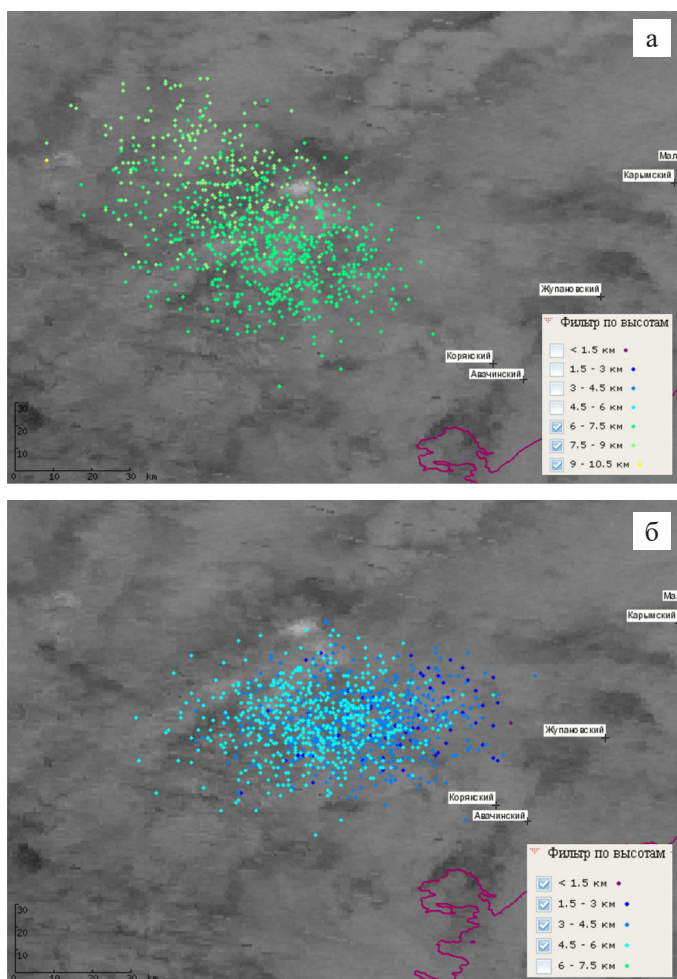


Рис. 7.7. Результаты моделирования распространения пеплового шлейфа вулкана Жупановский 24 марта 2016 г., выполненные по модели PUFF в АИС «Сигнал» и визуализированные в ИС VolSatView на спутниковом снимке AQUA (31m32) от 16:00 UTC 24 марта 2016 г. на высотах: (а) 6–10 км н.у.м. и (б) 1–6 км н.у.м.

визуальным данным были отмечены пеплопады в окрестных поселках, рассчитана скорость распространения фронта пепловой тучи Шивелуча в направлении на п. Ключи (около 30 км/ч) и др.

14 июня в 16:10 UTC на спутниковом снимке Himawari-8 наблюдался узкий пепловый шлейф, протянувшийся от вулкана Ключевской на 346 км (азимут 255°) волнообразно через вершину вулкана Ичинский до западного побережья Камчатки. В 16:20 UTC начались эксплозии на вулкане Шивелуч. Около 16:32 UTC пепловая колонна поднялась до 12 км н.у.м., и ее верхняя часть начала трансформироваться в пепловое облако, размер которого в 16:40 UTC был примерно 41 x 39 км и площадь – 1200 км². Эксплозивные события и развитие пепловой колонны над вулканом наблюдались также по видеокамерам (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/volc.php?ln=vid&name=Sheveluch>) и визуально (рис. 7.8).



Рис. 7.8. Пепловая колонна над вулканом Шивелуч в 16:38 UTC 14 июня 2017 г.
Фото из п. Ключи А.В. Возникова

Примерно в 16:35 UTC на поверхности расширявшейся во все стороны эруптивной тучи появилось газовое облако (своеобразная «шапочка»), размер которого в 17:44 UTC был примерно 30 x 24 км (пепловой тучи – 69 x 68 км) (рис. 7.9) и в 20:30 UTC – примерно 75 x 80 км (пепловой тучи – 220 x 150 км). Обрушения пирокластических потоков на южный склон вулкана (протяженностью 8–9 км и площадью около 5 км²) и формирование над ними пепловых облаков привели к тому, что с 17:00 UTC из-под пепловой тучи, находившейся над вулканом на высоте 10–12 км н.у.м., на юго-запад от него со скоростью около 30 км/ч начало смещаться пепловое облако на высоте 5–6 км н.у.м. В 17:30 UTC 14 июня в п. Ключи начался пеплопад, который продолжался с различной интенсивностью примерно до 06:00 UTC 16 июня. Кроме того, под действием фронта циклона, господствовавшего у восточного побережья Камчатки, с 18:30 до 20:30 UTC пепловая туча, понемногу смещаясь на северо-запад, все более растягивалась и перемещалась от вулкана на северо-восток и юго-запад. К 21:00 UTC огромное пепловое облако (туча) было окончательно разорвано на два, одно из них стало двигаться на север и северо-восток от вулкана со скоростью 50–70 км/ч, а другое, под действием того же циклона, на много часов почти остановилось в движении в восточной части долины р. Камчатки – в пп. Козыревск, Атласово, Лазо, Таежный прошли пеплопады. Например, в 01:40 UTC 15 июня фронт первого облака находился от вулкана в 242 км на северо-восток (азимут 36°), фронт второго – в 235 км на юго-запад (азимут 228°); тогда как в 06:00 UTC в этот же день фронт первого облака был от вулкана в 640 км на северо-восток (азимут 65°), фронт второго – в 294 км на юго-запад (азимут 228°).



Рис. 7.9. Одновременные извержения вулканов Шивелуч и Ключевской (пепловый шлейф) 14 июня 2017 г. Пепловое облако над вулканом Шивелуч на высоте 12 км н.у.м. в центральной части перекрыто облаком газа. Спутниковые данные AVHRR и Himawari-8 из ИС VolSatView.

Следует отметить, что все это время продолжалось эксплозивное извержение вулкана Ключевской, и его пепел непрерывно добавлялся в южное пепловое облако Шивелуча. Примерно с 07:00 UTC 15 июня циклон начал разворачивать и смещать южное облако на северо-восток, разворачивался и пепловый шлейф Ключевского – в 13:50 UTC этого дня он уже протягивался на восток от вулкана. В это же время длина изогнутого дугой общего облака, протянувшегося от вулкана Карымский в северную часть Берингова моря, направление которого в районе мыса Олюторский менялось на юго-восточное, при ширине его в некоторых частях до 200 км, составляла 1100 км. Район Северной группы вулканов постепенно закрывался облачностью, а часть длинного облака, протянувшегося над морем, смещалась на юг – в 04:30 UTC 16 июня в п. Никольское на о. Беринга начал выпадать пепел вулкана Шивелуч.

На фоне продолжения перемещения в восточных направлениях чреды крупных облаков пепла, образовавшихся при извержении Шивелуча 14 июня (рис. 7.10), с 07:10 UTC 15 июня на этом вулкане начала наблюдаться примесь пепла в парогазовом шлейфе, в 10:36 UTC произошел выброс пепла до 4,5 км н.у.м., в 16:36 UTC – до 5,5 км н.у.м., в 20:35 UTC – до 7 км н.у.м., пепловые облака перемещались на восток-юго-восток от вулкана.

На вулкане Безымянный в течение 12–15 июня отмечалось повышение температуры термальной аномалии, а также рост количества раскаленных лавин и мощности парогазовой деятельности, поэтому 15 июня в 10:50 UTC было опубликовано предупреждение KVERT о возможном скором его пароксизмальном извержении

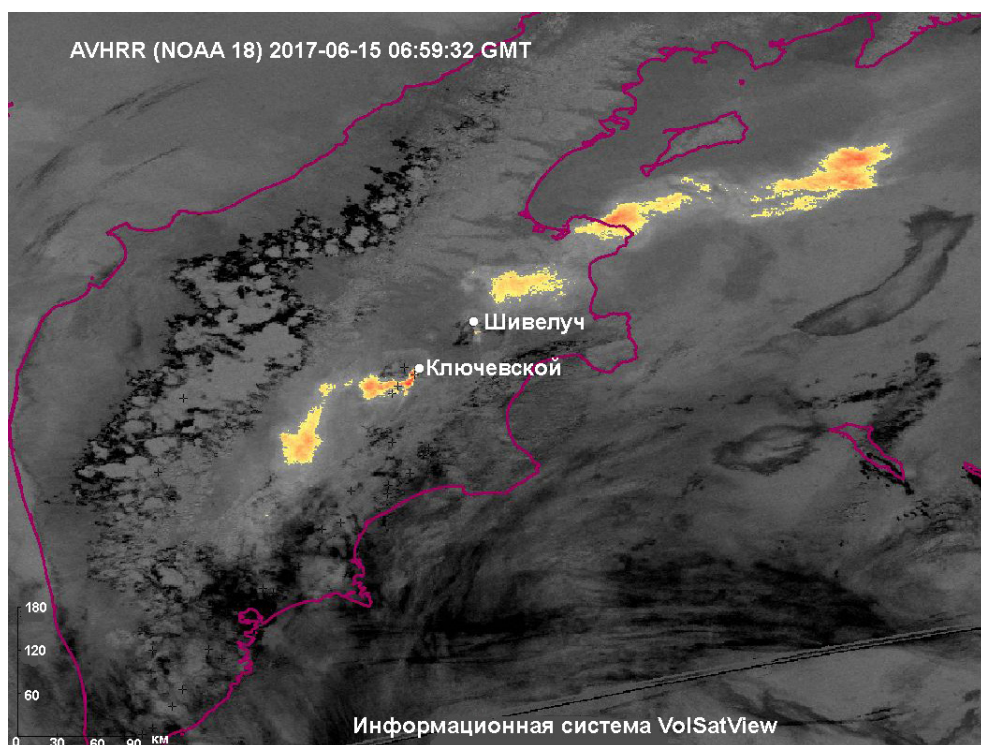


Рис. 7.10. Эруптивная активность в районе Северной группы вулканов 15 июня 2017 г.: пепел шлейфа вулкана Ключевской смешивается с пеплом южного облака, извергнутого вулканом Шивелуч 14 июня; северное пепловое облако Шивелуча, протянувшись на несколько сотен километров, продолжает двигаться на северо-восток от вулкана

с выбросом пепла до 10–15 км н.у.м. (VONA 2017–136). Такое событие началось в 04:53 UTC 16 июня – пепловое облако при взрывах поднялось до 12 км н.у.м. и сначала смещалось на северо-восток, затем на восток от вулкана (рис. 7.11). В 09:10 UTC 16 июня фронтальная часть пеплового облака (размером примерно 212 x 115 км) находилась на расстоянии 246 км на восток от Безымянного, в 20:00 UTC этого дня – в 600 км на восток от него (пепловое облако размером около 461 x 244 км). Примерно с 15:00 UTC 16 июня в п. Никольское начал выпадать пепел вулкана Безымянный. Площадь пеплового облака вулкана Безымянный с 05:00 до 21:00 UTC 16 июля 2017 г. увеличилась со 103 до 65 065 км².

Высокая частота получаемых данных Himawari-8 и инструменты, обеспечивающие их сопоставление с результатами моделирования распространения пеплового облака во время извержения вулкана, выполненного по модели PUFF, позволили подтвердить достаточно хорошее качество моделирования и уточнить параметры модели для повышения точности прогнозирования распространения пеплового облака (рис. 7.12).

16 июня с 08:32 UTC в парогазовом шлейфе вулкана Шивелуч начал наблюдаться пепел, в 21:55 UTC эксплозии Шивелуча подняли пепел до 7,5 км н.у.м., пепловое облако перемещалось на восток-северо-восток от вулкана.

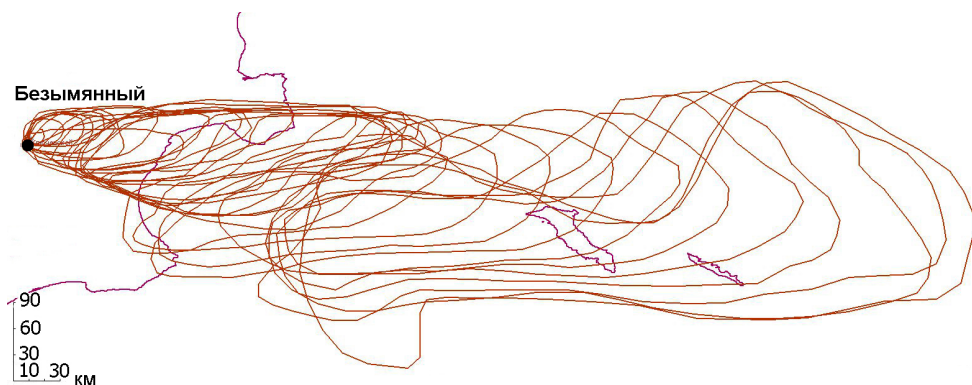


Рис. 7.11. Изменение площади пеплового облака вулкана Безымянный с 05:00 до 21:00 UTC 16 июля 2017 г. по спутниковым данным Himawari-8 в ИС VolSatView

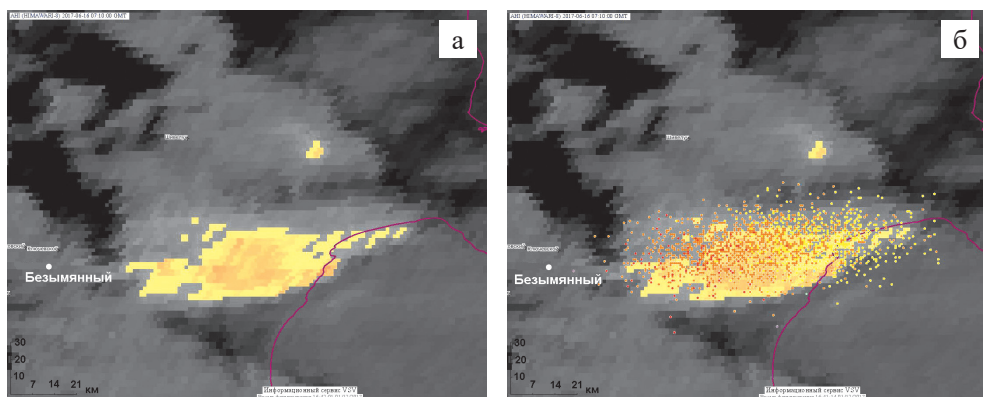


Рис. 7.12. Извержение вулкана Безымянный 16 июля 2017 г. по спутниковым данным Himawari-8: а) пепловое облако от вулкана, б) совместное представление пеплового облака и результата его моделирования. Данные из ИС VolSatView

18 июня в 16:28 UTC началось сильное эксплозивное событие на Шивелуче, при котором пепловое облако поднялось до 10 км н.у.м., на южный склон вулкана обрушились пирокластические потоки, насыщенное пеплом облако перемещалось на юго-восток от вулкана, с 23:50 UTC 18 июня в п. Никольское начал выпадать пепел Шивелуча. Фронтальная часть пеплового облака в 15:10 UTC 19 июня находилась на расстоянии 1500 км на юго-восток от вулкана, но пепел, извергнутый Шивелучем 14 июня и Безымянным 16 июня, отмечался на расстоянии более 4500 км от них в центральной части Тихого океана до 19 июня.

В результате извержений 14–18 июня 2017 г. на территории Камчатки на площади около 47 800 км² прошли пеплопады, мощность отложений пепла варьировалась от 0,5 до 3 мм. Количество пепла, отложившегося в течение 14–16 июня, например, в п. Ключи составило, по данным Ю.В. Демянчука, 330 г/м², в п. Атласово – 250 г/м².

Детальный анализ спутниковых данных Himawari-8 в ИС VolSatView и построенной на их основе анимации всего периода эруптивных событий (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/sample.gif>) позволил не только проследить

перемещения пепловых облаков и шлейфов от вулканов и измерить их параметры (ширину, протяженность, азимут распространения, площадь), но и восстановить с точностью до 10 и менее минут начало и динамику развития всех взрывных событий (Гирина и др., 2017а, 2017б). Анимационная картина ярко иллюстрирует скоротечность высокоэнергетичных взрывных извержений и долговременность существования в атмосфере пепловых облаков, представляющих реальную опасность для авиатранспорта (Gordeev, Girina, 2014).

Извержение вулкана Безымянный 20 декабря 2017 г. Безымянный – один из наиболее активных вулканов мира, расположен в центральной части Ключевской группы вулканов Камчатки. После катастрофического извержения 30 марта 1956 г. рост лавового купола в его взрывном кратере продолжался почти непрерывно (Girina, 2013).

