

Мониторинг природных катастроф — извержений и землетрясений — методами дистанционного зондирования и минимизация их последствий

А.П. Хренов, В.В. Ярмолюк

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)
119017, Москва, Старомонетный пер., 35
e-mail: khrenov@igem.ru*

Единственной возможностью максимального снижения риска и минимизации последствий землетрясений и извержений вулканов на среду обитания является своевременное оповещение населения о готовящихся природных катастрофах и их краткосрочный прогноз. Этим целям служит система космического мониторинга катастрофических явлений, которая предназначена для решения основных задач: обнаружение и выявление предвестников извержений и землетрясений. В России действующие вулканы сосредоточены исключительно в Курило-Камчатском вулканическом поясе и здесь же под Камчаткой и Курилами, вдоль Тихоокеанского побережья, расположены очаги землетрясений, связанные с зоной субдукции. Основными измерительными средствами для решения задач исследования поверхности Земли и мониторинга геологических катастроф являются радиометр MODIS радиометр теплового излучения и отражения ASTER. Компьютерная обработка радарных интерферометрических измерений (SRTM) и возможность построения новых трехмерных моделей рельефа и «цифровых слоев» позволяет в дальнейшем достаточно оперативно оценивать границу и объем изверженного материала во время извержения в реальном времени.

Ключевые слова: вулкан, извержения, землетрясения, мониторинг, дистанционные исследования, вулканская и сейсмическая опасность.

Введение

К природным катастрофам, в первую очередь, относятся землетрясения и извержения вулканов. Эффективное использование искусственных спутников Земли (ИСЗ) для мониторинга скоротечных процессов имеет исключительное преимущество перед традиционными геологическими и геофизическими исследованиями — это, в первую очередь возможность непрерывных наблюдений труднодоступных районов, а в случае использования СВЧ-аппаратуры — в любое время года и суток. Эти преимущества позволяют оценить динамику геологических процессов, а также вести практически одновременно по всей планете наблюдения за разномасштабными геологическими объектами от возникновения разломов до перемещения литосферных плит. Еще свежи в памяти последствия катастрофических землетрясений у нас в стране на о-ве Сахалин 24 мая 1995 г. силой до 7,6 баллов по шкале Рихтера, когда был полностью разрушен г. Нефтегорск (рис. 1), на Гаити 12 января 2010 г., 7,1 балла, погибло более 200 тыс. человек, в Чили 27 февраля 2010 г., 8,8 баллов, общее количество погибших достигло почти 800 человек, **и наконец, землетрясение у о-ва Хонсю, Япония, 11 марта 2011 г., 9,1 балла** — самое сильное землетрясение в Японии за всю историю наблюдений.

К таким же катастрофам относятся исторические извержения вулканов: Везувия в 79 г. н. э., Тамбора в 1815 г., Krakatau в 1883 г., Ксудача в 1907 г., Катмай в 1912 г., Безымянного в 1956 г., Шивелуча в 1964 г., Сент-Хеленс в 1980 г., Пинатубо в 1991 г., Ключевской в 1994 г. Катастрофические землетрясения и извержения вулканов, влияющие на судьбы людей и даже цивилизаций, будут происходить снова, и наше понимание их влияния на среду обитания может быть улучшено за счет комплексного анализа результатов измерений спутникового мониторинга. Последствия от землетрясений всегда ужасней и масштабней, чем от пароксизмальных извержений. Это определяется тем, что районы действующих вулканов

во многих регионах мира не так плотно населены, а предупреждение о времени возможных катастрофических извержениях бывает достаточно эффективно. Изучение трансформации частиц вулканического пепла и аэрозоля, а также их переноса на значительное расстояние, определило развитие нового направления по контролю распространения вулканических облаков для обеспечения безопасности полетов реактивной авиации. Расширение возможностей методов дистанционного зондирования за счет создания новой аппаратуры, позволили по-новому подойти к проблеме поиска критериев предвестников катастрофических извержений и землетрясений.

Задачи исследований

Конкретные практические задачи спутникового мониторинга для оценки и сейсмической и вулканической опасности сводятся:

- к анализу геодинамической обстановки в регионе;
- установлению напряжений в земной коре с помощью интерферометрических измерений;
- выявлению критериев предвестников катастрофических извержений по геоморфологическим изменениям постройки вулкана (состояние кратеров и экструзивных куполов);
- мониторингу, контролю и распознаванию вулканических облаков с целью получения оперативной информации для обеспечения безопасности полетов реактивной авиации;
- наземным исследованиям на тестовых полигонах и математическому моделированию вулканических процессов.

