

УДК 372.31.15.25

**ЛОКАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ АНОМАЛИИ В
РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫХ СРЕДАХ¹***Собисевич Л. Е.², Лиходеев Д. В.³***THERMAL AND RESONANT LOCAL ANOMALIES IN FAULT AND BLOCK MEDIA**

Sobisevich L. E., Likhodeev D. V.

By the example of the Elbrus volcanic center, local thermal and resonant anomalies in the complex fault and block medium of the volcanic structure are considered. Experimental data on thermal fields and some thermal anomalies have been presented for the area in the vicinity of the volcanic dome and the anomalies discovered spatially related to near-surface magmatic structures.

Если рассматривать некоторый выделенный элемент геологической среды в районе вулканической постройки (породный массив с неоднородностями, элементы магматических структур или магматическую камеру) как упругое тело, то все проблемы описания такого образования связаны в первую очередь с определением упругих характеристик и действующих сил (внешних и внутренних) при данных давлениях и температурах. Однако на практике геофизики и механики всегда имеют дело с заведомо неоднородными структурами, что существенно усложняет задачу, т. к. отдельные элементы анализируемой разломно-блоковой структуры даже в случае осреднения не дают полного представления об упругих характеристиках всего массива [1, 2]. Оставляя без внимания многие принципиальные вопросы, связанные с решением проблемы осреднения, рассмотрим задачу, когда в геологической среде, составляющей вулканическую постройку, изучаются структуры резонансного типа (ограниченные флюидонасыщенные слои, магматические каналы, камеры и т. п.). В этом случае зависимость деформаций от напряжений определяется также и нелинейными особенностями геологической среды в окрестности изучаемых образований. Наличие подобного рода структур неоднократно отмеча-

лось при экспериментальном изучении условий распространения сейсмических сигналов в реальной геологической среде [3, 4].

На рис. 1 приведена принципиальная схема системы магматических каналов и очагов для вулкана Эльбрус [5]. Именно эти структуры, являющиеся своеобразным «сердцем» вулкана, и определяют его «жизненные» циклы. Экспериментальные наблюдения последних лет, проведенные в районе Эльбрусского вулканического центра, дают основания отнести магматический очаг, магматическую камеру, коровые и другие каналы к геологическим структурам резонансного типа, определяющим механизмы подготовки и развития катастрофического извержения [4, 6, 7].

Согласно современным представлениям размеры магматических очагов вулканов центрального типа, к которым относится и вулкан Эльбрус, должны трансформироваться весьма медленно. Это определяется в первую очередь изменением во времени расхода мантийной магмы в течение жизни вулканического центра [8] и разрушением вмещающих пород.

Все изложенное выше относится не только к вулканам. Наблюдения, выполненные в различных регионах, подтверждают, что геологическая среда носит в себе следы разрушения на разных масштабных уровнях: от трещин на

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (05-05-64154-а, 06-05-64048-а, 06-05-79024-к), Фонда содействия отечественной науке и программы №16 фундаментальных исследований Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: Природные катастрофы», проекты: №№ 1.4, 2.7 и 7.5.

²Собисевич Леонид Евгеньевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории «Прикладная геофизика и вулканология» Института физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта РАН.

³Лиходеев Дмитрий Владимирович, аспирант лаборатории «Прикладная геофизика и вулканология» Института физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта РАН.