Согласно спутниковым данным из ИС VolSatView, с 14 декабря 2017 г. температура термальной аномалии в районе Безымянного начала постепенно повышаться. Кроме этого, по видеоданным примерно с этого времени стали наблюдаться высокая парогазовая активность вулкана и свечение вершины лавового купола в ночное время. С 18 декабря стали отмечаться обрушения раскаленных лавин на юго-восточный склон купола, поэтому в этот день АЦК вулкана был изменен с Желтого на Оранжевый (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2017-263>) и было указано, что сильное взрывное извержение с выносом пепла до 15 км н.у.м. возможно в любое время. В связи с дальнейшим повышением температуры аномалии, ростом интенсивности парогазовой активности вулкана и раскаленных лавин, 20 декабря в 03:06 UTC было опубликовано предупреждение KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2017-266>) о том, что взрывное извержение вулкана с выносом пепла до 15 км н.у.м. возможно в ближайшие часы.

В 03:40 UTC 20 декабря началось мощное взрывное извержение Безымянного с выносом пепла до 15 км н.у.м. (рис. 7.13), т. е. предупреждение KVERT об опасности вулкана было реализовано спустя 34 мин после публикации в Интернете.

По спутниковым данным из ИС VolSatView, в течение пароксизмальной фазы извержения с 03:40 до 07:20 UTC 20 декабря в районе вулкана постоянно наблюдалась яркая термальная аномалия (непрерывный нестационарный вынос высокотемпературного ювенильного вещества при взрывах). По сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, пароксизм продолжался 5,2 ч, величина вулканического дрожания составляла 0,4 мкм/с (www.emsd.ru/~ssl/monitoring/).

Согласно спутниковым и видеоданным, с 03:45 UTC этого дня на северный склон вулкана начали обрушиваться порции пирокластических потоков. При ударах фронтальных частей пирокластических потоков о крутой склон вулкана Камень над ними стали подниматься вторичные пепловые облака (ко-игнимбритовые), материал которых, смешиваясь с материалом главной эруптивной колонны, продолжающим истекать из кратера вулкана, добавлял в нее энергии, и мощное эруптивное облако, расширяясь вверх и во все стороны, стало постепенно смещаться на северо-восток от Безымянного. Далее пирокластические потоки начали скатываться по южным и юго-восточным склонам Безымянного в долину Восточная, в то же время и в истоках р. Сухая Хапица широким фронтом продолжали двигаться мощные потоки



Рис. 7.13. Эксплозивное извержение вулкана Безымянный с выносом пепла до 15 км н.у.м. 20 декабря 2017 г. по видеоданным КФ ФИЦ ЕГС РАН (вид из п. Козыревск в 03:59 UTC)

пирокластики. Раскаленный материал пирокластических потоков растапливал снег в долине, вода вскипала, паровые струи фреатических взрывов подмешивались в пепловые облака, создавая неоднородность и многоярусность эруптивной тучи (см. рис. 7.13). Кроме этого, в долине Восточной и р. Сухая Хапица движение пирокластических потоков сопровождалось образованием грязевых потоков.

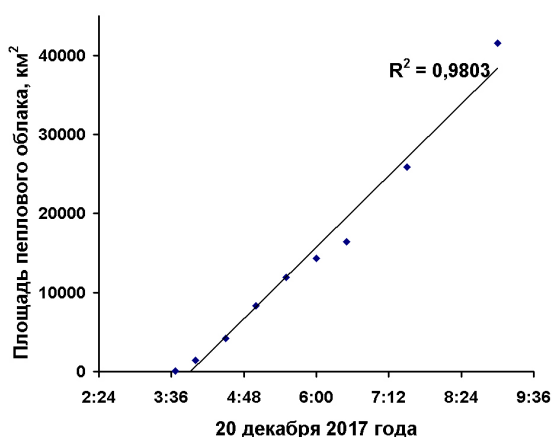


Рис. 7.14. Изменение площади пеплового облака вулкана Безымянный с 03:40 до 09:00 UTC 20 декабря 2017 г. (по спутниковым данным из ИС VolSatView)

Эруптивная туча, насыщенная пеплом, продолжала двигаться на высоте 15 км н.у.м. на северо-восток от вулкана со средней скоростью 100 км/ч, рассчитанной по серии снимков Himawari-8 (<http://dvrcpod.planeta.smlab.ru/animation/1513757110.gif>). С начала извержения в 03:40 UTC до 09:00 UTC площадь пеплового облака увеличилась с 72 до 42 000 км² (рис. 7.14). Пепловое облако до 09:00 UTC 20 декабря протянулось на 540 км по азимуту 48–55° от вулкана, затем всей протяженной полосой облако стало медленно смещаться на

северо-запад (рис. 7.15). Согласно спутниковым данным, основная площадь территории, над которой распространялись пепловые облака Безымянного, составила около 78 000 км², в том числе на суше – 42 600 км². Согласно прогнозу Токио VAAC, пепловые облака Безымянного продолжали быть опасными для авиаперевозок на удалении до 1 500–2 000 км на северо-восток от вулкана до 13:30 UTC 22 декабря 2017 г. (https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list).

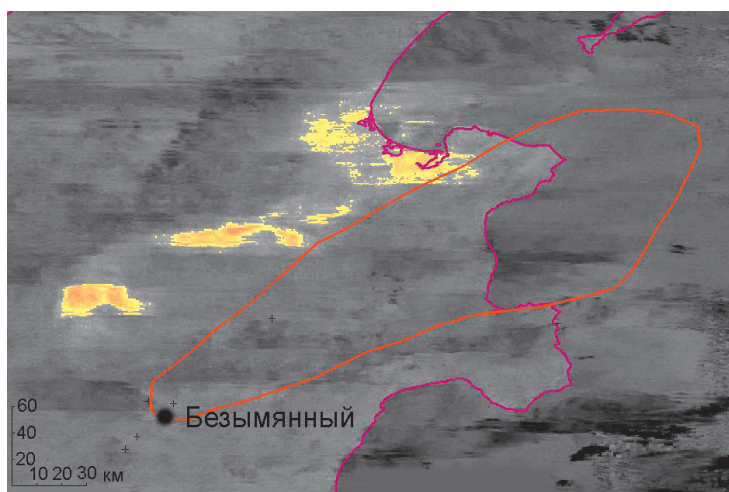


Рис. 7.15. Смещение пеплового облака от вулкана Безымянный 20 декабря 2017 г. всей полосой на северо-запад по состоянию на 14:20 UTC (спутник NPP) относительно состояния в 07:24 UTC (окоптуренное поле) (спутник NOAA-18), данные из ИС VolSatView

Визуализация результатов моделирования перемещения пеплового шлейфа от вулкана Безымянный на анимированном изображении движения пеплового шлейфа, полученном по спутниковым данным из ИС VolSatView (<http://dvrcpod.planeta.smlslab.ru/animation/1513777733.gif>), показало достаточно хорошее совпадение по направлению перемещения и распределению материала по высотам модельного и реального пепловых облаков.

Для детализации динамики вулканогенного процесса, происходившего с начала активизации вулкана Безымянный в декабре 2016 г., был проанализирован временной ряд значений СЭЯ его термальной аномалии (рис. 7.16). Выделяются четыре явных пика таких значений, соответствующие эксплозивным событиям 15 декабря 2016 г., 9 марта, 16 июня и 20 декабря 2017 г. (Гирина и др., 2017а; 2017б, 2017в, 2018б). Кроме этого, хорошо виден постепенный рост величины СЭЯ вплоть до конца сентября 2017 г., связанный с вероятным излиянием лавовых потоков на склоны лавового купола вулкана, ее быстрое снижение в течение октября, небольшой всплеск повышения значений в ноябре и дальнейшее ее снижение (рис. 7.16).

Следует отметить, что максимальное значение СЭЯ, соответствующее извержению 9 марта (пять крупных эксплозий пепла до 7–8 км н.у.м.), в 4 раза выше значения СЭЯ, относящегося к извержению 20 декабря с выносом пепла до 15 км н.у.м. Отметим, что оба события происходили в дневное время при хороших погодных условиях весной и зимой, соответственно, но первое извержение проявилось

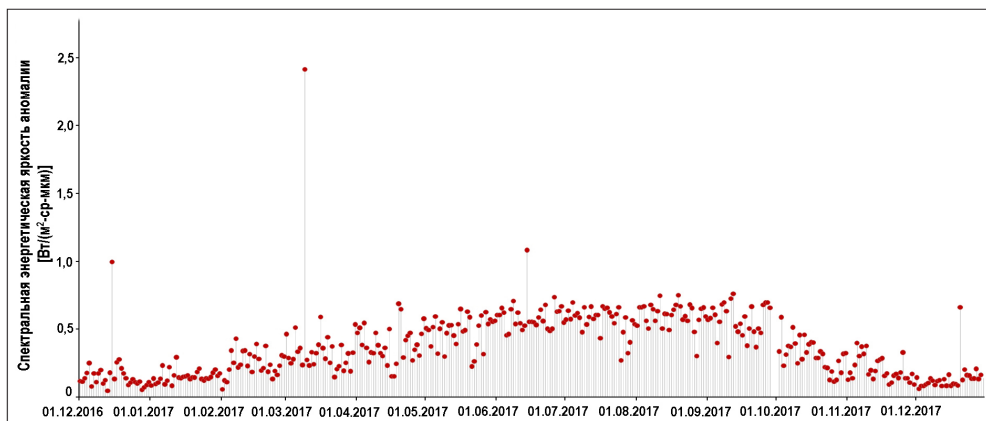


Рис. 7.16. Изменение спектральной энергетической яркости термальной аномалии вулкана Безымянный в течение 2016–2017 гг. по Himawari-8 (7 канал, 3,9 мкм, максимальная температура аномалии за сутки), данные из ИС VolSatView

на фоне излияний лавовых потоков на склон вулкана, последнее – на фоне снижения или замирания эффузивной деятельности Безымянного. Возможно, в течение растянутой во времени серии эксплозий 9 марта раскаленный лавовый материал был в точке измерений непрерывно, тогда как при эксплозивном извержении 20 декабря мощная эруптивная колонна перекрывала эту точку измерения значительную часть времени извержения (зафиксировано несколько всплесков яркости термальной аномалии, которые можно было бы принять за отдельные эксплозии, но видеоданные показывают непрерывность развития эруптивной колонны над кратером вулкана в течение извержения).

После окончания извержения в районе кратера вулкана в течение нескольких месяцев на спутниковых снимках продолжала фиксироваться яркая термальная аномалия (см. рис. 7.16), на видеокадрах в темное время суток отмечалось свечение его вершины, отражавшие вероятное выжимание нового лавового потока на северо-восточный склон купола.

Согласно спутниковым данным из ИС VolSatView, протяженность отложений пирокластических потоков в долине Восточной и в долине р. Сухая Хапица была до 6 км, грязевых потоков – до 18 км; площадь образований пирокластических потоков в долине Восточной составила около 4 км². Площадь отложений тефры, явно выраженной на снегу после извержения 20 декабря, оценивалась как 9 100 км² (рис. 7.17). Основная же площадь территории, над которой регистрировались пепловые облака Безымянного, составила около 78 000 км², в том числе на суше – 42 600 км².

По результатам моделирования распределения отложений пепла во время извержения вулкана Безымянный, выполненного с использованием модели Terpha2 (Bonadonna et al., 2012; Suzuki, 1983), для которого значения скорости и направления ветра по состоянию на 00:00 UTC 20 декабря 2017 г. были взяты из данных радиозонда п. Ключи, масса изверженной тефры, отложившейся на суше, оценивается в 30 млн. т. (рис. 7.18). Для этого извержения VEI составляет 2–3.

Согласно комплексному анализу визуальных, видео и спутниковых данных и выполненной на его основе качественной и количественной оценке дина-

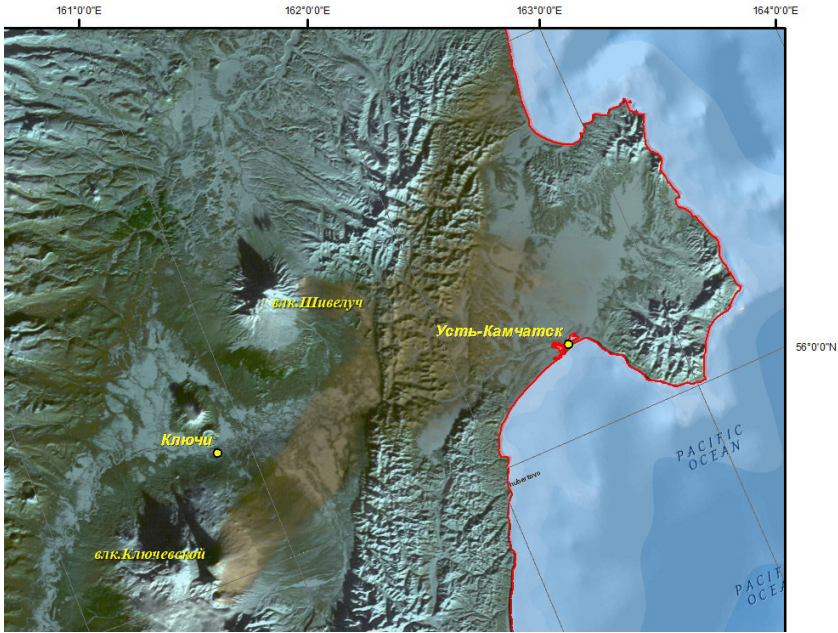


Рис. 7.17. Отложения тefры на суше после эксплозивного извержения Безымянного 20 декабря 2017 г. Данные ДЦ НИЦ Планета, спутник Terra, 00:41 UTC 24 декабря 2017 г.

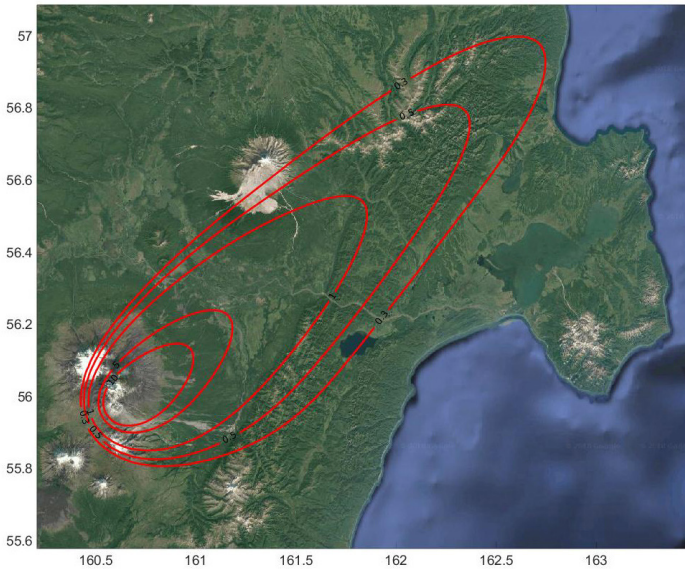


Рис. 7.18. Результаты моделирования (по модели Terhra2) распределения по мощности отложений пепла вулкана Безымянный 20 декабря 2017 г.

мики извержения и его геологического эффекта, пароксизмальное извержение Безымянного 20 декабря 2017 г. было самым сильным в ряду четырех эксплозивных извержений, произошедших после относительного покоя вулкана в течение четырех лет в 2012–2016 гг. (Гирина и др., 2018б).

Глава 8. ОПАСНОСТЬ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

Определение характера и параметров будущих извержений вулканов и оценка их опасности – одна из главных задач вулканологических исследований. Опасность извержений вулканов в первую очередь зависит от состава магматического вещества, которое они выносят на поверхность земли. Например, сильные эксплозивные извержения андезитовых и дацитовых вулканов более опасны, чем базальтовых, т. к. часто они происходят непредсказуемо. С другой стороны, степень опасности любых извержений вулканов зависит от их мощности, продолжительности и явлений, их сопровождающих (оползни, грязевые потоки и т. д.).

На Камчатке преобладают действующие вулканы, состав пород которых андезиты и дациты (24 (80 %) из 30-ти). Для таких вулканов характерны сильные и мощные эксплозивные извержения с выносом эруптивных продуктов до 15–20 км н.у.м., тем более, если они пробуждаются после долгого молчания. Отметим, что в настоящее время в состоянии долгого покоя находятся 12 вулканов, расположенные в южной и центральной частях полуострова (см. табл. 1.1). Кроме того, пробуждение после длительного периода покоя может быть катастрофическим – с резким разрушением постройки вулкана, преобразованием окрестных ландшафтов, выносом эруптивных продуктов объемом более 1 км³. Во время сильных эксплозивных извержений андезитовых и дацитовых вулканов формируются, как правило, не только мощные эруптивные тучи, из которых выпадает пепел, покрывающий окрестности слоем до десятков сантиметров, а иногда и нескольких метров, но и пирокластические потоки, сопровождаемые пирокластическими волнами, движущимися со скоростью до 150 км/ч и сметающими все на своем пути. Если извержения происходят в зимне-весеннее время, раскаленные лавовые и пирокластические потоки, растапливая снег и лед на склонах вулканов, могут вызвать образование лахаров (горячих грязевых потоков), также представляющих высокую опасность для населения.