Методы компьютерной обработки цифровых изображений высокого пространственного разрешения позволяют оперативно составлять новые трехмерные (3D) карты рельефа вулкана, на которых отображаются возрастные, структурные и петрохимические особенности изверженных пород, объемы и границы изверженного материала в реальном времени.

Дешифрирование радиолокационных изображений (РЛИ)

Радарные системы обладают превосходной возможностью обеспечивать мониторинг и контроль быстротекущих процессов на Земле. Исследованию в этой области по эффективному применения методов СВЧ и изучению окружающей среды посвящены работы Н.А. Арманда, П.Г. Бородина, П. Кронберга, R.J. Gurner, J.L. Foster, C.L. Parkinson, J. Faney (*Satellite Atlas of the World*) и др. В отличие от оптических методов, радиолокационные системы являются всепогодными. Их данные не зависят от степени освещенности, радиолокационный луч обладает способностью, в зависимости от длины волны, проникать сквозь определенный поверхностный слой земли, в том числе растительный покров, лед и др.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (PCA — SAR — Synthetic Aperture Radar) наряду тепловыми инфракрасными сканерами (ИК-съемка) широко используются (Abrams et al., 1991; Хренов, 2003) для идентификации лавовых потоков по шероховатости облучаемой поверхности. Эти характеристики были использованы как для различия типов лавовых потоков (глыбовых, шлако-глыбовых, пахое-хое), так и для определения относительного возраста застывшей лавы.

Для подробного анализа данных РЛИ необходимо дополнительно иметь сведения о радиофизических свойствах, слагающих поверхность вулкана, пород и структуре их поверхности. Увеличение дисперсии рассеянных сигналов по латерали потока связано с увеличением размеров отдельных глыб на его поверхности, с «изрезанностью и расчлененностью его рельефа», контрастностью, что приводит к появлению полностью затененных участков и участков с близким к «зеркальному» механизмом отражения зондирующих сигналов.

Рельеф земной поверхности отображается также в фазовой структуре рассеянных сигналов, что позволяет с помощью алгоритмов интерферометрической обработки построить ее трехмерное изображение и сформировать цифровые морфологические модели различных структурных образований (SAR Interferometry).

В ИГЕМ РАН были детально проанализированы радиолокационные изображения (SIR-C/X-SAR), полученные с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой и предоставленные нам JPL/NASA для обработки. SIR-C/X-SAR — трехдиапазонный многополяризационный (SAR), базирующийся на платформе космического аппарата (КА) Space Shuttle, совершил два полета: в апреле и октябре 1994 г. (рис. 2).

SIR-C/X-SAR включает следующие диапазоны: L (длина волны 23 см), C (длина волны 5,6 см) и X (длина волны 3,1 см). PCA в L- и C-диапазонах работает во всех комбинациях поляризаций. В последние три дня полета большинство съемок пришлось на вулканы Камчатки. Анализ материалов показал, что для решения задач вулканологии и геологии наибольший интерес представляют режимы съемок, обеспечивающие наличие кросс-поляризационных изображений при широкой полосе обзора (рис. 3а–в).

Особое внимание заслуживает возможность получения изображений при разной поляризации радиосигнала. Наличие одновременно каналов кросс-поляризованного, горизонтального-вертикального (HV), или вертикального-горизонтального (VH) и одинаково поляризованного: горизонтального-горизонтального (HH) или вертикального-вертикального (VV) сигналов у радиолокационной станции бокового обзора (РЛС БО) позволяет в ряде случаев получить дополнительную информацию. PCA X-диапазона работает на одной поляризации (VV).

С помощью SIR-C можно получать изображения в различных режимах и разрешением на местности 25 м. Запись изображения происходит параллельно по четырем каналам. Изменение параметров съемки оказывает существенное влияние на степень дешифрирования глыбовых лавовых потоков. Значительную роль играет соотношение направления визирования и экспозиции склона вулкана.

Метод кросс-поляризации в L-диапазоне (23 см) наиболее эффективен при выделении на радиолокационных изображениях лавовых потоков различных типов, возраста и состава и хорошо диагностируется даже на крутых участках склона.