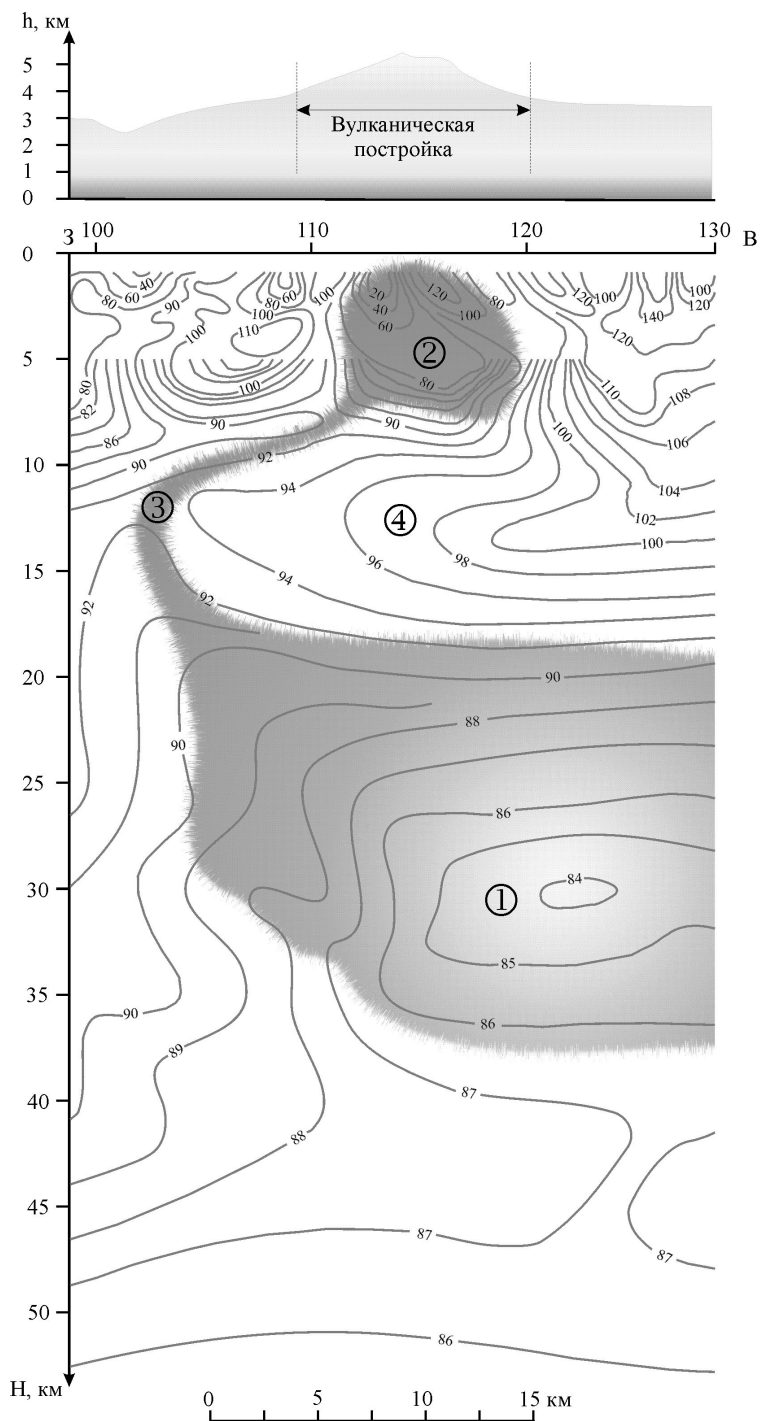


Рис. 1. Вертикальный разрез поля тектонической раздробленности коры, проходящий через вулкан Эльбрус [по данным Нечаев, Собисевич, 2001]. 1 — область, рассматриваемая в качестве потенциального материнского магматического очага, служившего в прошлом поставщиком магмы (для заполнения вулканических камер) и палеоизвержений; 2 — область верхней части коры, отождествляемая с одной из вулканических камер; 3 — один из потенциально возможных путей перетока первичной магмы; 4 — изолинии поля тектонической раздробленности. Над профилем дана привязка вулканической постройки к условной системе координат

границах зерен минералов до многокилометровых разломов, разделяющих отдельные блоки земной коры. Возникнув, трещины могут функционировать как резонансные структуры, обеспечивая перераспределение энергетических потоков в массиве и большую подвижность отдельных разломно-блоковых образований. Эти трещиноватые структуры являются генераторами волновых процессов, в числе которых сейсмические, деформационные, инфразвуковые и электромагнитные поля КНЧ диапазона [3, 4, 9, 10].

Более глубокий анализ показывает, что трещины, разломы и другие структурные неоднородности, наблюдаемые в районах вулканических построек — это не просто следы разрушения, а способ динамического существования геофизической среды, как при малых, так и при больших (необратимых) деформациях. С этой точки зрения выделенный по характерным признакам элемент вулканической постройки приобретает понятный физический смысл, являясь характеристикой состояния изучаемой геологической системы.

