

Е.И.ГОРДЕЕВ

Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности

Сейсмические исследования на активных вулканах начались почти одновременно с инструментальными сейсмологическими наблюдениями. В начале XX в. впервые были обнаружены сейсмические сигналы, связанные с активизацией влк. Усу в Японии [7]. Но, в отличие от значительных достижений в исследовании тектонических землетрясений, прогресс в исследовании сейсмических сигналов, связанных с деятельностью вулканов, наступил только несколько десятилетий назад. Во-первых, это было связано с тем, что вулканические землетрясения и другие сейсмические сигналы на активных вулканах имеют максимальную величину на несколько порядков меньше, чем тектонические землетрясения, и для их исследования необходимо создавать специальные системы наблюдений. Во-вторых, если тектонические землетрясения происходят практически постоянно, то сейсмические сигналы на вулканах появляются в основном во время извержений, периодичность которых составляет десятки и сотни лет. Возможность детальных сейсмических наблюдений на вулканах возникла при появлении портативных автономных сейсмических станций, и в настоящее время на большинстве активных вулканов мира установлены локальные сети сейсмических станций с непрерывными наблюдениями за сейсмической активностью вулканов.

Практически с самого начала сейсмических наблюдений на активных вулканах было обнаружено множество сигналов, которые принципиально отличались от записей тектонических землетрясений. Необычная форма записи в виде длительных непрерывных колебаний получила общее название «вулканическое дрожание». Сигналы такого типа появлялись всегда во время извержения вулканов. Кроме таких длительных сигналов на активных вулканах были обнаружены слабые землетрясения, которые имели значительно более низкочастотный характер, чем обычные тектонические землетрясения такой же магнитуды. На записях низкочастотных землетрясений отсутствовали явные вступления различных фаз сейсмических волн. Вместе с нормальными вулканическими землетрясениями (подобными обычным тектоническим) низкочастотные землетрясения всегда предшествовали извержению вулканов. Следующий тип сейсмических сигналов на активных вулканах – это сейсмические сигналы, сопровождающие вулканические взрывы в кратере в процессе извержения. Эти сигналы по форме и по спектральному составу близки к низкочастотным вулканическим землетрясениям.

Для многих исследователей очевидно, что сейсмические сигналы, предшествующие и сопровождающие извержения вулканов, содержат обширную информацию о процессах подготовки извержений, о динамике и параметрах магматических расплавов, о процессах газовыделения и развития извержений во времени. Все эти проблемы являются актуальными для оценки вулканической опасности, для прогноза извержений вулканов и слежения за ходом извержения.

ГОРДЕЕВ Евгений Ильич – член-корреспондент РАН (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский).

Сейсмические сигналы на вулканах

Сейчас очевидно, что активизация вулканов связана с динамическими процессами в магматических расплавах, в результате которых возникают сейсмические сигналы. Многочисленные наблюдения на различных вулканах во всем мире позволили классифицировать эти сигналы по характерным особенностям записи. Впервые систематизация сейсмических сигналов, связанных с вулканами, была предпринята Минаками [4]. Он распределял землетрясения по спектральным характеристикам сигналов и по расположению в пространстве:

А-тип. Расположены под вулканическими постройками на глубинах до нескольких десятков километров, происходят практически на всех активных вулканах и достаточно часто предваряют извержения. У землетрясений А-типа отмечаются четкие вступления Р- и S-волн, преобладают высокие (около 10 Гц) частоты максимальных значений спектральных составляющих. Высокочастотный состав и отчетливые вступления Р- и S-волн указывают, что сейсмические события А-типа – это тектонические землетрясения (обычно их называют вулкано-тектоническими), связанные с разрушением среды, вызванным воздействием магматического расплава;

В-тип. Их гипоцентры находятся вблизи поверхности в районе активного кратера. В основном волновой состав таких землетрясений представлен поверхностными волнами, и вступления S-волн обычно не выделяются. Вступления Р-волн слабые, частотный состав 1–3 Гц;

взрывные. Всегда сопровождают взрывы в кратере вулкана. Волновой и частотный состав практически как у землетрясений В-типа, хотя интенсивность их во всех случаях выше;

вулканическое дрожание. При непрерывном истечении газо-пепловых потоков или лавы взрывные землетрясения становятся непрерывными и образуют так называемое вулканическое дрожание, которое может продолжаться часы и даже дни в постоянном режиме. Частотный состав вулканического дрожания и взрывных землетрясений полностью соответствует.