О ресуспендированных пеплах. В районах активных вулканов, покрытых свежими пирокластическими отложениями, в которых преобладают пепловые частицы песчаной и пылевой размерности, в весеннее и осеннее время под действием сильных ветров формируются приземные плотные шлейфы высотой до 2,5–3 км н.у.м. протяженностью в несколько сотен километров (рис. 8.1). Так как в воздух поднимаются пепловые частицы из уже образованных отложений, и перенос их

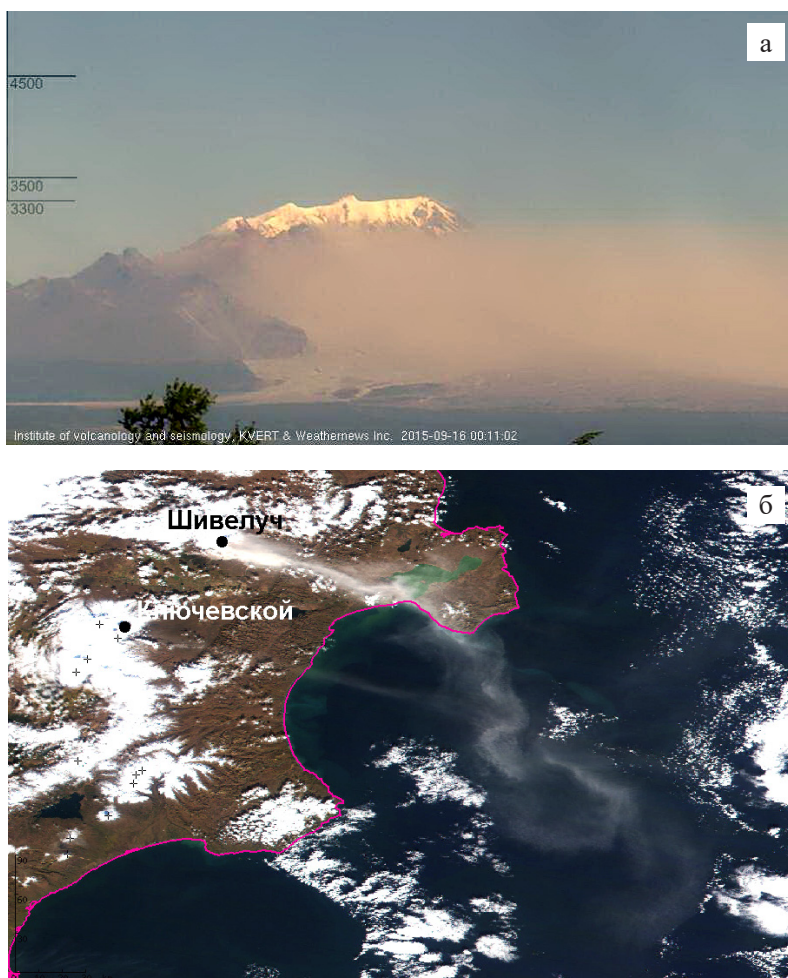


Рис. 8.1. Ресуспандированный пепел, поднятый с поверхности пирокластических отложений вулкана Шивелуч: а) 15 сентября 2015., видеоданные KVERT и Weathernews Inc.; б) 4 октября 2016 г. на спутниковом снимке MODIS (Terra) в 00:30 UTC, данные ИС VolSatView

ветром в шлейфах происходит во взвешенном состоянии, такие пеплы для отличия от эруптивных назвали ресуспандированными. Наиболее часто ресуспандированные пеплы наблюдаются в районах вулканов Шивелуч, Ключевской, Карымский (Гирина и др., 2016б). Ресуспандированные пепловые шлейфы представляют высокую опасность для местных авиаперевозок.

В Главе приведены основные характеристики каждого из действующих вулканов: расположение, координаты, номер по GVP (Global Volcanism Program), абсолютная (абс.) высота вулкана и/или его действующего аппарата (см. табл. 1.1), состав его пород; даты извержений по состоянию на 2018 г.; форма и структура вулкана; потенциальная опасность для авиаперевозок и населения, в том числе известная максимальная высота подъема пепловых облаков н.у.м. Характеристики вулканов даны на основании опубликованных материалов (Влодавец, Пийп, 1957;

Геология СССР, 1964; Гущенко, 1979; Действующие ..., 1991; Новограбленов, 1932; Романова, Гирина, 2018; Siebert et al., 2010; и др.) и данных оперативного мониторинга вулканов, выполняемого KVERT с марта 1993 г. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>).

8.1. Вулкан Шивелуч

Координаты: 56°38'10" с. ш. 161°18'54" в. д.; абс. высота 3283 м; абс. высота лавового купола (вулкан Молодой Шивелуч) 2500 м; GVP 300270



23.10.2015. Фото Ю. Демянчука

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты дупироксеновые, андезиты роговообманково-гиперстеновые, андезиты роговообманковые, роговообманковые дациты, риолиты.

Извержения вулкана: вулкан Молодой Шивелуч – один из наиболее активных вулканов Камчатки и мира. Эруптивная деятельность представлена экструзивными, эксплозивными вулканского и пелейского типов, эффузивными извержениями.

Катастрофические извержения (известные): 18.02.1854; 12.11.1964 (Горшков, Дубик, 1969; Меняйлов, 1955).

Извержения, связанные с ростом экструзивных куполов в кратере вулкана: 1790–1810; 07.1879–1883; 1896; 11.1944–04.1950; 08.1980 – до наст. вр. (Горшков, Дубик, 1969; Меняйлов, 1955; и др.).

Современные пароксизмальные извержения: 21–22.04.1993, 19.05.2001, 09.05.2004, 28.02.2005, 22.09.2005, 29.03.2007, 27.10.2010, 18–19.09.2016, 14.06.2017. (Иванов и др., 1981; Гирина и др., 2006, 2007, 2017е; Маневич и др., 2018; Овсянников, Маневич, 2010; Федотов и др., 2001, 2004; и др.).

Вулкан относится к Северной группе вулканов Камчатки, расположен в 50 км от п. Ключи на левом берегу р. Камчатки и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Самый северный действующий вулкан Камчатки является одним из наиболее крупных вулканов полуострова, его постройка включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч. Поперечник основания вулкана достигает 50 км, площадь – 1300 км². Возраст вулкана – около 60–70 тыс. лет (Действующие ..., 1991; Меняйлов, 1955).

Молодой Шивелуч располагается на дне кальдеры, ближе к ее северо-западному краю. Он образован множеством слившихся между собой андезитовых экструзивных куполов, их агломератовых мантий и коротких лавовых потоков. Поперечник основания его постройки – 6 x 7 км. До извержения 1964 г. четыре купола (Центральный, Суелич и др.) находились в привершинной части вулкана. После извержения на их месте возник сдвоенный кратер с крутыми стенками высотой до 600 м. Наибольший диаметр северной воронки до 1,8 км, южной – до 2,0 км.

В августе 1980 г. в северной воронке начал расти андезитовый экструзивный купол, рост которого продолжается до настоящего времени (Иванов и др., 1981; Гирина и др., 2006, 2007, 2017е; Маневич и др., 2018; Овсянников, Маневич, 2010; Федотов и др., 2001, 2004; и др.).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1946 г., визуальный с 1935 г., видео с 2002 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальную опасность для населения (жителей поселков, туристов и т.д.) представляют связанные с эксплозивными извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады (возможны на всей территории полуострова Камчатка), пирокластические потоки и пирокластические волны (до 30–35 км от вулкана), раскаленные лавины (до 1–3 км от вулкана) и лахары (до 40–50 км от вулкана).

Вулкан представляет высокую опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. при его эксплозивных извержениях пепел может подниматься до 15–20 км н.у.м., пепловые облака могут перемещаться на сотни и тысячи километров в различных направлениях от вулкана, преимущественно в восточных (Горшков, Дубик, 1969; Гирина и др., 2006, 2017а, 2017б; Федотов и др., 2001; и др.).

Потенциальную опасность для местной авиации могут представлять также ресуспендированные пеплы в период с августа до середины октября (Гирина и др., 2016).

Продолжительность извержений вулкана: экструзивных – десятки лет (Меняйлов, 1955), эффузивных – до нескольких месяцев (Горбач, 2006), эксплозивных – от десятков минут до нескольких часов, иногда – до суток (Иванов и др., 1981; Гирина и др., 2006, 2007, 2017б; Овсянников, Маневич, 2010; Федотов и др., 2001; и др.).

8.2. Вулкан Ключевской

Координаты: 56°03'20" с. ш. 160°38'31" в. д.; абс. высота 4750 м; GVP 300260



15.04.2018. Фото Ю. Демянчука

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, высокомагнезиальные базальты, андезитобазальты

Извержения вулкана: один из наиболее активных вулканов Камчатки и мира. Эруптивная деятельность представлена эксплозивными и эксплозивно-эффузивными извержениями. Основные типы эксплозивных извержений – стромболианский и вулканский (рис. 8.2). Для вулкана характерны извержения вершинные и боковые прорывы с образованием шлаковых конусов на склонах вулкана на высотах от 500 до 4500 м н.у.м.

Вершинные извержения:

1697–1698; 1720–1721; 1727–1731; 10.1737; 1762; 1767; 1770; 1772; 1788–1791; 1812–1813; 1821; 1829; 1840; 1848; 1852–1854; 1865; 1877–1879; 1882–1883; 1890; 1896–1898; 1904; 1907; 1909; 1915; 1922–1923; 1925–1926; 1929; 1931–1932; 1935–1936; 03.1937–21.04.1938; 05.12.1944–31.01.1945; 1953; 28.05–09.1954; 1956; 12.1960–10.1964; 1965–1967; 1972–1974; 1977–1980; 24.03.1982–1984; 01.09.1985–21.01.1986; 06.06–11.07.1986; 01.12.1987–10.02.1990; 15.03.1993–02.10.1994; 02–04.1995; 1996–1998; 02–08.1999; 22.03.2003–03.03.2004; 15.01–10.04.2005; 15.02–26.07.2007; 08.10.2008–28.01.2009; 17.09.2009–12.12.2010; 01.09.2012–10.01.2013; 15.08–15.12.2013; 01.01–24.03.2015; 03.04–06.11.2016; (Влодавец, Пийп, 1957; Гирина и др., 2007а, 2011а, 2011б, 2014б, 2014в, 2016а, 2017ж; Жаринов и др., 1991; Иванов и др., 1984б; Мархинин, 1963; Озеров и др., 1996; Пийп, 1956, 1958; Степанов, Чирков, 1981; Федотов, Жаринов, 2007; Федотов и др., 1987; McGimsey et al., 1999, 2003, 2004, 2005; Neal et al., 2005; и др.)

Боковые прорывы:

1915; 25.01–25.05.1932 (Киргурич); 28.06–06.11.1932 (Туйла); 13.11.1932–08.04.1933 (Биокозь); 26.07.1937 (Камули); 03.10.1937 (Перевальный); 06.02.1938–06.04.1939 (группа Билюкая); 19.06–07.07.1945 (Юбилейный); 23.10–21.11.1946 (Апахончич); 20.11–30.11.1951 (Былинкиной); 07–18.06.1953 (Белянкина); 27.07–01.08.1956 (Вернадского и Крыжановского); 06.10.1966–05.01.1967 (Пийпа); 23.08–31.10.1974 (IV ВВС); 05–12.03.1980 (8 марта); 08.03–28.06.1983 (Предсказанный); 24.02–06.03.1987 (Предвиденный); 28.01–14.09.1988 (им. 25-летия Института вулканологии ДВО РАН); 26.07.1989–10.02.1990 (Скуридина); 26.04–06.11.2016 (Мархинина) (Виноградов и др., 1977; Горшков, 1958; Дитерихс и др., 1948; Жаринов и др., 1991; Иванов, Кирсанов, 1980; Иванов и др., 1978, 1984а; Кирсанов, 1968; Набоко, 1947, 1949; Пийп, 1954а, 1954б, 1956; Попков, 1940; Федотов и др., 1987; Хренов и др., 1985; и др.)

Вулкан относится к Ключевской группе вулканов, расположен в 30 км от п. Ключи на правом берегу р. Камчатки, в 360 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан Ключевской – самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии; является типичным стратовулканом с конусом правильной формы, сложенным лавовыми потоками и пирокластическим материалом (Действующие ..., 1991; Пийп, 1956). Вершинный кратер вулкана, диаметр которого около 700 м, постоянно активен и меняет свою морфологию как во время извержений (различная глубина кратера, наличие в нем разного количества шлаковых конусов), так и в периоды покоя (отток магмы приводит к формированию глубокого кратера).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1946 г., визуальный с 1935 г., видео с 2000 г., спутниковый с 2002 г.



Рис. 8.2. Эксплозивное извержение вулканского типа вулкана Ключевской 11 августа 2017 г. Фото И. Борисова

Потенциальная опасность: связанные с эксплозивными извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады (возможны на всей территории полуострова Камчатка), лавовые потоки, раскаленные лавины и лахары.

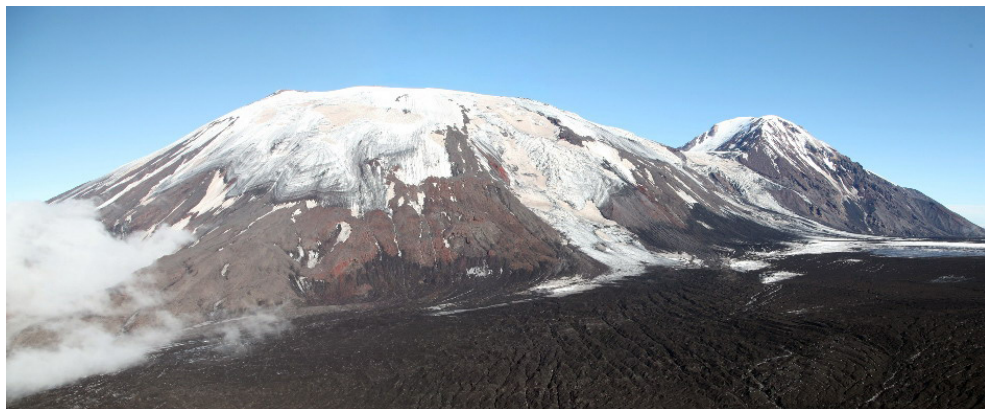
Вулкан представляет высокую опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. при эксплозивных извержениях пепел может подниматься до 13–15 км н.у.м., пепловые облака могут перемещаться на сотни и тысячи километров в различных направлениях от вулкана, преимущественно в восточных (Озеров и др., 1996; Гирина и др., 2014в, 2017ж.; и др.).

Потенциальную опасность для местной авиации могут представлять также ресуспендированные пеплы в период с августа до середины октября (Гирина и др., 2016б).

Продолжительность извержений вулкана – от нескольких месяцев до 1,5 г.

8.3. Вулкан Ушковский

Координаты: 56°04'12" с. ш. 160°28'16" в. д.; абс. высота 3943 м; GVP 300261



28.07.2013. Фото А. Биченко

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, эффузивные 8600 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008)

Вулкан расположен в северной части Ключевской группы вулканов к западу от Ключевского, в 40 км от п. Ключи, в 350 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан Ушковский с вулканом Крестовский образует единый массив, осложненный вершинной кальдерой, рассеченный глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Нижняя часть постройки вулкана представляет собой своеобразное пологохолмистое плато, сложенное породами щитового вулкана и древними базальтами его фундамента. Ушковский имеет форму эллипсоидного усеченного конуса, на его вершине расположена заполненная ледником кальдера размером 4,5 x 5,5 км. Кальдерный ледник служит областью питания крупных долинных ледников: Бильченков, Ушковский, Козыревский, Эрмана и Богдановича. В пределах

кальдеры расположена щитовидная возвышенность, образованная двумя внутренними шлаковыми конусами – Херца и Горшкова. На вершине конуса Горшкова на высокой юго-восточной кромке кратера диаметром 800–1000 м расположены пять термальных площадок размером от 15 до 100 м². На вершине конуса Херца такого же диаметра имеется второй кратер диаметром 250 м, на его восточной и южной кромках отмечены мелкие сольфатары (Овсянников и др., 1985).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1946 г., визуальный с 1935 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения вулкана, похожие на извержения исландских вулканов. При таянии льда, заполняющего вершинную кальдеру вулкана (объем льда около 5 км³), возможны катастрофические грязевые потоки по долинам рек Бильченков, Рыбо-разводная, Козыревская, Студеная и Камчатка. Эксплозивные извержения вулкана могут представлять высокую опасность для местных и международных авиалиний.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.4. Вулкан Безымянный

Координаты: 55°58'19" с. ш. 160°35'43" в. д.; абс. высота 2882 м; GVP 300250



30.04.2013. Фото Ю. Демянчука

Состав пород: андезибазальты, андезиты двупироксеновые, андезиты рогово-обманковые

Извержения вулкана: один из активнейших вулканов Камчатки и мира. Эруптивная деятельность представлена экструзивными, эксплозивными вулканского и пелейского типов, эффузивными извержениями.

Первое историческое извержение: 22.10.1955–29.03.1956 (Горшков, Богоявленская, 1965)

Катастрофическое извержение: 30.03.1956 (Горшков, 1957а)

Рост лавового купола в кратере вулкана: 30.03.1956. – настоящее время.