Поиски критериев — предвестников катастрофических извержений и землетрясений методами дистанционного зондирования

Наиболее эффективным методом мониторинга за изменением состояния морфологии кратеров и экструзивных куполов вулканов Безымянный и Шивелуч является фотограмметрическая обработка. Фотограмметрический метод требует достаточно много времени и может быть использован для получения эталонных цифровых моделей вулканов (Двигало, 1984, 1991, 2000). Для оперативного формирования трехмерной цифровой модели рельефа вулкана эффективно используется метод интерферометрии (SAR) (Хренов и др., 2005).

Для выявления предвестников катастрофических извержений и количественной оценки параметров вулканического процесса целесообразно вести мониторинг с помощью радиолокационных методов. Они позволяют контролировать процессы: внедрение магмы в тело стратовулкана, возможное обрушение постройки, динамику лавовых потоков, раскаленных лавин, селевых потоков и лахар.

Внедрение магмы в постройку вулкана приводит к изменению структуры и морфологии его конуса. Если процесс достаточно медленный, тогда изменения морфологии вулкана фиксируются с помощью фотограмметрической обработки радиолокационных стереопар. Для прогнозирования обрушения вулканов необходимо сопоставлять результаты радиолокационной съемки, проведенной одновременно в различных диапазонах длин волн.

Скорость и динамика распространения лавовых и пирокластических потоков, а также их объемы, не всегда можно проследить в режиме on-line из-за высокой скорости их распространения. Хорошо контролируются их границы по изменению на последовательно полученных радиолокационных изображениях во время извержения вулкана. Для этого могут использоваться как двухмерные изображения, на которых эти потоки будут видны в виде яркостных образов, так и в последовательности «цифровых слоев» на трехмерных моделях рельефа вулкана (Хренов и др., 2005; Хренов, 2011).

В России действующие вулканы сосредоточены исключительно в Курило-Камчатском вулканическом поясе и здесь же, под Камчаткой и Курилами, вдоль Тихоокеанского побережья расположены очаги тектонических землетрясений. Землетрясения, как и вулканизм в основном связаны с пограничными взаимодействиями литосферных плит, с зоной субдукции. Основными измерительными средствами решения задач исследования поверхности Земли и мониторинга геологических катастроф являются многоспектральный радиометр MODIS и радиометр высокого разрешения теплового излучения и отражения ASTER.

Разрушительные землетрясения силой 7,0 и более баллов по шкале Рихтера принадлежат к природным катастрофам, трагически влияющим на судьбы человеческого общества. Поэтому заслуженное и возрастающее внимание к проблемам сейсмической опасности, которое существует во всех развитых странах, поддерживается специальными научно-техническими государственными программами. Соответствующие исследования ведутся и в рамках аэрокосмического мониторинга за сейсмоопасными районами в областях современного вулканизма и не только (Тронин, 2011). С появлением новых, и усовершенствованием уже существующих методов стационарного наземного изучения механизмов землетрясений, изменяются и методы использования космических средств наблюдений за сейсмоопасными регионами. Можно выделить следующие группы показателей — предвестников сейсмической активности территорий: геологические, гидродинамические, геохимические и геотермические.

Определение точной геометрии плит и параметров их перемещений по поверхности Земли способно обеспечить решение проблемы — долгосрочного прогнозирования места и масштаба проявления геологических катастроф. Поэтому изучение новейшей тектонической активности связано с изучением зон развития соответствующих нарушений, а основные проблемы возникают при определении границ активных тектонических областей и их районирования в отношении сейсмической опасности. Изучение сейсмически активных областей Земли показало, что катастрофические землетрясения или рой землетрясений происходят в активных зонах с промежутками в десятки или сотни лет.

Наиболее важной является группа геологических, геофизических и сейсмотомографических факторов, в соответствии с которой определяются границы возможных сейсмически опасных территорий и проводится их сейсморайонирование по степени опасности.

Все эти исследования выполняются комплексом геологических методов, включающих важнейшую составляющую — дешифрирование аэрокосмических снимков, с последующим выполнением линеаментного анализа (Бондур и др., 2011). Дешифрирование основано на выделении прямых и косвенных признаков геологических образований. Прямые признаки обусловлены особенностями изучения самих геологических объектов, а также морфологическими признаками сейсмодислокаций, выраженных в виде рвов, уступов, зияющих трещин и т. д. Косвенные признаки характеризуют, связанные с теми или иными геологическими образованиями, особенности ландшафта, гидросети или пространственное распределение специфической видовой растительности, не связанных с особенностями почв.