Кроме этого, некоторые низкочастотные землетрясения имеют более сложную форму, чем землетрясения В-типа. Достаточно часто в начальной части записи низкочастотных землетрясений присутствует интенсивная высокочастотная компонента. Такие землетрясения называются *гибридными землетрясениями*.

На рис. 1 представлены примеры различных типов сейсмических сигналов на вулканах.

Контроль состояния вулканов

Вулкано-тектонические и низкочастотные землетрясения. Сейсмические наблюдения на активных вулканах в настоящее время являются одним из наиболее распространенных методов оценки состояния вулканов. Активизация вулканических процессов всегда связана с движением магматических расплавов в сплошной среде, что создает дополнительные напряжения, приводящие к возникновению и развитию разрывов в твердой среде. Такие разрывы образуют обычные тектонические землетрясения, называемые вулкано-тектоническими. Основные их характеристики как и у тектонических, кроме динамического диапазона. Обычно для вулкано-тектонических землетрясений максимальная величина не превышает магнитуды 4,5–5,0. Развитие во времени роев вулкано-тектонических землетрясений принципиально отличается от развития во времени роев афтершоков сильных землетрясений и нормальных тектонических роев, когда основные напряжения, накопленные за длительное время, реализуются в результате одного или нескольких сильных землетрясений. Для вулканов, когда напряжения создаются процессами