Пароксизмальные эксплозивные извержения, связанные с ростом лавового купола: 09–10.03.1965; 25.03.1977; 30.09.1978; 11.02.1979; 17.09.1979; 18.04.1980; 13–14.06.1981; 20.12.1981; 10.06.1982; 22.05.1983; 15.02.1984; 12–13.10.1984; 30.06–01.07.1985; 24.06.1986; 16.12.1986; 02.08.1989; 09.03.1990; 12.03.1992; 21.10.1993; 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 (рис. 8.3); 01.09.2012; 09.03.2017; 16.06.2017; 20.12.2017 (Алидибирова и др., 1988; Богоявленская и др., 1979; Гирина, 1990, 1993; Гирина и др., 2009, 2012, 2014а, 2014г, 2017б, 2017в, 2018б; Дубик, Меньялов, 1969; Иванов и др., 1984а, 1984б; Максимов и др., 1991; Carter et al., 2008; Girina, 2013; McGimsey et al., 1999, 2003, 2004, 2005; Neal et al., 2005; и др.).

Вулкан расположен в центральной части Ключевской группы вулканов к юго-западу от Ключевского, в 40 км от п. Ключи, в 350 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Сложный голоценовый вулкан, насаженный на позднеплейстоценовый комплекс лав и пирокластов основания вулкана Камень. Восточная часть вулкана – экструзивный лавовый купол, разрушенный взрывом 30 марта 1956 г., западная часть – стратовулкан с преобладанием лавовых потоков (Горшков, Богоявленская, 1965; Ладыгин и др., 2012). Сразу после взрыва 1956 г. в кратере диаметром 1,7 x 2,8 км начал расти экструзивный андезитовый купол Новый, рост которого сопровождается пароксизмальными эксплозивными извержениями с выносом пепла до 15 км н.у.м. (Girina, 2013; и др.).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1946 г., визуальный с 1935 г., видео с 2003 г., спутниковый с 2002 г.

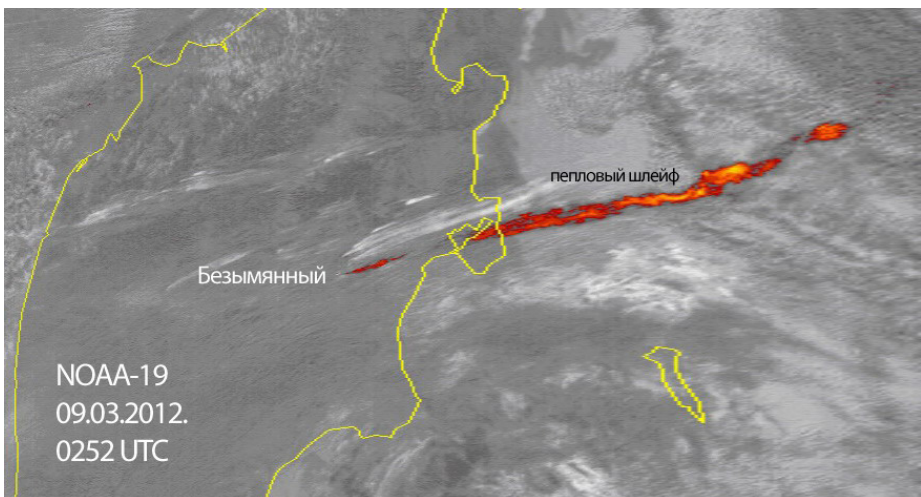


Рис. 8.3. Пепловый шлейф от Безымянного на спутниковом снимке NOAA-19 в 02:52 UTC 9 марта 2012 г.

Потенциальную опасность вулкана для населения (жителей поселков, туристов и т.д.) представляют связанные с эксплозивными извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады, пирокластические потоки, пирокластические волны, лавовые потоки, раскаленные лавины и лахары.

Вулкан представляет высокую опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. при эксплозивных извержениях пепел может подниматься до 15 км н.у.м., пепловые облака перемещаются на сотни и тысячи километров в различных направлениях от вулкана, преимущественно в восточных (Giřina, 2013; Гирина и др., 2018б; и др.).

Продолжительность извержений вулкана: экстремизивных – десятки лет, эксплозивных – от десятков минут до двух суток.

8.5. Вулкан Плоский Толбачик и Толбачинский дол

Координаты: 55°49'44" с. ш. 160°23'25" в. д.; абс. высота 3085 м; GVP 300240



Вулканы Острый и Плоский Толбачики и Толбачинский дол (идет Трещинное Толбачинское извержение – прорыв им. С. Набоко), 21.12.2012. Фото А. Сокоренко

Состав пород: глиноземистые базальты, магнезиальные базальты, андезибазальты

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными и эффузивными (рис. 8.4) извержениями. Основные типы извержений – стромболианский, вулканский, гавайский. Вершинные извержения вулкана Плоский Толбачик до 1975 г. были связаны с активностью лавового озера в кратере (эксплозии с выбросом вулканических бомб, шлака, пепла, в том числе «волос и слез Пеле»,

а также излияния лавовых потоков). В июле-августе 1975 г. на вершине вулкана произошло образование кальдеры обрушения с исчезновением лавового озера. Трещинные извержения (прорывы) на Толбачинском долу по характеру также относятся к эксплозивным и эффузивным.

Вершинные извержения вулкана Плоский Толбачик: 1740, 1769, 1788–1790, 1793, 1904, 1931, 1939–1941, 1954, 1961–1962, 1967–1975 (Влодавец, Пийп, 1957; Действующие ..., 1991).

Прорывы на Толбачинском долу:

07–14.05.1941 (прорыв 1941 г.); 06.07–15.09.1975 (Северный прорыв БТТИ); 17.09.1975–10.12.1976 (Южный прорыв БТТИ); 27.11.2012–15.09.2013 (ТТИ им. 50-летия ИВиС ДВО РАН) (Большое трещинное ..., 1984; Гордеев и др., 2013; Пийп, 1946)

Вулкан расположен в юго-западной части Ключевской группы вулканов, в 63 км от п. Ключи, в 343 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан Плоский Толбачик вместе с вулканом Острый Толбачик представляют единый крупный вулканический массив. На вершине вулкана Плоский Толбачик располагается кальдера диаметром 1800 м и глубиной до 450 м, образовавшаяся в 1975 г. К вулкану примыкает региональная зона шлаковых конусов (Толбачинский дол) общей протяженностью около 65 км (25 км на северо-восток от вулкана и около 40 км – на юго-запад от него). Вдоль осевой части Толбачинского дола в узкой (3–4 км) полосе сосредоточено до 80 % всех эруптивных центров в виде многочисленных трещин и цепочек шлаковых конусов, образующих вулканическую грядку (Ермаков, 1977).



Рис. 8.4. Эффузивное Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС ДВО РАН, 25 февраля 2013 г. Фото Ю. Демянчука

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1946 г., визуальный с 1935 г., видео с 2012 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность: терминальные извержения с выбросом пепла до 5 км н.у.м., кроме этого, в региональных зонах шлаковых конусов на юге и севере от вулкана возможны трещинные эксплозивные извержения с подъемом пепловых колонн до 10–15 км н.у.м. (Большое трещинное ..., 1984). Извержения могут представлять опасность для международных и местных авиалиний.

Продолжительность извержений вулкана: от нескольких дней до 1,5 г.

8.6. Вулкан Ичинский

Координаты: 55°40'39" с. ш. 157°43'06" в. д.; абс. высота 3621 м; GVP 300280



2006. Фото В. Туркина

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты, дациты, риолиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

1740 г. (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен в 120 км на северо-запад от п. Мильково, в 130 км на восток от п. Ичинский, в 300 км на северо-запад от г. Петропавловск-Камчатский.

Ичинский образует обособленный горный массив в 30 км к западу от осевой линии Срединного хребта. Строение сложное: в вытянутой кальдере диаметром 5–7 x 25 км, сложенной андезитами и дацитами, находятся два разновозрастных слившихся конуса, перекрывающих южный сегмент кальдеры. У подножия вулкана располагается полукольцо из 12 дацитовых и риодацитовых экструзивных куполов, а также множество шлаковых конусов с лавовыми потоками базальт-андезитового

состава. Фумаролы расположены в привершинной части вулкана (Действующие ..., 1991; Новограбленов, 1932).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения, похожие на извержения исландских вулканов. При таянии льда, заполняющего вершинную кальдеру вулкана, возможны катастрофические грязевые потоки по долинам рр. Быстрая, Кетачан, Рассошина, Анава, Белоголовая. Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.7. Вулкан Кизимен

Координаты: 55°07'51" с. ш. 160°19'12" в. д.; абс. высота 2485 м; GVP 300230.



15.10.2012. Фото Д. Мельникова

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, андезибазальты, андезиты дву-пироксеновые, андезиты роговообманковые, роговообманковые дациты

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными вулканского типа, эффузивными и экструзивными извержениями.

12.1927–01.1928; 09.12.2010–09.12.2013 (Влодавец, Пийп, 1957; Гирина и др., 2012).

Вулкан расположен на западном склоне южной части хребта Тумрок в 115 км от п. Мильково, в 265 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан имеет коническую форму с диаметром основания 7 км. Вдоль разлома северо-восточного простирания обнажается экструзия плейстоценовых роговообманковых андезитов. В развитии стратовулкана выделяются два сближенных по времени (вторая половина голоцена и историческое время) эксплозивных цикла, сопровождавшихся образованиями коротких глыбовых лавовых потоков (Шанцер и др., 1991).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 2009 г., видео с 2011 г., спутниковый с 2002 г.

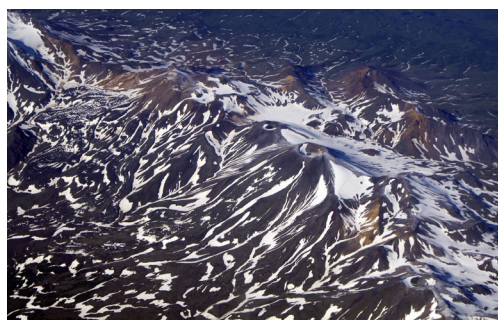
Потенциальная опасность: возможны связанные с эксплозивными извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады, пирокластические потоки, пирокластические волны, раскаленные лавины и лахары.

Вулкан представляет потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров от вулкана в различных направлениях (Гирина и др., 2012).

Продолжительность извержений вулкана: до трех лет.

8.8. Вулкан Высокий

Координаты: 55°03'51" с. ш. 160°45'54" в. д.; абс. высота 2161 м; GVP 300221



22.08.2018. Фото Я. Муравьева



Фото В. Пономаревой

Состав пород: андезиты, андезибазальты

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные ~ 2500 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008)

Вулкан расположен в восточной части Камчатки, в Гамченской группе вулканов, в 4 км от вулкана Комарова, в 255 км на северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Усеченный конус стратовулкана, вытянутый поперек хребта Гамчен, насажен на вершину средне- и позднеплейстоценового лавового щита. Диаметр кратера вулкана составляет 400 м (Апродов, 1982).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность: возможны эксплозивно-эффузивные извержения вулкана, в результате которых могут формироваться пепловые облака, пеплопады, пирокластические и лавовые потоки, лахары.

Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.9. Вулкан Комарова

Координаты: 55°02'00" с. ш. 160°43'30" в. д.; абс. высота 2070 м; GVP 300220



22.08.2018. Фото Я. Муравьева



Фото В. Пономаревой

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

< 1000 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен в средней части Гамченского хребта, в 250 км к северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский.

Конус с мягкими очертаниями начинает цепочку слившихся с ним конусов на северо-востоке от вулкана Гамчен. Активный кратер диаметром 300 м и глубиной 180 м расположен на северном склоне в привершинной части вулкана (Влодавец, Пийп, 1957).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

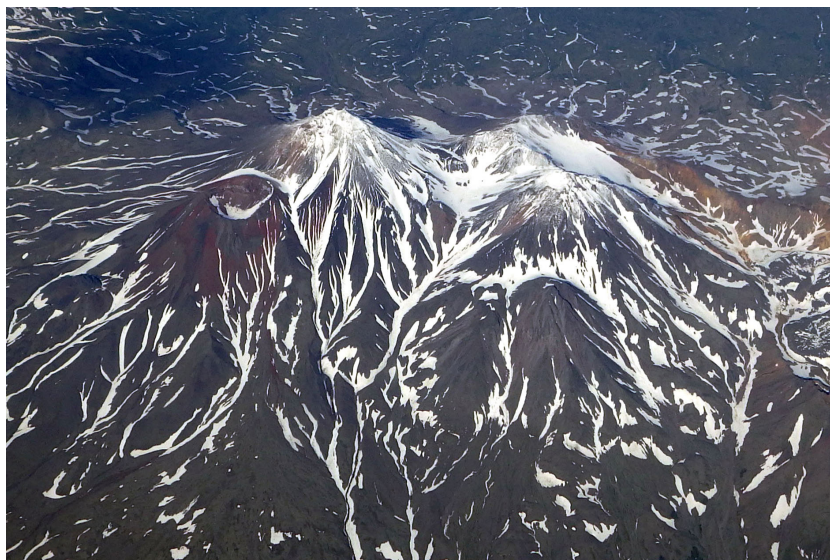
Потенциальная опасность: возможны терминальные эксплозивно-эффузивные извержения вулкана, в результате которых могут формироваться пепловые облака, пеплопады, пирокластические и лавовые потоки, лахары.

Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.10. Вулкан Гамчен

Координаты: 54°58'27" с. ш. 160°42'12" в. д.; абс. высота 2576 м; GVP 300210



22.08.2018. Фото О. Гириной

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

~ 2500 лет назад (Пономарева и др., 2008)

Вулкан расположен в восточной части полуострова, в 135 км на северо-восток от с. Мильково и в 255 км на северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Большой сложный массив, состоящий из сросшихся четырех стратовулканов, в основании которого древняя щитообразная постройка размером 15 x 23 км. На вершине активного конуса находится кратер диаметром 450 м глубиной 200 м. Сольфатары с температурой 40–80 °С приурочены к южной и западной частям кратера (Влодавец, Пийп, 1957).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны извержения из вершинного кратера, или формирование побочного шлакового конуса, формирование экструзивного купола у подножья вулкана. При таких извержениях могут формироваться пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна

8.11. Вулкан Хангар

Координаты: 54°45'41" с. ш. 157°24'24" в. д.; абс. высота 2000 м; GVP 300272



07.2008. Фото А. Безотечество

Состав пород: базальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

~ 400 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен на самом юге Срединного хребта в верховьях рек Колпаковой, Крутогоровой и Облуковины, в 350 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан находится в кальдере среднеплейстоценового щитообразного вулкана диаметром около 6 км. Кратер вулкана заполнен озером, в его южной части располагается экструзивный купол, часть короны которого на поверхности озера образует два небольших острова (Маренина, 1959; Новограбленов, 1932).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, пирокластические и грязевые потоки. В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться катастрофическим извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–20 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.12. Вулкан Кроноцкий

Координаты: 54°45'11" с. ш. 160°31'58" в. д.; абс. высота 3528 м; GVP 300200



23.12.2011. Фото С. Чиркова

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, дупироксеновые андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экстрезивные, эффузивные

1922–1923 (Новограбленов, 1932).

Вулкан расположен в северном секторе Восточной вулканической зоны Камчатки, в 10 км к востоку от оз. Кроноцкое, в 225 км к северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский.

Кроноцкий является стратовулканом с идеальной формой конуса. В привершинной части вулкана имеется небольшая андезибазальтовая экструзия. Историческое извержение приурочено к единственному fumarольному полю, расположенному на южном склоне вулкана на высоте 3150 м (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

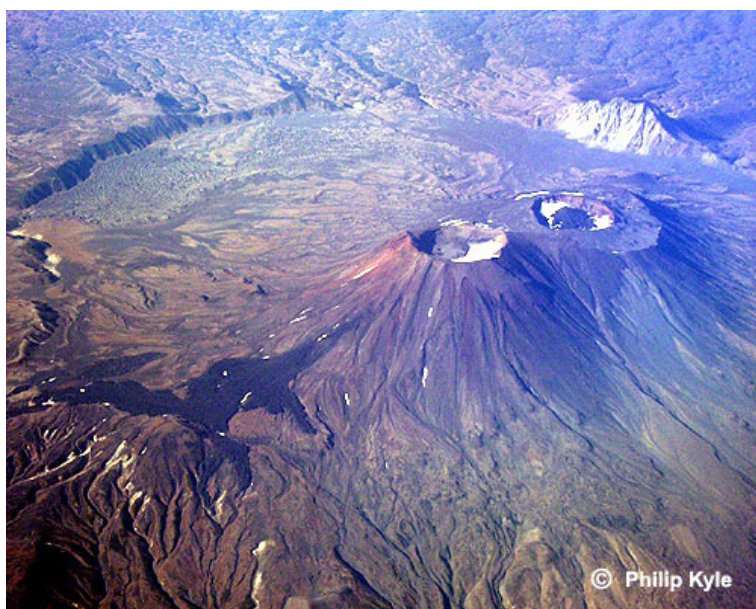
Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые, пирокластические и грязевые потоки. На южном подножии вулкана возможны побочные извержения.

Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.13. Вулкан Крашенинникова

Координаты: 54°35'45" с. ш. 160°16'12" в. д.; абс. высота 1856 м; GVP 300190



Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, эффузивные ~ 400–500 лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан приурочен к Восточному вулканическому поясу и находится примерно в 13 км к югу от оз. Кроноцкое, в 200 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Комплексная вулканическая постройка, состоящая из двух слившихся конусов, находится в древней кальдере диаметром 9 км. Южный конус (1856 м) с кратером на вершине диаметром 800 м. Более молодой Северный конус (1760 м) имеет телескопическую структуру – в центре кальдеры диаметром 2 км расположены вложенные друг в друга два конуса. Высота наименьшего из них – 150 м, диаметр его кратера – 60 м (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

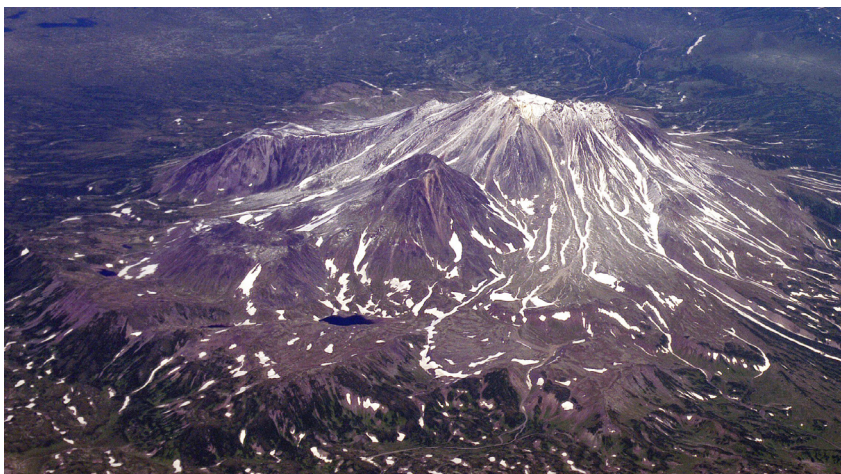
Потенциальная опасность вулкана: возможны вершинные извержения, а также побочные прорывы на склонах вулкана или в южной части кальдеры. Потенциальную опасность представляют связанные с извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары.

В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться сильным эксплозивным извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых облаков может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.14. Вулкан Таунищ

Координаты: 54°31'41" с. ш. 159°48'15" в. д.; абс. высота 2353 м; GVP 300160



22.08.2018. Фото Я. Муравьева

Состав пород: андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные ~ 2400 °C лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан находится в Восточной вулканической зоне, в 7 км на северо-запад от кальдеры Узон, в 25 км на юго-восток от Кроноцкого озера, в 180 км на северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Сложный стратовулкан, в строении которого можно выделить три части. Наиболее древняя южная представляет собой платообразную возвышенность, обрывающуюся к югу и юго-востоку крутыми склонами высотой до 200–300 м. Основная постройка занимает северную часть вулкана – мощный экструзивно-эффузивный вулканический конус, разрушенный в западной части направленным взрывом. На склонах сохранившейся части конуса в разные стороны от вершины протягиваются короткие мощные лавовые потоки. В сформированном взрывом кратере находится крупный экструзивный купол, на склоне лежит связанный с ним глыбовый лавовый поток длиной более 2 км (Леонов и др., 1989).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны вершинные извержения, а также побочные прорывы на склонах вулкана. Потенциальную опасность представляют связанные с извержениями вулкана пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. В связи с продолжительным покоем вулкана, его пробуждение, возможно, будет сопровождаться сильным эксплозивным извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых облаков может достигать 10–20 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна

8.15. Вулкан Кихпиньч

Координаты: 54°29'20" с. ш. 160°15'05" в. д.; абс. высота 1552 м; GVP 300180



15.10.2012. Фото Д. Мельникова

Состав пород: базальты, андезиты, риодациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

~500 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен в пределах Восточной вулканической зоны Камчатки, в 25 км южнее оз. Кроноцкое, в 190 км на северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Значительно разрушенный вулкан, состоящий из остатков древнего стратовулкана, экструзии Белая Вершина (на юге), молодого шлакового Конуса Савича (1552 м) (на севере). На склонах экструзии fumarолы и горячие источники, на вершине Конуса Савича кратер диаметром 70 м с fumarолами (Действующие ..., 1991)

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые, пирокластические и грязевые потоки. Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.16. Вулкан Малый Семячик

Координаты: 54°08'07" с. ш. 159°40'26" в. д.; абс. высота 1560 м; GVP 300140



15.10.2015. Фото Д. Мельникова

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, андезибазальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, эффузивные 1804 (?); 09.1851–07.1852; 1945–1946; 11.1952 (Влодавец, Пийп, 1957; Действующие ..., 1991).

Вулкан расположен в 20 км к западу от берега Кроноцкого залива, в 15 км на северо-восток от вулкана Карымский и в 140 км на северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Вершина вулкана образована слиянием нескольких конусов стратовулканов. На северо-востоке хребтообразного массива расположена наиболее высокая старая Главная вершина (1553 м), оборванная на западе полукольцевым разломом, юго-западнее от нее – активный кратер Троицкого диаметром 300 м с озером, вокруг которого отмечаются многочисленные сольфатары. Вулкан сформировался при смещении центра извержений вдоль разлома с северо-востока на юго-запад от Древнего Малого Семячика к Кратеру Троицкого (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: эксплозивные извержения вулкана, в результате которых могут формироваться пепловые облака, пеплопады, пирокластические потоки, лахары.

Вулкан может представлять опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. при эксплозивных извержениях вулкана пепел может подниматься до 8–10 км н.у.м., пепловые облака могут перемещаться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.17. Вулкан Карымский

Координаты: 54°02'55" с. ш. 159°26'36" в. д.; абс. высота 1486 м; GVP 300130



Фото R. C. Lopez

Состав пород: андезиты

Извержения вулкана: один из активнейших вулканов Восточной вулканической зоны Камчатки. Эруптивная деятельность представлена эксплозивными вулканского и вулканско-стромболианского типов, экструзивными и эксплозивно-эффузивными извержениями.

1771; 1830; 1852; 09.1854; 1908; 1911–1912; 1915; 09.1921; 02.1923; 07.1925; 09.1929; 06.1932–02.1935; 10.1938; 1940–1947; 11.1952–1967; 11.05.1970–1982; 02.01.1996–12.02.2016; 03.06.2017–30.09.2018 (Влодавец, Пийп, 1957; Гирина и др., 2007а, 2011а, 2014б, 2014г, 2017е; Действующие ..., 1991; Иванов, 1970; Муравьев и др., 1997; Новограбленов, 1932; Хренов и др., 1982; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>)

Вулкан расположен почти в центре кальдеры диаметром 5 км, в центральной части Восточной вулканической зоны Камчатки, в 115 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Почти правильный конус стратовулкана с кратером на вершине. С середины склонов и у подножия наблюдаются многочисленные лавовые потоки санторинского и гавайского типов. В кратере раз в 10–15 лет может появляться экструзивный купол.

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1965 г., спутниковый с 2002 г.

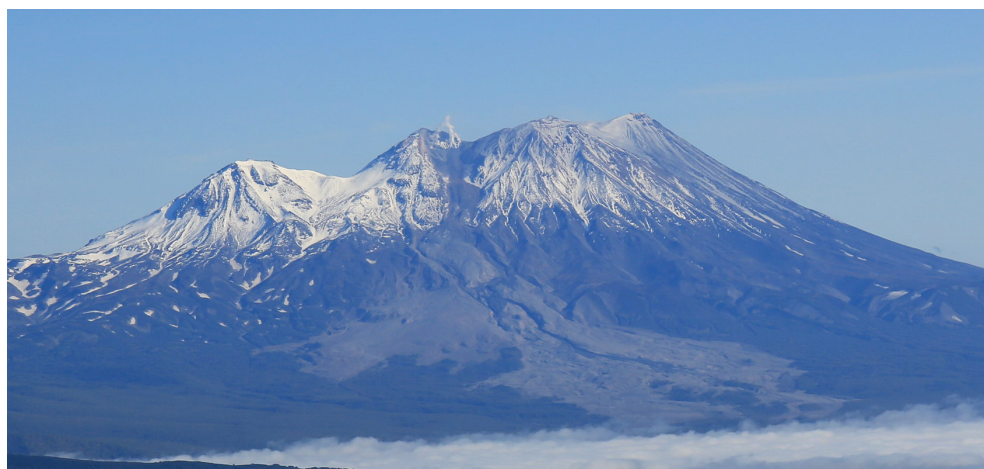
Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, раскаленные лавины. Зона вулканической опасности от лавовых и пирокластических потоков и раскаленных лавин ограничена каль-

дерой. Высота эруптивных колонн может достигать 10 км н.у.м. (Иванов, 1970), хотя пепел при выбросах, главным образом, поднимается до 2,5–3 км н.у.м. Преимущественные направления распространения пепловых шлейфов от вулкана – восточные и южные. Активность вулкана представляет опасность в основном для местных авиалиний.

Продолжительность извержений вулкана: вулкан находится в почти непрерывной эруптивной активности, перерывы в эксплозивных событиях могут быть до 3–4 месяцев. Продолжительность отдельных эксплозивных событий – от нескольких десятков минут до нескольких часов.

8.18. Вулкан Жупановский

Координаты: 53°35'19" с. ш. 159°08'53" в. д.; абс. высота 2958 м; GVP 300120



18.09.2017. Фото В. Ящука

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эруптивная деятельность вулкана представлена эксплозивными извержениями вулканского типа

10.1776; 1882; 1925; 1929; 01–02.1940; 27.12.1956–07.1957; 21–24.10.2013; 06.06.2014–20.11.2016; 16.09.2017 (Гирина и др., 2018в; Действующие ..., 1991; Сирин, 1958)

Вулкан расположен в юго-восточном вулканическом поясе Камчатки, в 40 км севернее Авачинско-Корякской группы вулканов, в 70 км на северо-северо-восток от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой хребет, образованный четырьмя слившимися конусами стратовулканов близкого возраста и строения, наиболее молодой из которых конус Приемьш. Абсолютная высота самого низкого западного конуса 2505,6 м, самого высокого восточного – 2958,0 м. Во время эксплозивного извержения 2014–2016 гг. эксплозиями была разрушена южная кромка кратера Приемьш

и у подножия вулкана отложились образования обвала, смешанные с выброшенной пирокластикой (Гирина и др., 2018в; Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: видео с 2015 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения вулкана. Эксплозивные извержения могут представлять высокую опасность для международных и местных авиалиний, т. к. пепловые облака во время эксплозивных событий могут подниматься до 10 км н.у.м. и распространяться на тысячи километров от вулкана (Гирина и др., 2018в).

Продолжительность извержений вулкана: от нескольких дней до 2,5 лет.

8.19. Вулкан Корякский

Координаты: 53°19'15" с. ш. 158°42'43" в. д.; абс. высота 3456 м; GVP 300090



2008. Фото А. Сокоренко

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, высокомагнезиальные базальты, андезибазальты, андезиты двупироксеновые, андезиты роговообманковые.

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными и эффузивными извержениями. Основной тип извержений – вулканский.

1896; 22.12.1926; 11.1956 – 03.1957; 20.12.2008 – 26.08.2009 (Гирина и др., 2010; Новограбленов, 1932; Сирин, 1959; и др.)

Вулкан расположен к северо-западу от вулкана Авачинский, в 30 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Стратовулкан с открытым на юг кратером размером 45 x 90 м и глубиной 24 м в западной части вершины. Шлаковые конусы побочных извержений: два на восточном и три на южном склонах вулкана. Активное фумарольное поле, из главной фумаролы которого происходили фреатические извержения 1956–1957 и 2008–2009 гг., находится в привершинной части (на высоте 3 км н.у.м.) западного склона вулкана (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1977 г., визуальный с 1959 г., видео с 2008 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: возможны эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения вулкана. Возможно также катастрофическое извержение с разрушением северо-западного сектора вулкана. Эксплозивные извержения вулкана могут представлять высокую опасность для местных авиалиний, т. к. пепловые облака во время эксплозивных событий могут подниматься до 5,5 км н.у.м. и распространяться на сотни километров от вулкана (Гирина и др., 2010). При катастрофическом извержении вулкан будет представлять высокую опасность для международных авиалиний.

Продолжительность извержений вулкана: до 8 месяцев.

8.20. Вулкан Авачинский

Координаты: 53°15'22" с. ш. 158°50'10" в. д.; абс. высота 2751 м; GVP 300100



18.09.2017. Фото В. Яшука

Состав пород: андезибазальты, андезиты двупироксеновые, андезиты роговообманковые, роговообманковые дациты, высокоглиноземистые базальты, высокомагнезиальные базальты.

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными и эффузивными извержениями. Основной тип эксплозивных извержений – вулканский.

07.1737; 15–16.06.1779; 27–29.06.1827; 28.05–30.08.1855; 1878; 1881; 10.1894–02.1895; 07–13.06.1901; 08.1909; 27.03–05.04.1926; 06.03–27.11.1938; 25–26.02.1945; 13–30.01.1991; 05.10.2001. (Влодавец, Пийп, 1957; Действующие ..., 1991; Дрознин, Муравьев, 1994; Мелекесцев и др., 1994; Новограбленов, 1932)

Вулкан расположен к северу от Авачинской бухты, в 25–30 км от гг. Петропавловск-Камчатский и Елизово. Входит в состав Авачинской группы вулканов, начинающей с юга Восточный вулканический пояс.

Стратовулкан типа Сомма-Везувий диаметром 20 км. Высота соммы в восточной части 2317 м. Эксцентрично расположенный действующий конус возвышается над краем соммы на 400–1000 м. В основании конус имеет диаметр около 4 км, венчается кратером диаметром 350 м, заполненным лавой во время извержения 1991 г. Атрио вулкана заполняет ледник, спускающийся в разные стороны пятью языками (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1976 г., визуальный с 1959 г., видео с 2011 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, раскаленные лавины, лахары. Зона опасности от лавовых и пирокластических потоков, раскаленных лавин не превышает 10 км от вулкана. Для гг. Петропавловск-Камчатский и Елизово и других, расположенных вблизи вулкана населенных пунктов, опасность представляют лахары и пеплопады.

Вулкан представляет потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: от одного до 21 дня.

8.21. Вулкан Горелый

Координаты: 52°33'31" с. ш. 158°01'49" в. д.; абс. высота 1828 м; GVP 300070



16.09.2015. Фото Д. Мельникова

Состав пород: высокоглиноземистые базальты, андезибазальты, андезиты, двупироксеновые, дациты, риолиты.

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными и эффузивными извержениями. Основной тип эксплозивных извержений – вулканский.

06.1828; 02.1832; 04.1855; 1869; 01.09.1929–04.1930; 05–06.1931; 12.1960–01.1961; 06.1980–03.07.1981; 07.2010–15.12.2013 (Влодавец, Пийп, 1957; Гирина и др., 2014б, 2014 г.; Действующие ..., 1991; Кирсанов, Озеров, 1983; Кирсанов и др., 1964).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки в 75 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский на водоразделе рр. Паратунка, Мутная, Опала, Карымчина.

В кальдере диаметром 10 x 13 км, образовавшейся на вершине щитовидного вулкана диаметром 30 км, на широтном разломе западно-северо-западного направления сформировался массив из трех слившихся конусов. На вершине постройки имеются 11 кратеров, наложенных друг на друга, на ее склонах – около 40 побочных прорывов с лавовыми потоками (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 1976 г., визуальный с 1959 г., видео с 2011 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые потоки, лахары. Вулкан представляет потенциальную опасность для местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов может достигать 5 км н.у.м. (Кирсанов, Озеров, 1983), протяженность пепловых шлейфов – до сотен км в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: от нескольких дней до нескольких лет.

8.22. Вулкан Опала

Координаты: 52°32'34" с. ш. 157°20'19" в. д.; абс. высота 2475 м; GVP 300080



07.11.2008. Фото А. Сокоренко

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты, дациты, риолиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

23.10.1776; 1827 (Влодавец, Пийп, 1957; Действующие ..., 1991).

Вулкан расположен в северной части Южной Камчатской зоны, в 110 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Конический стратовулкан, расположенный в северной части кальдеры размером 13 x 15 км, вытянутой в меридиональном направлении. Кратер на вершине вулкана разрушен. У подножия юго-восточного склона вулкана в эксплозивной воронке (Бараний Амфитеатр) находится экструзия диаметром 1,5 x 0,8 км и высотой 150 м (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться катастрофическим извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.23. Вулкан Мутновский

Координаты: 52°26'55" с. ш. 158°11'47" в. д.; абс. высота 2323 м; GVP 300060



16.09.2015. Фото Д. Мельникова

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эруптивная деятельность представлена эксплозивными извержениями. Основной тип извержений – вулканский.