Итак, геологическая среда в окрестности вулканической постройки и ее отдельные элементы всегда находятся в состоянии движения. Это определяет класс задач геомеханики, связанных с анализом поведения отдельных структур резонансного типа и их ансамблей, которые являются причиной появления переходных нелинейных процессов, переводящих систему из одного стационарного состояния в другое. В ряде случаев эти процессы могут усиливаться за счет механизмов синхронизации взаимодействующих магматических структур, что и приводит к развитию катастрофических процессов [4, 10].

Говоря о резонансных особенностях магматических структур вулканов, необходимо отметить, что образование магм в области их первичного выплавления может быть вызвано разными причинами: разогревом при притоке энергии, плавлением вещества из-за снижения давления его при подъеме в астеносфере и подтоком летучих, экзотермическими реакциями и другими геофизическими процессами. При этом образование магм ведет к резкому снижению вязкости вещества в области выплавления и, как правило, к уменьшению его плотности, что в свою очередь приводит к перестройке внутренней структуры магматических образований и появлению отдельностей резонансного типа, которые четко опре-

деляются в геофизических полях (гравитационном, сейсмическом, деформационном).

В любом случае, находится ли протяженная область первичного выплавления около сейсмофокального слоя на значительных глубинах (100–200 км для вулканов Камчатки) или же в средней и наиболее разогретой области астеносферы на меньших глубинах, наблюдается подъем магм сквозь астеносферу по механизму гравитационной конвекции. Вопрос о том, каким образом происходит такой подъем, во многом остается пока неясным [8].

В таблице, заимствованной из работы [8], приведены данные, которые показывают, каких максимальных размеров могут достигать периферические очаги вулканов разного состава при $T_1 - T_2 = 100\text{--}460^\circ\text{C}$, $T_1 = 800\text{--}1300^\circ\text{C}$ и $\Omega = 30 \text{ км}^3$ (объем изверженных продуктов).

Если $T_1 < 1300^\circ\text{C}$, то для вулканов, извергающих дацитовые лавы, $a < 3$ км, для вулканов, извергающих андезитовые лавы, $a < 2$ км, для вулканов, извергающих базальтовые лавы, $a < 1,5$ км. Если же $T_1 = 1200^\circ\text{C}$, то для «дацитовых» вулканов $a < 2,5$ км, для «андезитовых» $a < 2$ км и для «базальтовых» $a < 1$ км.

Приведенные данные указывают на то, что в районе вулканической постройки могут иметь место долгоживущие низкочастотные резонансные магматические структуры. Они возникают в результате образования питающих каналов, роста коровых магматических очагов путем плавления вмещающих пород, при дифференциации и эволюции магм, отмирании питающих систем вулканов в процессе угасания их деятельности.

При исследовании магматических структур вулкана Эльбрус впервые удалось наблюдать, как магматическая камера и магматический очаг, расположенные в слоистом пространстве, каким представляется вулканическая постройка, порождают локальные резонансные эффекты. Собственные частоты таких образований были зафиксированы экспериментальными методами (рис. 2, 3). Установлено, что спектр собственных колебаний магматических структур определяется в первую очередь их размером, конфигурацией и взаимным расположением в геологической среде вулканической постройки [6, 10, 11].

Подобно тому, как масса магматической камеры или магматического очага является интегральным параметром вулканической структуры и определяется распределением

Зависимость разности температур $T_1 - T_2$ в магматических очагах от их радиуса a и температура стенок T_2 для периферических очагов средних стратовулканов Камчатки [Федотов, Мелекесцев и др., 1991]

Состав, $T_2^{\circ}\text{C}$	Радиус магматического очага, км.					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Дацит, 700°	99	192	312	460	(638)	(843)
Андезит, 900°	128	247	(403)	(595)	(824)	(1089)
Базальт, 1100°	163	(314)	(510)	(754)	(1043)	(1380)

Примечание. В скобки взяты нереально большие значения $(T_1 - T_2)^{\circ}\text{C}$, при которых входная температура магмы $T_1 > 1300^{\circ}\text{C}$. Очаг имеет форму линзы. Объем $\Omega = 30 \text{ км}^3$, $t = 3 \cdot 10^4$ лет.