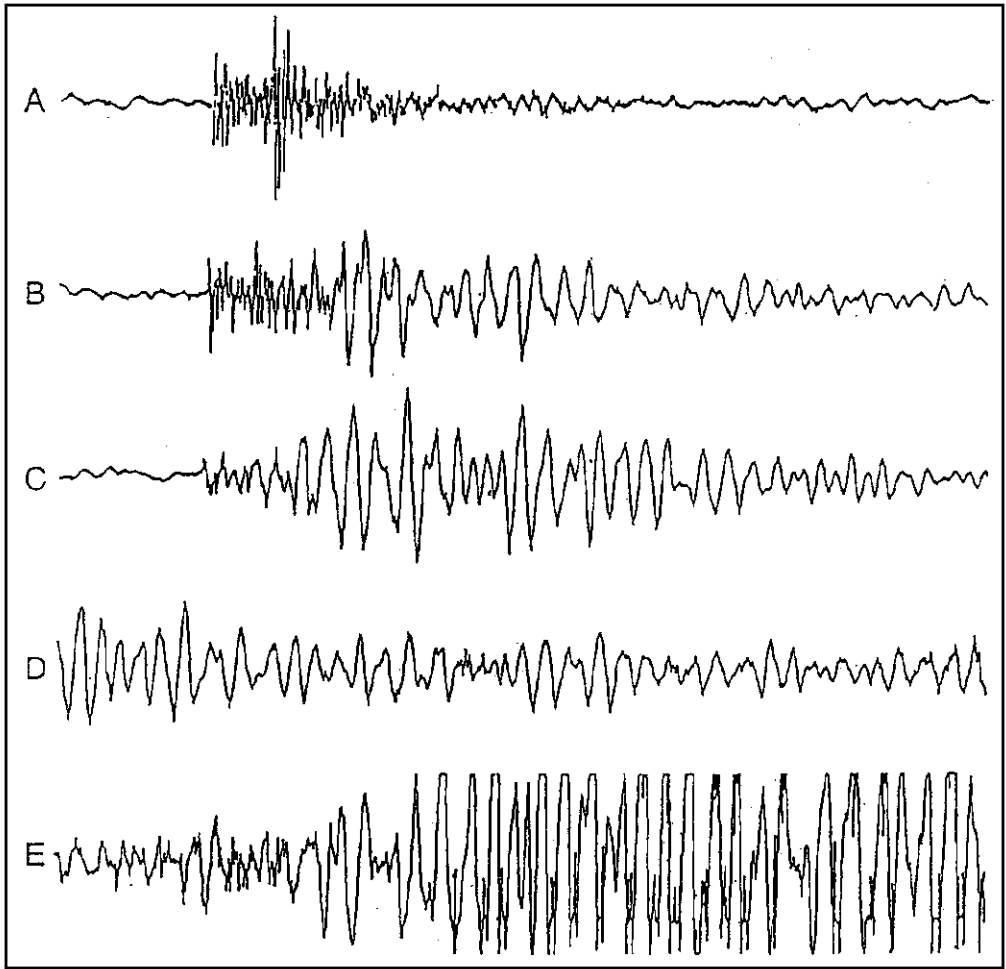


Рис. 1. Примеры записей вулканических землетрясений А-типа (А), гибридных землетрясений (В), длиннопериодных землетрясений В-типа (С), вулканического дрожания (D) и землетрясения, вызванного взрывом в кратере влк. Редаубт (Е). Все записи сделаны на влк. Редаубт (Аляска, США) во время извержения в декабре 1989 г. [9]

в магматических расплавах, временные характеристики роев вулкано-тектонических землетрясений зависят от развития этих процессов, и такие рои могут продолжаться месяцы, а иногда и годы.

Основным признаком для прогноза вулканической активности в настоящее время является нарастание количества и интенсивности вулкано-тектонических землетрясений во времени, которое должно отражать активизацию магмы внутри вулканической постройки. Но в некоторых случаях интенсивные рои вулкано-тектонических землетрясений с нарастанием активности во времени не были предвестниками извержений вулканов, поэтому простая оценка развития интенсивности роев во времени не дает точного прогноза развития вулканических процессов. Рост количества и энергии вулкано-тектонических землетрясений во времени может продолжаться после прекращения активизации магмы, потому что передача напряжений в твердую среду обладает значительной инерцией и зависит от конкретной тектонической ситуации для каждого вулкана. Более надежным может быть метод прямого контроля перемещения магмы в вулканической постройке. Для этого можно использовать определение точного положения гипоцентров низкочастотных землетрясений, возникновение которых происходит в объемах магматических расплавов.

Но особенности волнового состава низкочастотных землетрясений (отсутствие четкого вступления продольных и поперечных волн) не позволяют определять точно их координаты традиционными методами, хотя развитие их интенсивности во времени является надежным показателем активизации вулканических процессов.

Таким образом, активизацию вулканов можно определять по временным характеристикам роев низкочастотных землетрясений, но оценка времени начала возможного извержения во всех случаях затруднена, так как перемещение гипоцентров низкочастотных землетрясений не может быть получено с достаточной точностью. С этих позиций особенности гибридных землетрясений могут быть использованы специальным образом. По современным представлениям гибридные землетрясения состоят из двух различных по природе событий: во-первых, обычного вулкано-тектонического землетрясения, вызванного возникновением разрывных нарушений из-за критических напряжений, созданных избыточным давлением в магме, и, во-вторых, низкочастотных объемных колебаний в газонасыщенной магме. Для точного определения положения в пространстве гипоцентров таких землетрясений достаточно знать координаты высокочастотной части гибридного землетрясения, которая может быть выделена с помощью фильтрации. Следовательно, определение гипоцентров высокочастотных компонент гибридных землетрясений может дать надежный метод контроля перемещения магматических расплавов в пространстве.

Во время сейсмической активизации влк. Корякский (Камчатка, Россия) в 1994 г. прогноз развития вулканической активности был сделан на основании анализа высокочастотных компонент гибридных землетрясений [1]. По перемещению гипоцентров в пространстве и временным характеристикам развития гибридных землетрясений была сделана достоверная оценка развития вулканической активности влк. Корякский. На рис. 2 приведены графики развития во времени общего количества вулканических землетрясений, их суммарной энергии и распределение землетрясений во времени по энергии и по глубине положения гипоцентров. При общей тенденции перемещения гипоцентров гибридных землетрясений к поверхности их количество в процессе развития роя постоянно уменьшалось, в то время как общее количество вулканических землетрясений в рое возрастало. Это было связано со снижением активности магматического расплава, хотя по увеличению количества вулкано-тектонических землетрясений можно было предполагать рост вулканической активности и, соответственно, прогнозировать извержение. Таким образом, для оценки развития вулканических процессов при активизации магмы на глубине наиболее информативными являются гибридные землетрясения, которые непосредственно связаны с процессами в магматических расплавах, а не обычные вулкано-тектонические землетрясения, которые отражают общий уровень накопленных напряжений, вызванных внедрением магмы.