Система космического мониторинга катастрофических вулканических извержений предназначена для решения трех основных задач: 1) обнаружение извержений; 2) контроль динамики развития происходящих событий; 3) разработка сценариев динамики извержений с целью оценки их масштаба и последствий на природную среду. При разработке и создании комплекса космической системы оперативного краткосрочного прогноза извержений и зем-

летрясений (КС ОКПВиЗ) необходимо предусмотреть возможность мониторинга и за другими катастрофическими природными явлениями, такими как наводнения и пожары.

Исследования с ИСЗ позволяют в полном объеме картировать сейсмоактивные зоны, и, кроме того, в состоянии обеспечить постоянное наблюдение за изменением физических полей, оперативную обработку и передачу информации в обрабатывающие Центры и, тем самым, в реальном времени выявлять предвестники землетрясений и обеспечивать своевременный прогноз. Эффективность краткосрочных прогнозов землетрясений пока невелика или даже невозможна.

Контроль распространения пепловых облаков

Продолжает оставаться актуальным комплексный мониторинг и контроль движения и распространения пепловых облаков во время и после извержений активных вулканов Камчатки, представляющих реальную угрозу безопасности полетов реактивной авиации в Тихоокеанском регионе. Недавние события, связанные с взрывным извержением 14 апреля 2010 г. вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии, когда большинство Европейских аэропортов были на неделю парализованы из-за невозможности полетов реактивной авиации, лишний раз свидетельствуют об актуальности мониторинга пепловых облаков.

Для контроля динамики пепловых облаков и оповещения авиаперевозчиков о маршрутах их движения созданы международные центры наблюдений (в России группа KVERT на Камчатке) с целью минимизации последствий извержений. На Камчатке при пароксизмальном взрывном извержении любого действующего вулкана может быть создана ситуация угрозы безопасности для реактивной авиации. Но наибольшую реальную опасность представляют активные вулканы Ключевской, Шивелуч, Безымянный, Карымский, способные чаще других к пароксизмальным взрывным извержениям. Извержение вулканов Курильских островов в редких случаях могут также угрожать безопасности полетов (Хренов, 2011).

Экспlosивная деятельность Ключевского вулкана представляет наибольшую опасность для жизнедеятельности г. Ключи и оказывает негативные воздействия на реактивную авиацию в Северном полушарии. Ярким примером могут служить последствия пароксизмального извержения 1 октября 1994 г., когда восемь международных авиакомпаний отменили свои авиарейсы из Малайзии и Японии в США и Канаду, вследствие перекрытия пепловым шлейфом самолетных эшелонов над Тихим океаном. Широкую известность приобрели материалы извержения вулкана Ключевская Сопка, полученные 1 октября 1994 г. с платформы KA Space Shuttle (рис. 4а, б).

Произошло более 80 случаев, когда при перелетах в таких условиях самолеты попадали в зону влияния вулканических облаков. Хорошо известны примеры такие как: вынужденная посадка самолета авиакомпании Britishair в аэропорту Джакарты в 1982 г., при перелете из Малайзии в Австралию и вынужденная посадка DC-10 в аэропорту Манилы в 1991 г. в результате попадания самолета в пепловое облако от вулкана Пинатубо (рис. 5). От активности только одного вулкана Пинатубо в 1991 г. (Филиппины) было зарегистрировано несколько случаев нештатных ситуаций на борту авиалайнеров, которые заканчивались неоднократно вынужденными посадками.

Причинами таких катастроф было всегда налипание аэрозоля и кристаллизация частиц пепла, состоящих, главным образом, из вулканического стекла на лопатках реактивных турбин.

Остается еще один пока плохо изученный аспект, влияющий на безопасность полетов. Он связан с тем, что во время пароксизмальных взрывных извержениях в эруптивной колонне (облаке) образуются мощные электрические разряды в виде линейных или кустовых молний. Во время извержения вулкана Пуйвуе в Чили в 2011 г. (рис. 6) около 40 рейсов из Новой Зеландии были задержаны на несколько суток. Если такие электрические разряды возникают

вблизи пролетающих самолетов, то неизбежно выходят из строя электронные приборы, теряется связь с Землей и выполнение команд «земля–воздух–земля» становиться не возможной. Это, в свою очередь, приводит к возникновению непростых ситуаций на борту самолета.