1848; 1852–1854; 04–05.1898; 04.1904; 1916–1917; 1927–1929; 1938–1939; 23.06.1945; 31.12.1960–01.01.1961; 1996; 17.03–30.06.2000; 16.04.2007; 03.07.2013. (Влодавец, Пийп, 1957; Гавриленко, Мельников, 2008; Гирина и др., 2009, 2014б; Действующие ..., 1991; Зеленский и др., 2002; Кирсанов и др., 1964; и др.).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки в 70 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой сложную постройку, образованную четырьмя слившимися конусами стратовулканов. Активная воронка (440 x 100 м) врезана в западную кромку главного кратера вулкана. В апреле 2018 г. впервые за историю исследований вулкана в Активной воронке появилось озеро (Действующие ..., 1991; http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2018/Mutnovsky/).

Мониторинг вулкана: сейсмический с 2008 г., визуальный с 1959 г., видео с 2011 г., спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. Вулкан представляет потенциальную опасность для местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов может достигать 7 км н.у.м. (Гирина и др., 2009), протяженность пепловых шлейфов – до сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: от нескольких десятков минут до нескольких часов.

8.24. Вулкан Ходутка

Координаты: 52°03'44" с. ш. 157°42'39" в. д.; абс. высота 2090 м; GVP 300053



12.09.2014. Фото И. Романовой

Состав пород: базальты, андезиты, риолиты, липариты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные ~ 2000 ¹⁴C лет назад (?) (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки в истоках р. Правая Ходутка, в 20 км севернее вулкана Ксудач, в 125 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Правильный конус стратовулкана, осложненный глубоким барранкосом на северном склоне и конусом Приемьш на северо-западном склоне. У подножия западных склонов находятся четыре воронки взрыва, одна из которых диаметром 1,5 км и глубиной 100 м (Ходуткинский маар) заполнена экструзией липаритов (Действующие ..., 1991; Шеймович, 1975).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака, пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары.

В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться катастрофическим извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–20 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.25. Вулкан Ксудач

Координаты: 51°50'38" с. ш. 157°34'20" в. д.; абс. высота 1079 м; GVP 300050



22.08.2018. Фото О. Гириной

Состав пород: базальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: катастрофические кальдерообразующие плинианского типа, эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные
28–29.03.1907 (Влодавец, Пийп, 1957; Мелекесцев, Сулержицкий, 1987).

Ксудач расположен на территории Южной Камчатки в 150 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой пологосклонный (от 3–4° внизу до 7–8° вверх) щит с поперечником основания ~ 25 км и площадью ~ 490 км². Вулкан увенчан пятью кальдерами разного возраста и строения, наложенными одна на другую. Внутри кальдер находится полигенетическое образование, состоящее из экструзий, лав, шлаков, игнимбритов, туфов, отложений пемзовых пирокластических потоков, мощных горизонтов тефры. Площадь кальдерного комплекса ~ 70 км². Внутри наиболее молодой из кальдер находится активный конус Штюбеля (Действующие ..., 1991; Мелекесцев, Сулержицкий, 1987).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: фреатические взрывы, пепловые облака и пеплопады, пирокластические потоки и лахары (особенно по р. Теплая, которая является водосбором северной части вулкана), а также последствия уничтожения озера при эксплозивной активности вулкана.

В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться катастрофическим извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–20 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен или тысяч километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: два дня.

8.26. Вулкан Желтовский

Координаты: 51°34'36" с. ш. 157°19'42" в. д.; абс. высота 1923 м; GVP 300040



22.08.2018. Фото А. Лексина

Состав пород: базальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

11.02–04.1923 (Новограбленов, 1932).

Желтовский расположен на территории Южной Камчатки, в 16 км от оз. Курильское, в 145 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой двойной стратовулкан с соммой и экструзивным куполом на вершине. Нижняя часть постройки вулкана образована преимущественно лавами, верхняя – чередованием лав и пирокластического материала примерно в равных соотношениях (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: фреатические взрывы, пепловые облака и пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары.

Эксплозивные извержения вулкана могут представлять потенциальную опасность для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота пепловых выбросов после пробуждения вулкана может достигнуть 10–15 км н.у.м., пепловые шлейфы и облака могут протягиваться на сотни километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: до двух месяцев.

8.27. Вулкан Ильинский

Координаты: 51°29'54" с. ш. 157°12'12" в. д.; абс. высота 1578 м; GVP 300030



Фото И. Шпиленка

Состав пород: базальты, андезиты, дациты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные ~ 1901 (Новограбленов, 1932).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки у северо-восточного берега оз. Курильское, в 200 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой стратовулкан типа Сомма-Везувий, современный конус вырос в кальдере диаметром около 4 км. На северо-восточном склоне вулкана в 1901 г. образовалась воронка взрыва размером 0,8 x 1,2 км и глубиной 200–450 м, в заключительную фазу извержения она была заполнена небольшим по объему лавовым материалом (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака и пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. Близость вулкана к Курильскому озеру вызывает дополнительную опасность развития небольших цунами, связанных с возможным поступлением обломочных лавин и пирокластических потоков с его склонов в озеро.

В связи с продолжительным покоем вулкана его пробуждение, возможно, будет сопровождаться сильным извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен или тысяч километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.28. Вулкан Дикий гребень

Координаты: 51°27'08" с. ш. 156°58'41" в. д.; абс. высота 1070 м; GVP 300022.



22.08.2018 фото О. Гириной

Состав пород: дациты

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

~ 1600 ¹⁴C лет назад (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки на западном берегу оз. Курильское, в 210 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой несколько слившихся экструзивных образований, из которых излились на юго-восток и северо-запад несколько крупноглыбовых вязких лавовых потоков с высотой фронта потоков до 400 м, осложненных сбросами (Мелекесцев и др., 2003; Новограбленов, 1932)

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: пепловые облака и пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. В связи с продолжительным покоем вулкана, его пробуждение, возможно, будет сопровождаться сильным извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен или тысяч километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.29. Вулкан Кошелева

Координаты: 51°21'20" с. ш. 156°45'11" в. д.; абс. высота 1812 м; GVP 300020



Фото Н. Смелова

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: эксплозивные вулканского типа, экструзивные, эффузивные

1741 (?) (Пономарева и др., 2008).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки в истоках р. Паужетка, в 230 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский.

Вулкан представляет собой вулканический массив, состоящий из пяти крупных построек: Древне-Кошелевский щитообразный вулкан, Западно-Кошелевский

стратовулкан с эрозионной кальдерой, стратовулкан Валентин с кратером, Восточно-Кошелевский стратовулкан с плоской вершиной, Центрально-Кошелевский стратовулкан с активным кратером. Развитие Центрально-Кошелевского вулкана происходило в два этапа: формирование стратовулкана из оливин-пироксеновых базальтов, формирование шлаковых конусов в вершинном кратере и излияние потоков базальтов (Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: фреатические взрывы, пепловые облака и пеплопады, пирокластические и лавовые потоки, лахары.

В связи с продолжительным покоем вулкана, его пробуждение, возможно, будет сопровождаться сильным эксплозивным извержением, тогда он будет опасен для международных и местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 10–15 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен или тысяч километров в различных направлениях от вулкана.

Продолжительность извержений вулкана: неизвестна.

8.30. Вулкан Камбальный

Координаты: 51°18'20" с. ш. 156°52'31" в. д.; абс. высота 2156 м; GVP 300010



12.04.2017. Фото А. Сокоренко

Состав пород: базальты, андезибазальты, андезиты.

Извержения вулкана: единственное историческое извержение вулканского типа произошло в 2017 г.

24.03–22.04.2017 (Гирина и др., 2017д).

Вулкан расположен на территории Южной Камчатки к юго-западу от оз. Курильское, в 230 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский, это самый южный действующий вулкан Камчатки.

Вулкан Камбальный замыкает с юга вулканический массив, состоящий из слившихся вулканических построек нижнеплейстоценового-голоценового возраста. Фундамент вулкана представлен туфо-пирокластическими и лавовыми образованиями позднеплиоцен-нижне- и среднеплейстоценовых стратовулканов. Постройка вулкана сложена пирокластами и лавами преимущественно андезибазальтового состава. На его вершине находится кратер размером 0,8 x 0,4 км, глубиной до 150 м, на выходе из которого у юго-западной стенки расположена активная воронка размером 50 м. Немного ниже кратера на том же юго-западном склоне находится воронка взрыва размером 200 x 100 м и глубиной 50 м. Из этих двух воронок происходил вынос пепла при извержении в марте–апреле 2017 г. (Гирина и др., 2017д; Действующие ..., 1991).

Мониторинг вулкана: спутниковый с 2002 г.

Потенциальная опасность вулкана: фреатические взрывы, пепловые облака и пеплопады, лавовые и пирокластические потоки, лахары. Эксплозивные извержения опасны преимущественно для местных авиалиний, проходящих в районе Камчатки, т. к. высота его пепловых выбросов может достигать 6–7 км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов – до нескольких сотен или тысяч километров в различных направлениях от вулкана (Гирина и др., 2017д).

Продолжительность извержений вулкана: месяц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многосторонний анализ имеющихся опубликованных сведений о вулканах, а также визуальных и спутниковых данных, полученных учеными KVERT в течение 25-летнего ежедневного мониторинга вулканической активности, позволил определить основные черты деятельности и характер взрывчатой активности каждого из действующих вулканов Камчатки и оценить степень их опасности для авиационных полетов и населения полуострова. Благодаря непрерывному спутниковому и визуальному мониторингу вулканов ими установлены даты начала и окончания всех извержений вулканов Камчатки и Северных Курил, произошедших в течение 1993–2018 гг. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcano>), 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» остается. Для выполнения этой задачи, а также для понимания происходящих глубинных (магматических) и вулканогенных процессов, определения потенциальной опасности каждого вулкана для населения и авиационных перевозок, поиска предвестников взрывчатых 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 взрывчатые продукты сходного и контрастного состава, и объемы изверженного материала каждого и всех вулканов с течением времени.

Дальнейшее совместное развитие информационных систем, в частности, для совершенствования спутникового мониторинга вулканов, коллективом авторов монографии 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 взрывчатого извержения каждого из активных вулканов;

- совершенствование анализа пепловых облаков для их автоматизированного детектирования на спутниковых снимках;

- разработка методов совместного анализа результатов моделирования и спутниковых данных для определения и уточнения характеристик взрывчатых событий;

- разработка методов принятия оперативных решений о степени опасности взрывчатого извержения на основе анализа ретроспективных вулканологических и спутниковых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алидибиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т., Фирстов П.П., Гирина О.А., Белоусов А.Б., Жданова Е.Ю., Малышев А.И. Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3-17.

Апродов В.А. Вулканы. М.: Мысль, 1982. 367 с.

Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мамаев А.С., Матвеев А.М., Прошин А.А. Организация контроля за функционированием распределенных систем сбора, обработки и распространения спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 34–41.

Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мамаев А.С., Матвеев А.М., Прошин А.А. Особенности организации контроля и управления распределенных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 161–166.

Балашов И.В., Халикова О.А., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М. Организация автоматического получения наборов информационных продуктов из центров архивации и распространения спутниковых и метеоданных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 9-20.

Баширина Л.А. Вулканические газы Камчатки. Докл. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минерал. наук по совокуп. опубл. работ. Петропавловск-Камчатский: ИВ С. АН СССР. 1966. 30 с.

Белихов А.Б., Леготин Д.Л., Сухов А.К. Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере // Вестник Костромского ГУ им. Н.А. Некрасова. 2013. № 1. С. 14–19.

Богоявленская Г.Е., Иванов Б.В., Будников В.А., Андреев В.Н. Извержение вулкана Безымянного в 1977 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1979. № 57. С. 16-25.

Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука. 1984. 637 с.

Бурцев М.А., Антонов В.Н., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Милехин О.Е., Прошин А.А., Соловьев В.И. Система работы с распределенными архивами результатов обработки спутниковых данных центров приема НИЦ Планета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 55-76.

Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Адрюков Д.Г. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83-93.

Виноградов В.Н., Иванов Б.В., Чирков А.М. Прорыв побочных кратеров в толще ледника Ключевского вулкана в 1974 г. // Вопросы географии Камчатки. 1977. № 7. С. 31-37.

Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука. 1984. 340 с.

Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 5-95.

Гавриленко Г.М., Мельников Д.В. Пятнадцать лет из жизни вулкана Мутновского // Природа. 2008. № 2. С. 54-58.

Геология СССР. Т. XXXI. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Часть 1. Геологическое описание / Отв. ред. Г.М. Власов. М.: Недра. 1964. 734 с.

Гирина О.А. Пирокластические отложения извержения вулкана Безымянный в октябре 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 82-91.

Гирина О.А. Современные пирокластические отложения андезитовых вулканов и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: Дальнаука. 1998. 174 с.

Гирина О.А., Богоявленская Г.Е., Демянчук Ю.В. Извержение вулкана Безымянный 2 августа 1989 г. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 8-16.

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.

Гирина О.А., Гордеев Е.И., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М. Камчатской группе реагирования на вулканические извержения (KVERT) – 25 лет // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018а. С. 24–27.

Гирина О.А., Демянчук Ю.В. Извержение вулкана Безымянный в 2012 г. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвящённой Дню вулканолога (к 50-летию ИВиС ДВО РАН). 29-30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 24-27.

Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Давыдова В.О., Плечов П.Ю. Извержение вулкана Безымянный 01 сентября 2012 г., его прогноз и продукты // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014а. С. 30-35.

Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Маневич Т.М., Нуждаев А.А., Муравьев Я.Д. Извержение вулкана Ключевской в 2015 г. и его опасность для авиации // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XVIII научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 30 марта-1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2016а. С. 16-20.

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.

Гирина О.А., Коновалова О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки в 2009 г. // Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2011а. С. 41-49.

Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Сорокин А.А., Уваров И.А., Кашицкий А.В., Бурцев М.А., Марченков В.В., Бриль А.А., Мазуров А.А., Романова И.М., Мальковский С.И. Применение данных спутника Himawari для мониторинга вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017а. Т. 14. № 7. С. 65-76. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-65-76

Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Кашицкий А.В., Бриль А.А., Сорокин А.А. Извержения Северной группы вулканов Камчатки 14–18 июня 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017б. Т. 14. № 3. С. 317-323. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-317-323

Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Уваров И.А., Кашицкий А.В. Извержение вулкана Безымянный 20 декабря 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018б. Т. 15. № 3. С. 88-99. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-88-99

Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Маневич Т.М. Спутниковые и наземные наблюдения эксплозивных извержений вулкана Жупановский (Камчатка, Россия) в 2013 и 2014–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018в. № 1. С. 3-17. doi: 10.7868/S0203030618010017

Гирина О.А., Маневич А.Г., Малик Н.А., Мельников Д.В., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В., Котенко Л.В. Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2007а. № 4. С. 29-40.

Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки в 2013 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014б. С. 38-45.

Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В. Извержения вулкана Ключевской в 2012-2013 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014в. С. 46-52.

Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурждаев 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 научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 29-30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2010. С. 15-23.

Гирина О.А., Маневич А.Г., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В. Активность действующих вулканов Камчатки в 2012 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014г. С. 42-49.

Гирина О.А., Маневич А.Г., Ушаков С.В., Мельников Д.В., Нурждаев А.А., Коновалова О.А., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки в 2010 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 30 марта-1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2011б. С. 19-24.

Гирина О.А., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г. Извержение вулкана Безымянный в 2016-2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XX научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2017в. С. 14-17.

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г. Спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017г. Т. 14. № 6. С. 194-209. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурждаев А.А. Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017д. Т. 14. № 2. С. 263-267. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-263-267

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XX научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2017е. С. 7-10.

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурждаев А.А., Демянчук Ю.В. Хронология событий извержения влк. Ключевской в 2016 г. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XX научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2017ж. С. 18-21.

Гирина О.А., Нуржаев 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 научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 10.

Гирина О.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Крашенинникова Ю.С. Ресуспендированный пепел вулкана Шивелуч // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016б. Т. 13. № 5. С. 315-319. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-315-319.

Гирина О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007б. Вып. 10. № 2. С. 65-73.

Гирина О.А., Ушаков С.В., Малик Н.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуржаев А.А., Демянчук Ю.В., Котенко Л.В. Действующие вулканы Камчатки и о. Парамушир Северных Курил в 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 3-20.

Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13-29.

Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3-11.

Горбач Н.В. Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 9-16.

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.

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 геопортала VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 267-284.

Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Бурцев М.А., Романова И.М., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Королев С.П., Верхотуров А.Л. Информационная система VolSatView для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил // Вулканология и сейсмология. 2016а. № 6. С. 62-77. doi: 10.7868/S0203030616060043

Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Романова И.М., Крамарева Л.С., Ефремов В.Ю., Кобец Д.А., Кашицкий А.В., Верхотуров А.Л., Бурцев М.А. ИС «VolSatView»: комплексный анализ данных об эксплозивных извержениях вулканов Камчатки // Вестник ДВО РАН. 2016б. Вып. 189. № 5. С. 120-127.

Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Вольнец А.О., Мельников Д.В., Двигало В.Н. Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 562-566. doi: 10.7868/S0869565213300208

Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6-27.