Сейсмические сигналы от взрывов в кратере и вулканическое дрожание. Если вулкано-тектонические и низкочастотные землетрясения в основном предшествуют извержениям вулканов и могут быть использованы для прогноза начала извержений, то взрывные землетрясения и вулканическое дрожание всегда сопровождают извержения вулканов и могут служить для контроля развития извержения, определения соотношения взрывной доли извержения к эффузивной (фактор взрывности) и получения дополнительной информации о физико-механических свойствах магматических расплавов. Спектральный состав взрывных землетрясений и вулканического дрожания во всех случаях одинаков [2, 3, 6, 11], что указывает на одинаковую природу их происхождения. Взрывные землетрясения и вулканическое дрожание связаны с процессами выделения свободной газовой фазы при извержениях вулканов. Если взрывы отражают периодическое газовыделение, то вулканическое дрожание происходит всегда при непрерывных газопепловых и/или лавовых потоках. В том и другом случае энергия сейсмических сигналов, возникающих в процессе дегазации магмы, связана с объемным количеством выделенного в атмосферу газа. Отличительной особенностью взрывных землетрясений является присутствие акустических

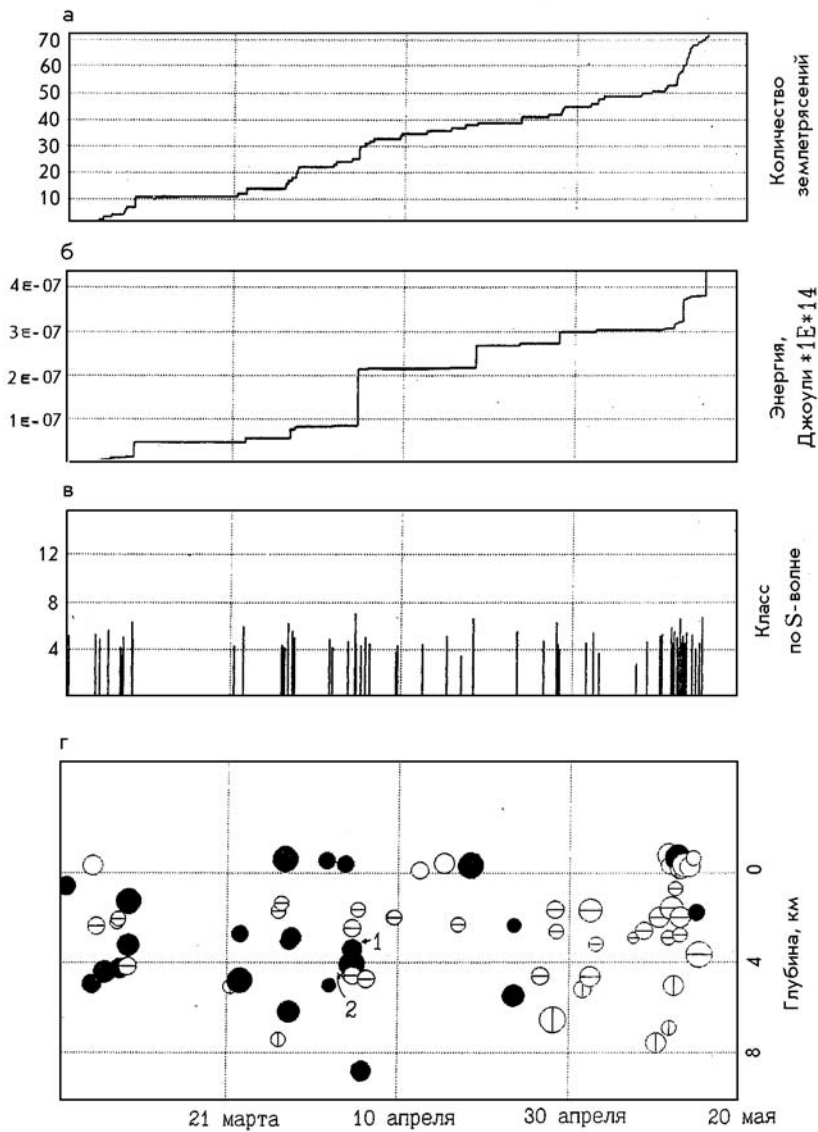


Рис. 2. Характеристики роя вулканических землетрясений для влк. Корякский в 1994 г.: а) суммарное число событий, б) накопленная суммарная энергия землетрясений; распределение землетрясений во времени по энергии (в), глубине (г). Заполненными кружками отмечены гибридные землетрясения