Вопрос постоянного и регулярного контроля вулканических шлейфов остается открытым, и требует детальных комплексных исследований, включая пристальное внимание за эруптивными облаками от фреатических извержений. На Камчатке к таким вулканам относятся Хангар, Горелый, Мутновский, Ксудач. А события 1996 г. в кальдере Академии Наук в Карымском озере свидетельствуют о возможных типах извержений в Кроноцком и Курильском озерах. Особенность облаков от таких извержений состоит в том, что они пока не определяются на локаторах самолетов, и по своим характеристикам не отличаются от грозовых облаков, хотя в них присутствуют примеси пепла и аэрозоля. Одним из признаков — предвестников фреатических взрывов — может служить изменение уровня и структуры подземных вод в районе вулкана, что приводит к изменению электрофизических свойств почвы. Эти изменения могут быть зафиксированы по изменению яркостной картины на радиолокационном изображении земной поверхности в окрестностях вулкана. Для этих целей важную информацию могут дать длинноволновые SAR, которые позволяют получать данные об изменениях водного режима на значительных глубинах.

При пароксизмальных извержениях стратовулканов в стратосферу, через тропопаузу проникает огромное количество пепла и особенно аэрозолей вулканического происхождения. В районе Ключевской группы вулканов тропопауза расположена на высоте около 8 км. Таким образом, при мощных взрывах и высоте выброса эруптивной колонны более 12 км большое количество пепла и аэрозолей неизбежно заносится в стратосферу и «живут» там длительное время.

Особый интерес представляет изучение концентраций CO, HCl и HF в эруптивных облаках Ключевского вулкана, при пароксизмальном извержении происходит интенсивный выброс галогенов в стратосферу, так как их содержание в продуктах извержения достаточно велико. По итогам инструментальных исследований известно, что слой сернокислого аэрозоля оказывает существенное влияние на солнечную радиацию и термический режим Земли. Ежегодно в стратосферу вулканами выбрасывается около 40 млн т аэрозолей. Из них, примерно, 1 млн т приходится на долю тонкодисперсного пепла.

Для извержений в высоких северных широтах имеется сравнительно мало прямых измерений состава и объема аэрозолей в вулканических облаках (Богатиков и др., 1995). С точки зрения охраны окружающей среды и защиты от катастроф особый интерес представляет обилие SO_2 , H_2O , CO, HCl, HF и взвешенного вулканического пепла в эруптивных шлейфах.

Изучение проб аэрозолей показало, что в целом для всех групп вулканов характерны частицы с преимущественным содержанием SiO_2 , Ca, Al_2O_3 , FeO. Установлено также наличие в частицах Мутновского вулкана таких элементов, как Cd, Ti, Zn (7 % от общего числа частиц в выборке), присутствие в частицах вулкана Шивелуч Sn (5 %); а в выбросах вулкана Ключевского наличие следов Pb, Zn, Cu (Богатиков и др., 1995).

Немаловажным является тот факт, что роза ветров над Камчаткой имеет генеральное устойчивое направление на восток. Таким образом, практически все шлейфы от эксплозивных извержений вулканов Камчатки уходят в акваторию Тихого океана, что при своевременном оперативном оповещение авиационных служб, позволяет заблаговременно менять эшелоны полетов для реактивной авиации.

Вулканические извержения в Северном полушарии ведут к распылению и концентрации пепла и аэрозоля в арктической и субарктической системах циркуляции воздушных масс. Оценка их количества, изучение баланса твердого, аэрозольного и газообразного вещества — одна из важнейших задач спутникового мониторинга. Роль и масштаб влияния вулканизма на изменение климата и разрушение озонового слоя в Северном полушарии — вопросы современной экологии.



Рис. 1. Руины города Нefтегорска после землетрясения, май 1995 г.



Рис. 2. Космический аппарат *Shuttle* пролетает над Ключевской группой вулканов на Камчатке