Горельчик В.И. История развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки. В кн. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. С. 341-351.

- Горшков Г.С.* Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной // Бюлл. вулканол. станций. 1954. № 23. С. 33-37.
- Горшков Г.С.* Извержение новых побочных кратеров Ключевского вулкана летом 1956 г. // Бюлл. вулканол. станции. 1958. Вып. 27. С. 25-37.
- Горшков Г.С.* Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // Бюлл. вулканол. станций. 1957а. № 26. С. 19-72.
- Горшков Г.С.* Каталог действующих вулканов Курильских островов // Бюлл. вулканол. станции. 1957б. № 25. С. 96-178.
- Горшков Г.С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Доклады АН СССР. 1956. Т. 106, № 4. С. 703-705.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука. 1965. 172 с.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. В кн.: Вулканы и извержения / Отв. ред. Г.С. Горшков. М.: Наука. 1969. С. 3-37.
- Гуценко И.И.* Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука, 1979. 476 с.
- Действующие вулканы Камчатки / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков.* М.: Наука. 1991. в 2-х т. Т. 1. 302 с. Т. 2. 415 с.
- Дитерихс Ф.М., Кулаков В.С., Святловский А.Е.* Паразитические кратеры Ключевского вулкана, возникшие в 1932 году // Труды Камчатской вулканологической станции / Отв. ред. А.Н. Заварицкий М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР. 1948. № 2. С. 3-23.
- Дроздин В.А., Муравьев Я.Д.* Энергетический и экологический аспекты извержения вулкана Авачинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1994. № 3. С. 3-19.
- Дубик Ю.М., Меняйлов И.А.* Новый этап эруптивной деятельности вулкана Безымянного. В кн.: Вулканы и извержения / Отв. ред. Г.С. Горшков. М.: Наука. 1969. С. 38-77.
- Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Флитман Е.В.* Возможность построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 431-436.
- Еремеев В.А., Мордвинцев И.Н., Платонов Н.Г.* Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 80-90.
- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. 1977. 223 с.
- Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Матвеев А.М., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В.* Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155-170.
- Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Жданова Е.Ю., Андреев В.Н., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гаврилов В.А., Гарбузова В.Т., Демянчук Ю.В., Ханзутин В.П.* Извержения Северной группы вулканов Камчатки в 1988-1989 гг., сейсмологические и геодезические данные // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 3-33.
- Зеленский М.Е., Овсянников А.А., Гавриленко Г.М., Сениюков С.Л.* Извержение вулкана Мутновский (Камчатка) 17 марта 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 25-28.
- Иванов Б.В.* Извержение Карымского вулкана в 1962-1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука. 1970. 135 с.
- Иванов Б.В., Андреев В.Н., Горельчик В.И., Максимов А.П., Степанов В.В., Чирков А.М.* Извержение Ключевской сопки в 1972-1974 гг. и образование побочных кратеров на юго-западном склоне вулкана // Геодинамика и вулканизм островных дуг северо-западного сектора Тихоокеанского кольца. М.: Советское радио. 1978. С. 90-104.

Иванов Б.В., Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Овсянников А.А., Озеров А.Ю., Разина А.А., Токарев П.И., Хренов А.П., Чирков А.М. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1984а. № 6. С. 114-121.

Иванов Б.В., Кирсанов И.Т. Латеральное извержение Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1980. № 5. С. 75-76.

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.

Иванов Б.В., Чирков А.М., Дубик Ю.М., Хренов А.П., Двигало В.Н., Разина А.А., Степанов В.В., Чубарова О.С. Состояние действующих вулканов Камчатки и Курильских островов в 1982 г. // Вулканология и сейсмология. 1984б. № 4. С. 104-110.

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.

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

Кирсанов И.Т. Извержение Ключевского вулкана в 1966 г. с прорывом побочных кратеров им. Пийпа // Бюлл. вулканол. станций. 1968. № 44. С. 11-29.

Кирсанов И.Т., Огородов Н.В., Чирков А.М. Состояние вулканов Мутновского и Горелого за период с ноября 1960 г. по июнь 1961 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1964. № 36. С. 39-47.

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.

Кобец Д.А., Балашов И.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А. Организация контроля и анализа работоспособности систем автоматизированной обработки спутниковых данных с использованием VI-технологий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 92-103. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-92-103

Королев С.П., Романова И.М., Мальковский С.И., Сорокин А.А. Сервис-ориентированный интерфейс для доступа к научным данным в области исследования и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28. № 2. С. 88-98. doi: 10.14357/08696527180207

Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 109-124. doi: 10.15372/GIG20160106

Ладыгин В.М., Гирина О.А., Фролова Ю.В. Петрофизические особенности лавовых потоков вулкана Безымянный, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2012. № 6. С. 18-30.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карташова Л.А. О строении и возрасте вулкана Тауншиц // Вопросы географии Камчатки. 1989. № 10. С. 156-166.

Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Кобец Д.А., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015а. Т. 12. № 5. С. 53-75.

Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистан-

ционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53-66. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66

Луян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Выпуск 1. С. 81-89.

Луян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В., Крашенинникова Ю.С. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т.8. № 1. С. 26-43.

Луян Е.А., Милехин О.Е., Антонов В.Н., Крамарева Л.С., Бурцев М.А., Балашов И.В., Толпин В.А., Соловьев В.И. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ Планета // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89-97.

Луян 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., Сычугов 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. 2015б. Т. 12. № 5. С. 263-284.

Луян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011б. Т. 8. № 1. С. 190-198.

Максимов А.П., Фирстов П.П., Гирина О.А., Малышев А.И. Извержение вулкана Безымянный в июне 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 3-20.

Малик Н.А., Овсянников А.А. Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7-10.

Маневич А.Г., Гирина О.А., Мельников Д.В., Нуржаев А.А. Активность вулканов Камчатки в 2017 г. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. С. 8-11.

Маренина Т.Ю. Вулкан Хангар в Среднем хребте Камчатки // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1959. № 17. С. 3-63.

Мархинин Е.К. Восхождение на Ключевской вулкан в период извержения (1961 г.) // Бюлл. вулканол. станции. 1963. Вып. 34. С. 3-7.

Мелекесцев И.В. Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 15-35.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926-1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3-23.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Новый подход к определению понятия «действующий вулкан». В кн.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. С. 191-203.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Пинегина Т.К., Дирксен О.В. 0-650 гг. – этап сильнейшего природного катастрофизма нашей эры на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 3-23.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 28-53.

Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние десять тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28-39.

Мельников Д.В., Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Извержение 2010-2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 18. С. 87-101.

Мельников Д.В., Маневич А.Г., Гирина О.А. Динамика извержения вулкана Алаид в 2012 и 2015-2016 гг. по данным методов дистанционного зондирования // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. С. 68-71.

Меняйлов А.А. Основные этапы развития вулкана Шивелуча // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1954. № 8. С. 115-124.

Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения. М.: Наука. 1980. 236 с.

Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Андреев В.И., Иванов В.В., Карташёва Л.А., Марков И.А. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38-70.

Набоко С.И. Извержение Билуояка, побочного кратера Ключевского вулкана, в 1938 г. // Труды Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканол. станции. Вып. 5. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР. 1947. 135 с.

Набоко С.И. Новый побочный кратер Ключевского вулкана, прорвавшийся 23 октября 1946 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1949. № 16. С. 12-16.

Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. 604 с.

Новограбленов П.Т. Каталог вулканов Камчатки // Известия государственного географического общества. 1932. Т. XIV. Вып. 1. С. 88-99.

Огородов Н.В. Каталог вулканов Срединного хребта. В кн.: Вулканы и четвертичный вулканизм Срединного хребта Камчатки. М.: Наука, 1972. С. 119-190.

Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А., Двигало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Яцук В.В., Округин В.М. Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября - 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. Т. 5. С. 3-16.

Овсянников А.А., Маневич А.Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. Вып. 16. № 2. С. 7-9.

Овсянников А.А., Хренов А.П., Муравьев Я.Д. Современная фумарольная деятельность на вулкане Дальний Плоский // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 97-98.

Пийп Б.И. Извержение кратера Былинкиной // Бюлл. вулканол. станций. 1954а. № 20. С. 48-51.

Пийп Б.И. Ключевская сопка и её извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды лаборатории вулканологии. 1956. Вып. 11. 312 с.

Пийп Б.И. Новый побочный кратер вулкана Толбачик // Бюлл. вулканол. станций. 1946. № 13. С. 10-21.

Пийп Б.И. Образование нового побочного кратера Белянкина // Бюлл. вулканол. станций. 1954б. № 22. С. 6-7.

Пийп Б.И. Особенности извержения Ключевской сопки // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР. 1958. № 13. С. 99-119.

Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.

Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том II. Новейший вулканизм северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: ИГЕМ РАН. 2008. С. 19-40.

Попков В.Ф. О деятельности Билокая в 1938-1939 гг. // Бюлл. вулканол. станции на Камчатке. 1940. Вып. 12. С. 29-53.

Прошин А.А., Лупян Е.А., Балаиов 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

Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П., Аникин Л.П., Дубровская И.К., Мельников Д.В., Пилипенко О.В., Сокоренко А.В., Чирков С.А., Шакирова А.А., Яцук В.В. Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Вып. 20. № 2. С. 9-15.

Рашидов В.А., Романова И.М., Бондаренко В.И., Палуева А.А. Информационные технологии в геомагнитных исследованиях позднекайнозойских подводных вулканов Тихого океана // Российский журнал наук о Земле. 2010. Т. 11. RE3001. doi: 10.2205/2009ES000358

Романова И.М. Геопортал ИВиС ДВО РАН как единая точка доступа к вулканологическим и сейсмологическим данным // Геоинформатика. 2013а. № 1. С. 46–54.

Романова И.М. Репозиторий открытого доступа Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: принципы создания и опыт реализации // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013б. Вып. 22. № 2. С. 78-90.

Романова И.М. Инфраструктура пространственных данных Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: текущее состояние и перспективы развития // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 1. Вып. 25. С. 72–78.

Романова И.М., Гирина О.А. Инфраструктура пространственных данных для информационного обеспечения вулканологических исследований // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, 11-14 сентября 2017 г. Хабаровск: ТГУ. 2017. С. 163–166.

Романова И.М., Гирина О.А. Информационные технологии для анализа данных о вулканах Камчатки и Курил // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 3. Вып. 39. С. 42-53.

Романова И.М., Гирина О.А., Максимов А.П., Мелекесцев И.В. База данных “Вулканы Курило-Камчатской островной дуги и их извержения”. 2012а. Свидетельство о регистрации базы данных № 2012621071 от 16.10.2012.

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. 2012б. Вып. 33. № 3. С. 179–187.

Романова И.М., Гирина О.А., Мелекесцев И.В., Максимов А.П. Информационная веб-система «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги»: текущее состояние и перспективы развития // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012в. № 1. Вып. 19. С. 128–137.

Романова И.М., Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуржидев А.А. База данных “Активность вулканов Камчатки и Северных Курил”. 2016. Свидетельство о регистрации базы данных № 2016620357 от 17.03.2016.

Саворский В.П., Кашицкий А.В., Константинова А.М., Балашов И.В., Крашенинникова Ю.С., Толпин В.А., Маклаков С.М., Савченко Е.В. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства “Созвездие-Вега” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 28-45. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45

Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга. 2009. 191 с.

Сенюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68- 78.

Сирин А.Н. Состояние некоторых вулканов Камчатки в начале 1957 г. // Бюлл. вулканол. станции. 1958. Вып. 27. С. 16-24.

Сирин А.Н., Тимербаева К.М. Извержение Корякского вулкана в начале 1957 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1959. № 28. С. 3-21.

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

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.

Степанов В.В., Чирков А.М. Активность вершинного кратера Ключевского вулкана в январе-марте 1980 г. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 103-105.

Сычуглов И.Г., Прошин А.А. Детектирование и документация сбоев в работе распределённых информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 233-245.

Таран Ю.А. 11-ое полевое совещание по вулканическим газам. Камчатка, Россия, 1-10 сентября 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 149–155.

Таран Ю.А., Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф., Рожков А.М. Геохимические исследования в кратере вулкана Мутновский (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 37-55.

Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.

Токарев П.И. Предсказание места и времени начала Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Доклады АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439-442.

Токарев П.И. Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47-61.

Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т. 8. № 3. С. 93-108.

Толпин В.А., Балашов И.В., Лупян Е.А., Савин И.Ю. Спутниковый сервис «Вега-Science» // Земля из космоса. 2011б. Вып. 9. Весна. С. 32-37.

Уваров И.А., Матвеев А.М., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Саворский В.П., Суднева О.А. Организация распределенной работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 322-333.

Уваров И.А., Халикова О.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Платонов А.Е., Прошин А.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30-45.

Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А., Иванов В.В., Селиверстов Н.И., Хубуная С.А., Демьянчук Ю.В., Марков И.А., Осипенко Л.Г., Смелов Н.П. Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3-15.

Федотов С.А., Жаринов Н.А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986-2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3-31.

Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н., Селиверстов Н.И., Хубуная С.А. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 3-14.

Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932-1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3-16.

Хренов А.П., Дубик Ю.М., Иванов Б.В., Овсянников А.А., Таран Ю.А., Пилипенко В.П., Фирстов П.П., Чирков А.М. Эруптивная деятельность вулкана Карымский за десять лет (1970-1980 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 29-48.

Хренов А.П., Озеров А.Ю., Литасов Н.Е., Слезин Ю.Б., Муравьев Я.Д., Жаринов Н.А. Побочное извержение Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный, 1983 г.) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 3-20.

Шанцер А.Е., Кутыев Ф.Ш., Петров В.С., Зубин М.И. Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука. 1991. Т. 2. С. 18-30.

Шеймович В.С. Гранитоидные ксенолиты вулкана Ходутка (Южная Камчатка) // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1975. № 11. С. 127-132.

Abrams M., Hook S. NASA's Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI), in Kunzer and Dech (eds.). Thermal Infrared Remote Sensing: sensors, methods and applications // Remote Sensing and Digital Image Processing Springer. 2013. doi: 10.1007/978-94-007-6639-6_6

Abrams M., Pieri D., Realmuto V., Wright R. Using EO-1 Hyperion data as HyspIRI preparatory data sets for volcanology applied to Mt. Etna, Italy // J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. No. 6. P. 375-385.

Aloisi M., D'Agostino M., Dean K.G., Mostaccio A., Neri G. Satellite analysis and PUFF simulation of the eruptive cloud generated by the Mount Etna paroxysm of 22 July 1998 // J. of Geophys. Res. 2002. Vol. 107. No. B12. 2373; doi: 10.1029/2001JB000630

Andres R.J., Kasgnoc A.D. A time averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions // J. of Geophys. Res.: Atmospheres. 1998. Vol. 103. No. 19. P. 25251-25261.

Bassett L. Introduction to JavaScript Object Notation: A To-the-Point Guide to JSON. O'Reilly Media. 2015. 126 p.

Berrisford P., Dee D.P., Poli P., Brugge R., Fielding M., Fuentes M., Källberg P.W., Kobayashi S., Uppala S., Simmons A. The ERA-Interim archive Version 2.0 // ERA Report Series. 2011. No. 1. P. 23.

Bessho K., Date K., Hayashi M., Ikeda A., Imai T., Inoue H., Okuyama A. An introduction to Himawari-8/9 - Japan's new-generation geostationary meteorological satellites // J. of Meteorological Society of Japan. 2016. Ser. II. Vol. 94(2). P. 151-183.

Bluth G.J.S., Doiron S.D., Schnetzler C.C., Krueger A.J., Walter L.S. Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions // Geophysical Research Letters. 1992. Vol. 19. No. 2. P. 151-154.

Bonadonna C., Folch A., Loughlin S., Puempel H. Future developments in modeling and

monitoring of volcanic ash clouds: outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation // *Bull. of Volcanology*. 2012. Vol. 74. No. 1. P. 1–10. doi: 10.1029/2011EO100008

Carn S.A., Clarisse L., Prata A.J. Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing. *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. Vol. 311. P. 99–134. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.01.002

Carn S.A., Fioletov V.E., McLinden C.A., Li C., Krotkov N.A. A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space // *Scientific reports*. 2017. No. 7. 44095; doi: 10.1038/srep44095

Chang G., Mahoney K., Briggs-Whitmire A., Kohler D., Lewis M., Mobley C., Moline M., Boss, E., Kim M., Philpot W., Dickey T. The new age of hyperspectral oceanography // *Oceanography*. 2004. Vol. 17 (2). P. 16–23.

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.

Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. USGS Digital Spectral Library. U.S. Geological Survey. 2007. Data Series 231. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli O., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project // *Quarterly J. of Royal Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. No. 654. P. 1–28. doi: 10.1002/qj.776

Coppola D., Laiolo M., Cigolini C., Delle Donne D., Ripepe M. Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system // *Geological Society. London. Special Publications*. 2016. Vol. 426. Issue 1. P. 181–205. doi: 10.1144/SP426.5

Coppola D., Laiolo M., Piscopo D., Cigolini C. Rheological control on the radiant density of active lava flows and domes // *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 249. P. 39–48. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.005

Costa A., Macedonio G., Folch A. A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 241. No. 3–4. P. 634–647. doi: 10.1016/j.epsl.2005.11.019.