волн, вызванных выделением газа в атмосферу. Как было показано [10, 11], отношение энергий акустических и сейсмических волн зависит от относительного содержания газовой компоненты в магматическом расплаве или, что то же, от фактора эксплозивности.

В любом случае ход изменения величины сейсмической энергии во времени отражает вариации интенсивности извержения, что связано с поступлением энергии в вулканическую систему. Долговременные вариации интенсивности вулканического дрожания и характер их изменения во времени позволяют определить, на какой стадии находится извержение, и провести оценку развития извержения в будущем. Такой прогноз развития извержений по сейсмическим данным проводился в последнее время для многих вулканов [5]. Так, во время извержения влк. Пинатубо (Филиппины) в 1991 г. сейсмические данные

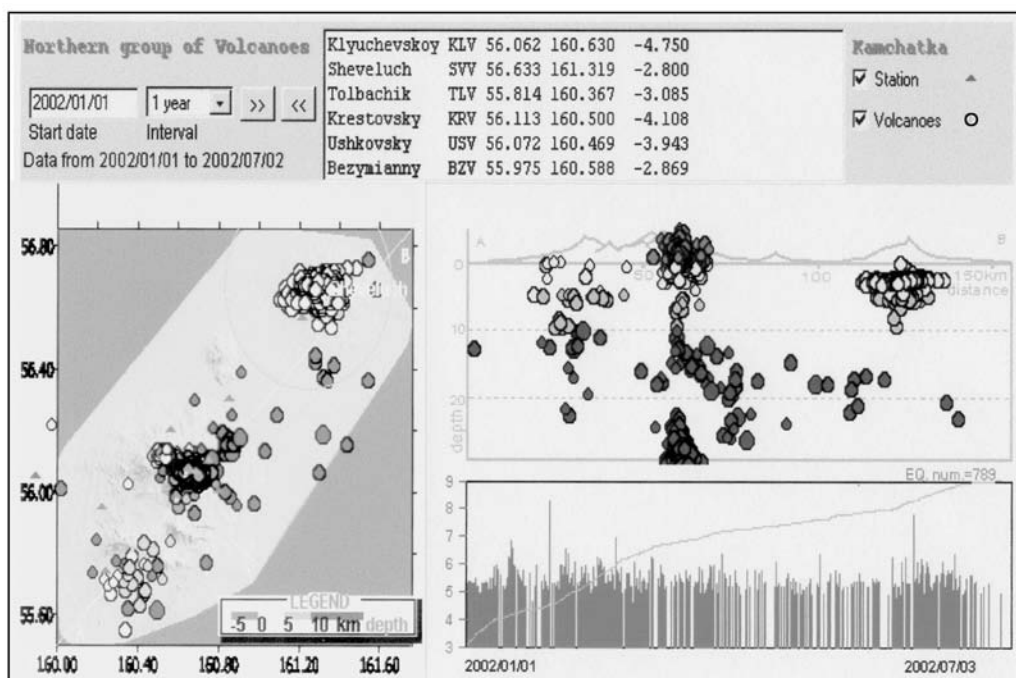


Рис. 3. Сейсмичность Северной группы вулканов. Слева показано положение эпицентров землетрясений, справа – распределение гипоцентров землетрясений по глубине (вверху) и изменение количества землетрясений во времени (внизу). Треугольниками отмечено положение сейсмических станций

дали возможность предвидеть усиление его интенсивности и провести своевременную эвакуацию населения [8]. Вулканическое дрожание в настоящее время является наиболее удобным и независимым параметром для контроля и оценки развития извержений вулканов.