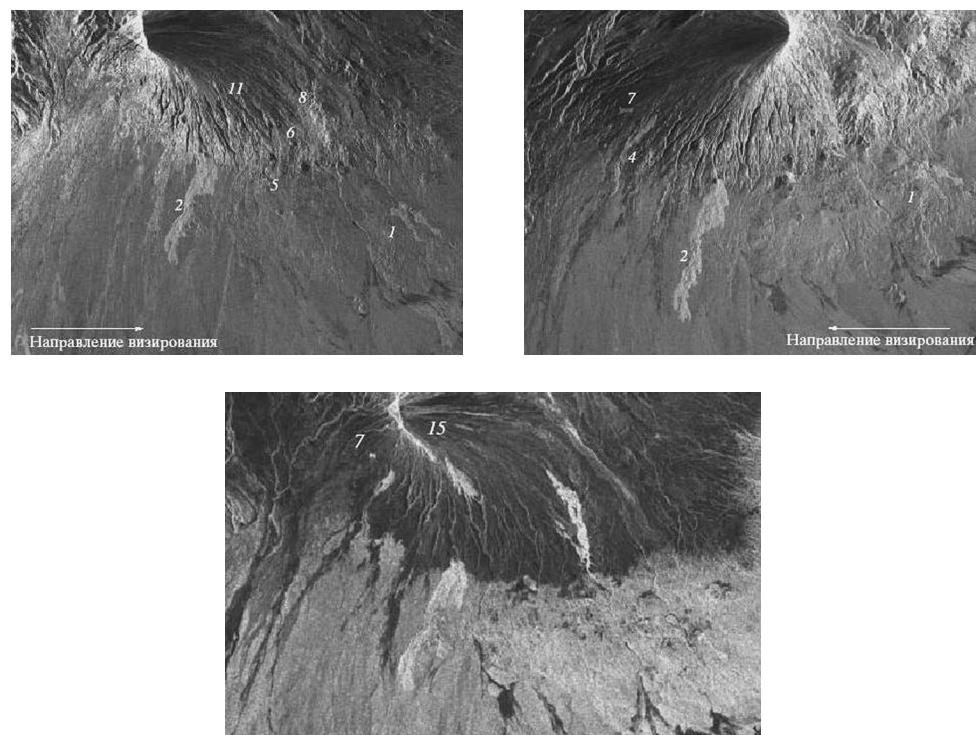


Рис. 3. Радиолокационное изображение SIR-C восточного склона Ключевского вулкана в L-диапазоне (23 см): а – виток 120-20 от 7.10.1984 г., поляризация *VV*, угол визирования – 21,3°; б – виток 121-10 от 7.10.1994 г., по-*ляризация VV*, угол визирования – 28,5°; в – виток 88-20 от 5.10.1994 г., поляризация *HV*, угол визирования – 27,4°

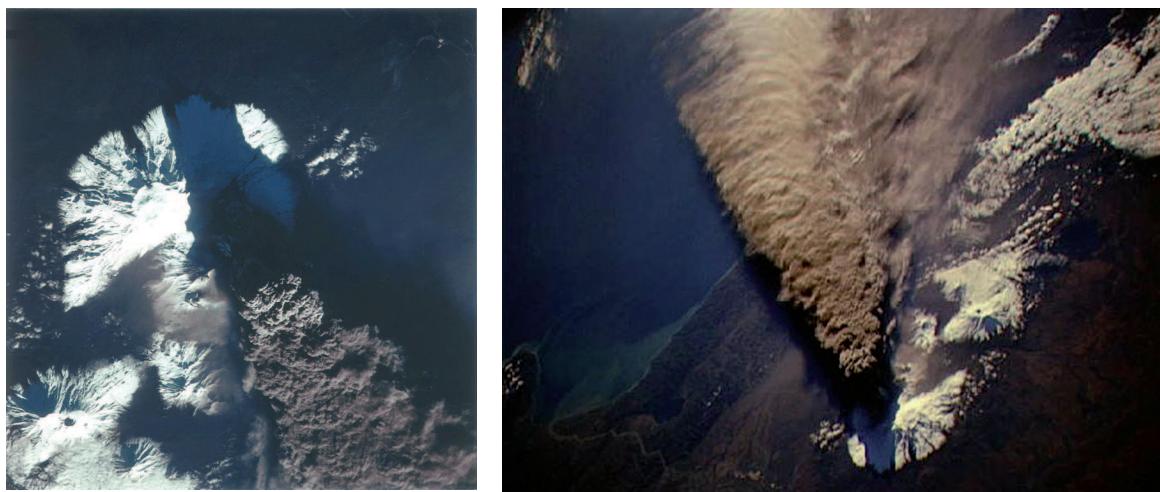


Рис. 4. Космические снимки эруптивных шлейфов с космического аппарата Shuttle (NASA) вулкана Ключевского 1 октября 1994 г.



Рис. 5. Результат попадания самолета CD-10 в шлейф пеплового облака вулкана Пинатубо в 1991 г.



Рис. 6. Электрические разряды (молнии) в эруптивной колонне при извержении вулкана Пейсую (Чили) в 2011 г.