D'Amours R. Modeling the ETEX plume dispersion with the Canadian emergency response model // *Atmospheric Environment*. 1998. Vol. 32. No. 24. P. 4335–4341. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00182-4

Dehn J., Dean K., Engle K. Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space // *Geology*. 2000. Vol. 28. No. 8. P. 755–758.

Fisher J.M., Fisher T.P., Roggensack K., Williams S.N. Magmatic volatiles from the Kamchatka volcanic arc // *AGU Fall Meeting*. San Francisco. CA. Dec 11–15. 1999.

Flynn L.P., Wright R., Garbeil H., Harris A., Pilger E. A global thermal alert using MODIS: initial results from 2000–2001 // *Advances in Environmental Monitoring and Modeling*. 2002. Vol. 1. P. 5–36.

Folch A. A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status, and future perspectives // *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2012. Vol. 235–236. P. 96–115. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.05.020

Galle B., Johansson M., Rivera C., Zhang Y., Kihlman M., Kern C., Lehmann T., Platt U., Arellano S. Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC). A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description // *JGR*. Vol. 115. 2010.

- Gangale G., Prata A.J., Clarisse L.* The infrared spectral signature of volcanic ash determined from high-spectral resolution satellite measurements // *Remote sensing of environment*. 2010. Vol. 114(2). P. 414-425.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010 // *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 22-41.
- Girina O.A.* On Precursor of Kamchatkan Volcanoes Eruptions Based on Data from Satellite Monitoring // *J. of Volcanology and Seismology*. 2012. Vol. 6. No. 3. P. 142-149. doi: 10.1134/S0742046312030049
- Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Petrova E.* The 2017 Activity of Kamchatka Volcanoes and Danger to Aviation // *Abstracts. JpGU2018*. May 20-24, 2018. Chiba, Japan. 2018.
- Glaze L., Francis P.W., Rothery D.A.* Measuring thermal budgets of active volcanoes by Satellite remote sensing // *Nature*. 1989. Vol. 338. P. 144-146.
- Gonzalez R.C.* Digital image processing. 2016.
- Gordeev E.I., Girina O.A.* Volcanoes and their hazard to aviation // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Vol. 84. No. 1. P. 1-8. doi: 10.1134/S1019331614010079
- Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A.* Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // *Lincoln laboratory journal*. 2005. Vol. 15. No. 2. P. 271-298.
- Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Snow J.W.* Characterization and Delineation of Plumes, Clouds and Fires in Hyperspectral Images // *SPIE* 4049. 2000. P. 24-28.
- Harris A.J.L., Flynn L.P., Dean K.G., Pilger E., Wooster M., Oculo C., Mouginis-Mark P., Garbeil H., Thornber C., De la Cruz-Reyna S., Rothery D., Wright R.* Real-time monitoring of volcanic hot spots, in remote sensing of active volcanism // *AGU Monograph* 116: Remote sensing of Active Volcanism. 2000. P. 139-159.
- Igarashi Y., Girina O.A., Osiensky J., Moore D.* International Coordination in Managing Airborne Ash Hazards: Lessons from the Northern Pacific // *Advances in Volcanology*. 2017. P. 529-547. doi: 10.1007/11157_2016_45
- Iwasaki T., Maki T., Katayama K.* Tracer transport model at Japan meteorological agency and its application to the ETEX data // *Atmospheric Environment*. 1998. Vol. 32. No. 24. P. 4285-4295. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00171-X
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. of Americ. Meteorol. Soc.* 1996. Vol. 77. No. 3. P. 437-470.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. of Americ. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 83. No. 11. P. 1631-1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebata A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K.* The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics // *J. of Meteorol. Soc. of Japan*. 2015. Vol. 93. No. 1. P. 5-48. doi:10.2151/jmsj.2015-001
- Koepfen W.C., Patric M., Orr T., Sutton J., Dow D., Wright R.* Constraints on the partitioning of Kilauea's lavas between surface and tubed flows, estimated from infrared satellite data, sulfur dioxide flux measurements, and field observations // *Bull. of Volcanol.* 2013. Vol. 75. doi:10.1007/s00445-013-0716-3
- Korolev S.P., Sorokin A.A., Verkhoturov A.L., Kononov A.V., Shestakov N.V.* Automated Information System for Instrument Data Processing of the Regional Seismic Observation Network of FEB RAS // *Seismic Instruments*. 2015. Vol. 51. No. 3. P. 209-218.

Lovick J., Lawlor O., Dean K., Dehn J. Observation of volcanoes through webcams: Tools and techniques // AGU Fall Meeting Abstracts. 2008.

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. of Geophys. Res. 2003. 108 (B5). 2247. P. 1-15. doi:10.1029/2001JB000657

Malkovsky S.I., Sorokin A.A., Korolev S.P. Improving the system of numerical simulation of volcanic ash propagation using the PUFF model // Russian J. of Earth Sciences. 2017. Vol. 17. No. 5. ES5003. P. 1-6. doi:10.2205/2017ES000612

McGimsey R.G., Neal C.A., Girina O.A. 1998 Volcanic Activity in Alaska and Kamchatka: Summary of Events and Response of the Alaska Volcano Observatory. Open-File Report 03-423. 2003. 35 p.

McGimsey R.G., Neal C.A., Girina O.A. 1999 Volcanic Activity in Alaska and Kamchatka: Summary of Events and Response of the Alaska Volcano Observatory. Open-File Report 2004-1033. 2004. 45 p.

McGimsey R.G., Neal C.A., Girina O.A. 2003 Volcanic Activity in Alaska and Kamchatka: Summary of Events and Response of the Alaska Volcano Observatory. Open-File Report 2005-1310. 2005. 58 p.

McGimsey R.G., Wallace K.L. 1997 volcanic activity in Alaska and Kamchatka: Summary of events and response of the Alaska Volcano Observatory: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-0448. 1999. 42 p.

Miller T.P., Casadevall T.J. Volcanic ash hazards to aviation. In: Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, California. 2000. P. 915-930.

Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions // Bull. of Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 1960. Vol. 38. P. 497-544.

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.

Neal Ch., McGimsey R.G., Dixon J., Melnikov D. 2004 Volcanic Activity in Alaska and Kamchatka: Summary of Events and Response of the Alaska Volcano Observatory. Open-File Report 2005-1308. 2005. 67 p.

Newhall C.A., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // J. of Geophys. Res. 1982. No. 87. P. 1231-1238.

Onogi K., Tsutsui J., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi S., Hatsushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura S., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N., Taira R. The JRA-25 Reanalysis // J. of Meteorol. Soc. of Japan. 2007. Vol. 85. No. 3. P. 369-432. doi: 10.2151/jmsj.85.369.

Oppenheimer C., Francis P. Remote sensing of heat, lava and fumarole emission from Erta 'Ale volcano, Ethiopia // Int. J. of Rem. Sens. 1997. Vol. 18. P. 1661-1692.

Patrick M.R., Kauahikaua J.P., Antolik L. MATLAB tools for improved characterization and quantification of volcanic incandescence in Webcam imagery: Applications at Kilauea Volcano, Hawaii // US Geol. Surv. Tech. Methods. 2010. Vol. 13. P. 1-16.

Peterson R.A. Puff UAF User's Manual. 2003. Available at: <http://web.archive.org/web/20121119195411/http://puff.images.alaska.edu/doc.shtml> (accessed on 23.03.2016).

Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G., Peubey C., Thépaut J., Trémolet Y., Hólm E.V., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century // J. of Climate. 2016. Vol. 29. No. 11. P. 4083-4097. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1

Prata A.J. Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds // Geophysical research letters.1989a. Vol. 16(11). P. 1293-1296.

- Prata A.J.* Observation of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances // *Int. J. of Remote Sens.* 1989б. Vol. 10. No. 4–5. P. 751–761.
- 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
- Prata A.J., Bernardo C.* Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data // *J. of Geophysical Research: Atmospheres.* 2007. 112 (D20).
- Realmuto V.J.* The potential use of Earth observing system data to monitor the passive emission of sulfur dioxide from volcanoes // *Remote Sensing of Active Volcanism.* Geophysical Monograph. 2000. P. 101–115.
- Richardson L., Amundsen M., Ruby S.* RESTful web APIs. O'Reilly Media. 2013. 408 p.
- Ryall D.B., Maryon R.H.* Validation of the UK Met. Offices name model against the ETEX dataset // *Atmosph. Environment.* 1998. Vol. 32. No. 24. P. 4265–4276. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00177-0
- Safronov M., Winesett J.* Web application development with Yii2 and PHP. Packt Publishing, 2014. 406 p.
- Savorsky V.P., Loupian E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V., Konstantinjva A.M., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Kuznetsov O.O., Maklakov S.M., Panova O. Yu., Savchenko E.V.* VEGA-constellation tools to analyze hyperspectral images // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.* 2016. XLI-B4. P. 235–242. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-235-2016
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* Volcanoes of the World. Third edition. Smithsonian Institution. Washington DC. University of California Press, 2010. 551 p.
- 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.
- Scollo S., Prestifilippo M., Coltelli M., Peterson R.A., Spata G.* A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts // *J. of Volcanol. Geoth. Res.* 2011. Vol. 200. No. 3–4. P. 129–142. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.12.004
- Searcy C., Dean K., Stringer W.* PUFF: a high-resolution volcanic ash tracking model // *J. of Volcanol. Geother. Res.* 1998. Vol. 80. No. 1–2. P. 1–16.
- Sič B., El Amraoui L., Marécal V., Josse B., Arteta J., Guth J., Joly M., Hamer P.D.* Modelling of primary aerosols in the chemical transport model MOCAGE: Development and evaluation of aerosol physical parameterizations // *Geoscientific Model Development.* 2015. Vol. 8. No. 2. P. 381–408. doi: 10.5194/gmd-8-381-2015.
- Sorokin A.A., Girina O.A., Korolev S.P., Romanova I.M., Efremov V.Yu., Malkovskii S., Verkhoturov A., Balashov I.* The system of computer modeling of ash cloud propagation from Kamchatka volcanoes // *6th International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2016, Tokyo, Japan.* 2016a. P. 730–733.
- Sorokin A.A., Korolev S.P., Romanova I.M., Girina O.A., Urmanov I.P.* The kamchatka volcano video monitoring system // *6th International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2016, Tokyo, Japan.* 2016b. P. 734–737.
- Sorokin A.A., Korolev S.P., Urmanov I.P., Verkhoturov A.L., Makogonov S.V., Shestakov N.V.* Software Platform for Observation Networks Instrumental Data Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences // *Proc. of International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE 2015), Beijing, May 17–18. 2015.* P. 589–594.
- Sorokin A.A., Makogonov S.V., Korolev S.P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // *Scientific and Technical Information Processing.* 2017b. Vol. 44. Iss. 4. P. 302–304. doi: 10.3103/S0147688217040153

Steensen T., Stuffer M., Webley P., Grell G., Freitas S. Qualitative comparison of Mount Redoubt 2009 volcanic clouds using the PUFF and WRF-Chem dispersion models and satellite remote sensing data // *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 259. P. 235–247; doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.02.018

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // *Bull. of Americ. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 96. No. 12. P. 2059–2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1

Suzuki T. A theoretical model for dispersion of tephra // *Arc Volcanism: Physics and Tectonics.* Terra Scientific Publishing. Tokyo. 1983. P. 95–116.

Tanaka H.L. Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska // *Volcanic Ash and Aviation Safety: Proc. of First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, U.S. Geolog. Survey Bull.* 2047. 1994. P. 283–291.

Thomas H.E., Watson I.M., Carn S.A., Prata A.J., Realmuto V.J. A comparison of AIRS, MODIS and OMI sulphur dioxide retrievals in volcanic clouds // *Geomatics, Natural Hazards and Risk, Special Issue: Passive satellite techniques and ground-based investigations for volcanic activity monitoring.* 2011. Vol. 2. No. 3. P. 217–232.

Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Bechtold V. Da Costa, Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Holm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J. The Era-40 Re-analysis. *Quarterly J. of Royal Meteorol. Soc.* 2005. Vol. 131. No. 612. P. 2961–3012. doi: 10.1256/qj.04.176.

Wen S., Rose W.I. Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5 // *J. of Geoph. Research.* 1994. Vol. 99 (D3). P. 5421–5431.

Wright R., Flynn L.P., Garbeil H., Harris A.J., Pilger E. Automated volcanic eruption detection using MODIS // *Remote Sensing of Environment.* 2002. Vol. 82. P. 135–155.

Wright R., Flynn L.P., Garbeil H., Harris A.J., Pilger E. MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism // *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 2004. Vol. 135. P. 29–49.

Wright R., Garbeil H., Davies A.G. Cooling rate of some active lavas determined using an orbital imaging spectrometer // *J. of Geoph. Research (Solid Earth).* 2010. Vol. 115. B06205, doi: 10.1029/2009JB006536.

Wright R., Glaze L., Baloga S.M. Constraints on determining the eruption style and composition of terrestrial lavas from space // *Geology.* 2011. Vol. 39. P. 1127–1130.

Wright R., Lucey P., Crites S., Horton K., Wood M., Garbeil H. BBM/EM design of the thermal hyperspectral imager: An instrument for remote sensing of earth's surface, atmosphere and ocean, from a microsatellite platform // *Acta Astronautica.* 2013. Vol. 87. P. 182–192. doi: 10.1016/j.actaastro.2013.01.00

Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products // *Remote Sensing of Environment.* 2003. Vol. 86. Iss. 1. P. 83–107. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1

Yang K., Krotkov N.A., Krueger A.J., Carn S.A., Bhartia P.K., Levelt P.F. Retrieval of large volcanic SO₂ columns from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI): comparison and limitations // *J. of Geophysical Research.* 2007. Vol. 112. D24S43.

Научное издание

Гирина Ольга Алексеевна, Лупян Евгений Аркадьевич,
Сорокин Алексей Анатольевич, Мельников Дмитрий Владимирович,
Романова Ираида Мстиславовна, Кашницкий Александр Витальевич,
Уваров Иван Александрович, Мальковский Сергей Иванович,
Королев Сергей Павлович, Маневич Александр Геннадьевич,
Крамарева Любовь Сергеевна

Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки

Ответственный редактор О.А. Гирина
Оригинал-макет А.В. Пантелеева

Подписано в печать 26.11.2018. Формат 60x84/8. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Тираж 400 экз. Заказ КП00–006090.

Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН

Отпечатано в ООО «Камчатпресс». 683017,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Кроноцкая, 12а, www.kamchatpress.ru



© Ю. Демянчук, ИВиС ДВО РАН, KVERT

Мониторинг вулканов
 Массив геоинформационной системы мониторинга вулканов Камчатки и Сахалина от ИВиС ДВО РАН (разрабатывается при поддержке РФФИ проект 11-071-20226-офи-м-2011)

Данные среднего разрешения
 За дату: 2018-10-18

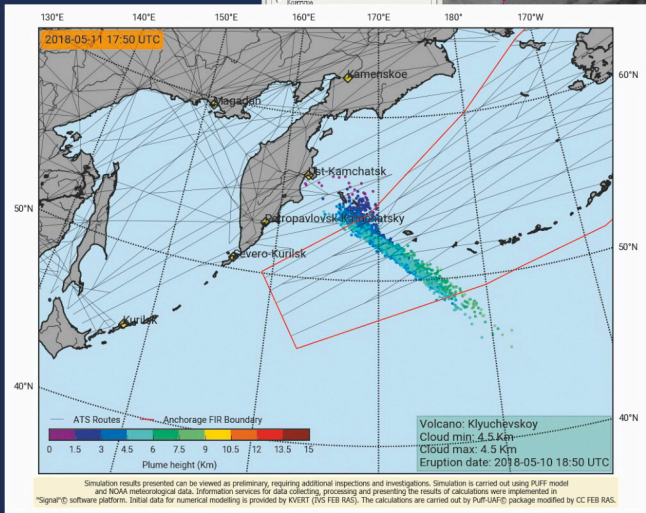
Фигуры данных:
 Список: список

Найдем объекты: 21

<input type="radio"/>	2018-10-18 20:00:00	ТЕРРА	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 21:00:00	ТЕРРА	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 22:43:47	ИМАА 3R	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 02:29	ИМАА 3R	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 17:26:23	ИМАА 3R	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 16:30:00	АQUA	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 16:47:36	АQUA	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 08:00	ИМАА 3R	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 12:30:00	АQUA	SLARFCO
<input checked="" type="radio"/>	2018-10-18 18:50:00	ТЕРРА	SLARFCO
<input type="radio"/>	2018-10-18 09:30:00	ТЕРРА	SLARFCO

В архиве
 Снять выделение

Параметры
 Разность радиокоррекционных тензоров: π
 Трансформация координат по: скелету углу
 По умолчанию
 Обеспечить терминальные ссылки
 Ручное терминальные ссылки
 Фигурные подтипы:
 Все фигурные
 Без фигурных



ISBN 978-5-902424-29-1



9 785902 424291