Контроль состояния вулканов на Камчатке по сейсмическим данным. В настоящее время на Камчатке существуют две плотные сейсмические сети на вулканах: а) из 12 сейсмических станций на Северной группе вулканов (активные вулканы Шивелуч, Ключевской, Ушковский, Безымянный и Толбачик), б) из 5 сейсмических станций на Авачинско-Коряжской группе вулканов (активные вулканы Авачинский и Коряжский).

Наблюдения на этих станциях позволяют определять сейсмичность вулканов почти в реальном времени, так что изменение активности вулканов непрерывно контролируется. Наблюдения, обработка данных и анализ состояния вулканов проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН. На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты анализа сейсмичности на Северной и Авачинско-Коряжской группах вулканов. Показаны положение эпицентров и распределение гипоцентров землетрясений по глубине, а также изменения количества землетрясений во времени. Непрерывный анализ сейсмичности на этих наиболее активных вулканах позволяет прогнозировать извержения и надежно контролировать процессы развития извержений.

Заключение

К настоящему времени по результатам многочисленных исследований сейсмических сигналов на активных вулканах выделяются две различные группы сигналов:

высокочастотные (8–12 Гц) вулcano-тектонические землетрясения, предшествующие извержениям и характеризующие тектонические процессы в вулканических постройках.

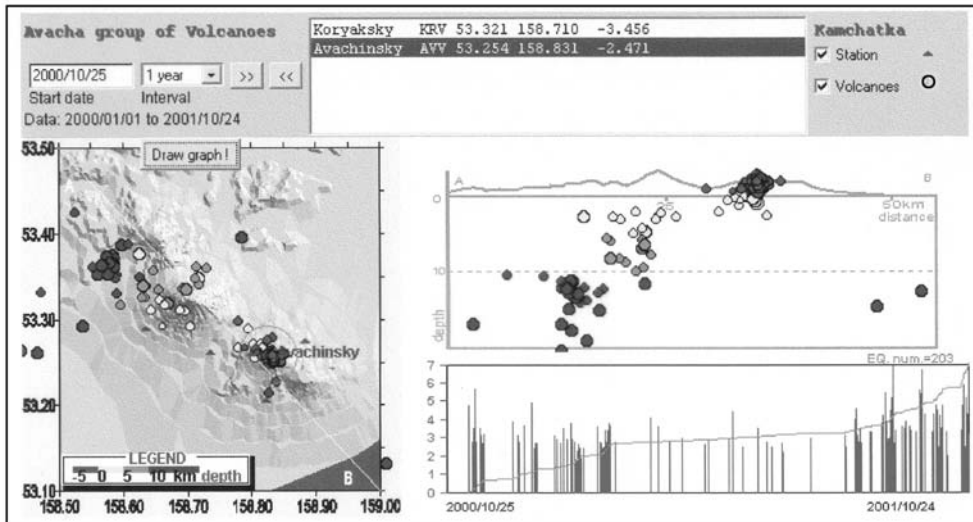


Рис. 4. Сейсмичность Авачинской группы вулканов. Обозначения такие же, как и на рис. 3

Причиной этих землетрясений является избыточное давление в магматических расплавах, которое создает напряжения в окружающей среде;

низкочастотные (1–5 Гц) сейсмические сигналы, связанные с процессами в газонасыщенных магматических расплавах. К таким сигналам относятся низкочастотные вулканические землетрясения, вулканические взрывы в активных кратерах в процессе извержения и вулканическое дрожание.

Кроме этого, в последнее время на многих вулканах были выделены так называемые гибридные землетрясения, которые являются суперпозицией вулкано-тектонических и низкочастотных землетрясений.

Таким образом, все сигналы, существующие на активных вулканах можно разделить по природе происхождения, а не по форме записи и принадлежности к какому-либо типу активности вулканов.

Первая группа – это вулкано-тектонические землетрясения, которые происходят под вулканами на глубинах до 20–25 км и вызваны реализацией напряжений в твердой среде.

Вторая группа – это низкочастотные сейсмические сигналы, в состав которых входят низкочастотные землетрясения, сейсмические сигналы от взрывов в кратере и вулканическое дрожание, их происхождение связано с процессами дегазации в магме.