Рис. 7. Вулкан Камень, его склон после обрушения

Рис. 8. Строительство дамб для предотвращения урона от лавового потока на вулкане Стромболи

Попытки минимизации последствий извержений

Все активные вулканы Камчатки, а тем более вулканы Курил не представляют своими извержениями угрозы для жителей этого региона ввиду отсутствия плотности поселений вблизи активных вулканов. Единственные «домашние» вулканы Корякский и Авачинский, расположенные рядом с городами Елизово и Петропавловск-Камчатский, не представляют собой потенциальной угрозы этим городам. Но нельзя полностью исключать сценарий катастрофического извержения Корякского вулкана, с последующим разрушением его вершины.

Аэрокосмический мониторинг и многолетний контроль динамики извержений Ключевского вулкана позволил моделировать и разрабатывать сценарии предстоящих эруптивных событий. Предложенные сценарии извержений и их последующий анализ, исходя из реальных условий с происходящими явлениями, позволит оценить их достоверность и внести корректизы (Хренов и др., 2010). Лавовые и пирокластические потоки, а также сели и лахары не угрожают жизнедеятельности населения вблизи вулкана. Экологическая ситуация несколько иная, так как мощные пеплопады могут уничтожить пастбища и привести к падежу домашнего скота и птицы. Сценарий извержений в ближайшем будущем не будет отличаться от современных извержений. Извержения Ключевского вулкана не несут постоянной непосредственной угрозы разрушения для населенных пунктов расположенных в его окрестностях. Однако даже частичное обрушение (коллапс) сегмента его постройки, может привести к катастрофическим последствиям для города Ключи. В 1988–1990 гг., во время извержения вулкана, на его восточном склоне, в прикратерной части, была обнаружена система дугообразных трещин. Их дальнейшее развитие может привести к катастрофическому обрушению склона, наподобие того, что произошло на вулкане Камень (рис. 7).

Практически все лавовые потоки андезибазальтового или базальтового состава по характеру своего строения относятся к одному глыбовому типу «аа». На истоке они часто имеют волнистую канатную поверхность типа «пахое-хое», переходящую по латерали потока в глыбовую или шлако-глыбовую. Известно, что динамика развития и формирования многочисленных лавовых потоков на крутых (свыше 35°) склонах вулканов не подчиняется закону движения жидкости (Хренов, 2003). При извержении вулканов Камчатки, Курильских островов, а также вулкана Килауэа, можно было наблюдать, как один и тот же лавовый поток на крутых участках склона «набухает» и набирает мощность, а на равнинных участках, резко утончается и стремительно растекается по склону широким фронтом. Одним из ключевых и определяющих процессов динамики лавовых потоков остаются реологические свойства лавы, которые зависят, главным образом, от температуры, определяются ее расходом, газонасыщенностью и газосодержанием.

При постоянном расходе лавы на истоке, независимо от характера подстилающей поверхности склона вулкана, по которому изливается лавовый поток с глыбовой или шлако-глыбовой поверхностью, будь то камень, шлак, лед или снег, он имеет постоянную тенденцию к наращиванию своей мощности. Исток лавы (диаметр которого никогда не превышает 1,5…3,0 м) представляет собой жерло, которое почти всегда венчает небольшой шлакового конуса, открытый в сторону движения лавы, формируется четко выраженный лавовый желоб, по которому и происходит транспортировка лавового материала. Борта этого желоба на протяжении всего потока постоянно наращиваются за счет «развализования» фронтальной части.

С древних времен люди, обитающие на действующих вулканах, страдающие от их извержений и вновь возвращающиеся на плодородные, удобренные пеплом склоны вулкана, делали попытки предотвратить наносимый ущерб от извержения и в частности вели активную борьбу с движущимися лавовыми потоками. Обычная практика — это строительство дамб и плотин на пути движения лавового потока (рис. 8а, б). Опыт наблюдений за многочисленными эфузивными извержениями на Камчатке и Курилах, позволяет нам сделать

вывод, что эффективно повлиять на направление движения лавового потока может только глубокий ров с крутыми стенками.

На извержении вулкана Килауэа применялись попытки изменить движение лавовых потоков с помощью бомбометания, но они не увенчались успехом. Единственный успешный пример остановки лавового потока произошел в Исландии, при подводном извержении вулкана Суртсей, которое происходило 14 ноября 1963 г. Когда при длительном воздействии огромного количества воды из пожарных гидрантов на фронт лавового потока он был остановлен.

Заключение

Дистанционные методы исследования в оптическом и ИК-диапазонах позволяют следить за изменением морфологии кратеров вулканов (ростом и разрушением экструзивных куполов) и после фотограмметрической обработки полученных материалов производить количественные оценки объемов

Перспективными и эффективными материалами дистанционного зондирования регионов с потенциально повышенной сейсмической и вулканической активностью, с целью поиска критериев предвестников природных катастроф, на наш взгляд является, получение радиолокационных и интерферометрических измерений земной поверхности.