В настоящее время сейсмические наблюдения на активных вулканах являются надежным методом прогнозирования и слежения за извержениями. Плотные системы сейсмических наблюдений позволяют следить за развитием сейсмической активности как в пространстве, так и во времени. За последние годы на Камчатке были предсказаны практически все извержения вулканов Северной группы (Безымянный, Шивелуч и Ключевской), а также активизация влк. Авачинский в 2001 г. Сейсмические наблюдения совместно с анализом спутниковых снимков являются надежным методом прогноза извержений и активизации вулканов на Камчатке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеев Е.И., Сеньюков С.Л. Сейсмическая активизация Корякского вулкана: гибридные землетрясения и их применение для прогноза вулканической активности // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 112-126.

2. Ferrazzini V., Aki K., Chouet B. Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas piston events observed by near-source array // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 6199-6209.
3. McNutt S.R. Volcanic tremor // *Encyclopedia of Earth System Science*. San Diego: Acad. Press, Inc., 1992. Vol. 4. P. 417-425.
4. Minakami T. Fundamental research for prediction of volcanic eruption. Pt I // *Bull. Earthquake Res. Inst.* 1960. Vol. 38. P. 497-544.
5. Mori J. Volcano seismology hazard assessment // *Rev. Geophys. Supplement*. 1995. P. 263-267.
6. Nishimura Y., Miyamachi H., Ueki S., Nishimura T., Shimizu H., Ohmi S., Okada H. Joint seismometrical observations by the National University Team during the 1988–1989 eruptive activity of Mt. Tokachi, Hokkaido // *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.* 1990. Vol. 35. P. 163-173.
7. Omori F. The Usu-San eruption and the earthquake and elevation phenomena // *Bull. Imp. Earthquake Investigation Committee, Tokyo*. 1911. Vol. 5, N 1. P. 1-38.
8. Pinatubo Volcano Observatory Team // *EOS*. 1991. Vol. 72. P. 545-555.
9. Power J.A., Lahr J.C., Page R.A., Chouet B.A., Stephens C.D., Harlow D.H., Murray T.L., Davies J.N.. Seismic evolution of the 1989–1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1994. Vol. 62. P. 69-94.
10. Ripepe M., Braun T. Air-wave phases in strombolian explosion-quake seismograms: a possible indicator for the magma level? // *Acta Vulcanologica*. 1994. Vol. 5. P. 201-206.
11. Ripepe M., Rossi M., Saccorotti G. Image processing of explosive activity at Stromboli // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1993. Vol. 54. P. 335-351.

Новые книги

КАРПОВ Г.А., ИЛЬИН В.А. Онтогенез гидротермального процесса (происхождение и развитие).

KARPOV G.A., IL'YIN V.A. Ontogeny of hydrothermal process (origin and evolution).

Владивосток: Дальнаука, 2006. – 159 с. – ISBN 5-8044-0614-0.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуштина, 9. E-mail: volcan@ksnet.ru

В книге рассматриваются вопросы, связанные с порядком реализации геологических процессов с участием воды в ходе эволюции земных оболочек. На базе несколько модернизированной гипотезы о холодном образовании Земли аргументируется представление о первичности, глобальном характере и непрерывности (с периодической активизацией) гидротермального процесса, следы деятельности которого отражены, но нередко затушены в проявлениях тектоники, метаморфизма, магматизма, вулканизма и рудообразования. На этой основе по-новому трактуются структурно-тектонические и геохимические особенности гидротермальных систем областей современной активизации гидротермального процесса.

Для геологов и специалистов, исследующих гидротермальный процесс.

Ил. 30, табл. 16, библи. 284.

The authors of the book consider the questions concerning the order of realization of geologic processes with participation of water in the course of the Earth's envelopes evolution. Based upon somewhat updated hypothesis of the cold Earth's formation, notion is argued on the primacy, global character and continuity (with periodic activation) of hydrothermal process, whose traces are reflected, though often faded, in manifestations of tectonics, metamorphism, magmatism, volcanism and mineralization. This forms the basis for the new interpretation of structural-tectonic and geochemical peculiarities of hydrothermal systems in the areas of recent activation of hydrothermal process.

For geologists and specialists studying hydrothermal process.

Ill. 30, tabl. 16, bibl. 284.