Для предотвращения разрушений от сильных землетрясений (выше 7,0 баллов), в первую очередь, необходимо вести качественное сейсмостойкое строительство зданий, сооружений, мостов и коммуникаций с учетом сейсмического районирования.

Создание сценария эруптивных событий для каждого отдельного вулкана, в зависимости от типа извержений, позволит дать точный прогноз характера предстоящих эруптивных событий (взрывы, лавовые или пирокластические потоки, лахары и т. д.) и времени его начала. Своевременные мероприятия оповещение населения о грядущих событиях смогут минимизировать последствия этих природных катастроф.

В настоящее время в мировой практике, в том числе и в России, есть примеры успешных прогнозов извержений вулканов. Успешно также решена проблема сейсмического районирования сейсмоопасных территорий, т.е. место и возможная магнитуда землетрясения. Предсказание же времени начала землетрясений пока остается не возможным. И в этом может быть большое будущее за краткосрочным прогнозом землетрясений с помощь методов дистанционного зондирования с космических аппаратов.

Литература

1. Богатиков О.А., Хренов А.П., Ховавко С.А., Мальцев А.А. Состав, структура и оценка количества аэрозолей в эксплозиях вулканов центрального типа (Камчатка) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 111–116.
2. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В., Троицкая Д.Д. Геодинамические особенности сейсмоопасных территорий России на основе линеаментного анализа // 9-я открытая Всерос. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2011: Сб. тез. 2011. С. 314. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=2710>.
3. Двигало В.Н. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968–1988 гг. (по аэрофотограмметическим наблюдениям) // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5.
4. Двигало В.Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3–16.
5. Двигало В.Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. по фотограмметическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104–109.

6. Тронин А.А. Изучение землетрясений из космоса // Земля и Вселенная. 2011. № 5. С. 23–32.
7. Хренов А.П. Исследование активных вулканов методами дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 166–176.
8. Хренов А.П. Современный базальтовый вулканизм Камчатки (результаты аэрокосмические и петрологические исследований): Автореф. ... д-ра геолого-минерал. наук. М.: ИГЕМ, 2003. 40 с.
9. Хренов А.П., Богатиков О.А., Дроздин Д.В., Лексин А.Б., Маханова Т.М. Трехмерные цифровые модели вулканов по материалам радиолокационных измерений // Докл. РАН. 2005. Т. 202. № 1. С. 71–75.
10. Хренов А.П., Богатиков О.А., Маханова Т.М. Мониторинг вулканической деятельности и сценарии извержений для наиболее активных вулканов Курило-Камчатского вулканического пояса, с целью выявления предвестников извержений и минимизации их последствий // Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений и техногенных катастроф, включая проблемы ускоренного развития атомной энергетики. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 197–218.
11. Abrams M., Abbott E., Kanle A. Combined Use of Visible, Reflected Infrared, and Thermal Infrared Images for Mapping Hawaiian Lava Flows // J. Geophysical Research. 1991. V. 96. N. B1. P. 475–0484.

Remote Sensing for Hazardous Eruption and Earthquake Monitoring and Reducing the Risks of Environmental Impact

A.P. Khrenov, V.V. Yarmolyuk

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences institution (IGEM RAS),
119017, Moscow, Staromonetny Per., 35
e-mail: khrenov@igem.ru*

The only possibility to minimize the risks and environmental impact of earthquakes and volcanic eruptions is warning the population in due time about the impending natural hazards and making their short-term forecasts. These objectives are achieved using the satellite-based catastrophic event monitoring system designed for the performance of the main task: eruption and earthquake precursors detecting and recognition. Active volcanoes in Russia are concentrated entirely in the Kuril-Kamchatka volcanic belt, and earthquake foci confined to subduction zones are also concentrated here beneath Kamchatka and the Kurils along the Pacific Ocean coast. The main instruments applied for the Earth's surface observation and geological hazard monitoring are the MODIS and thermal emission and reflection (ASTER) radiometers. Computer processing of radar interferometry (SRTM) data and the possibility to compile new three-dimensional digital elevation models and data layers enables the prompt assessment of the areal extent and volumes of eruption products during future eruptions in real-time mode.

Keywords: volcano, eruptions, earthquakes, monitoring, remote sensing, volcanic and seismic hazard.