плотности в недрах вулкана, собственные частоты (собственные периоды колебаний) магматических структур также можно отнести к интегральным параметрам. Однако они зависят также и от распределения упругих параметров: модуля сжатия, модуля сдвига, наличия расплава и растворенных летучих, а значит и от тонкой структуры гравитационного поля в недрах вулкана. Есть все основания полагать, что знание указанных выше параметров с учетом наличия экспериментальных наблюдений за их поведением во времени позволит в будущем прогнозировать начало возможного извержения.

Выполненные теоретические исследования и данные наблюдений наведенных сейсмических полей в районе Эльбрусского вулканического центра показывают, что изучение волновых процессов, обусловленных «жизнью» вулканических структур, и их выделение на фоне колебаний Земли имеет важное научное значение. Эти данные позволяют судить о развитии масштабных перестроек в неоднородной геологической среде вулканической постройки.

В свете сказанного представляют известный интерес результаты, полученные при анализе волновых процессов наведенных в теле вулканической постройки Эльбруса землетрясением в районе острова Ява (землетрясение произошло 8 августа в 17:04:56). Глубина очага этого сейсмического события — 300,0 км, что позволяет выделить его из числа других землетрясений, зафиксированных сейсмическими станциями в районе Эльбрусского вулканического центра. Это весьма редкое сейсмическое событие; его магнитуда по поверхностным волнам составила 6,8 (см. рис. 4–5).

На полученных записях отчетливо выражены мощные первые вступления продольных (Р) и поперечных (S) волновых структур, а все

поверхностные волны имеют малую амплитуду. Однако и в их структуре просматриваются резонансные отклики магматических отдельностей, зафиксированных ранее в районе Эльбрусского вулканического центра.

Наклономерная запись этого события по каналу СЮ в Лаборатории № 1 (Эльбрусский вулканический центр), расположенной в 30 км от вулканической постройки, сопоставление с данными Лаборатории № 3, расположенной на расстоянии 80 км от вулканической постройки в городе Нальчике, показывают, что здесь снизилась амплитуда первых вступлений и произошла частотная трансформация всего спектра наведенного волнового процесса (рис. 4).

Анализ полученных спектрограмм показывает, что в составе наведенного волнового процесса присутствуют высокоамплитудные как низкочастотные, так и среднечастотные (вплоть до 1,0 Гц) волновые составляющие. Все они отчетливо выражены в спектре результирующего сигнала.

Таким образом, любой волновой процесс, наблюдаемый в окрестности вулкана, при детальном анализе следует раскладывать по собственным колебаниям, определяя, с каким весом входят сюда различные колебания, отражающие динамические особенности магматического очага и магматической камеры. При этом необходимо всегда помнить, вулканический очаг — это сложное «живущее» нелинейное образование, внутреннее строение которого может изменяться. Такие параметры как объем и состав летучих, температура магм и их состав, резонансные особенности, другие параметры претерпевают серьезные изменения в процессе подготовки извержения и могут служить предвестниками будущего извержения (его силы, времени и места).

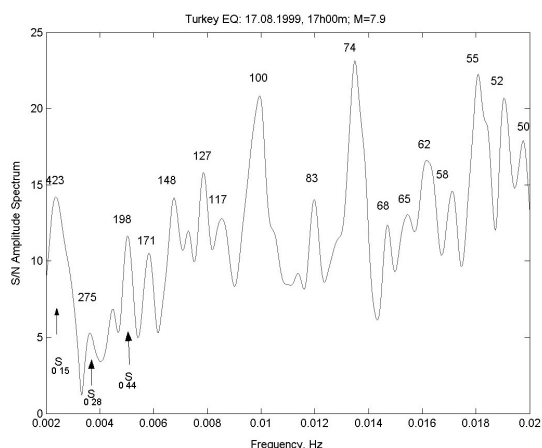


Рис. 2. Зависимость интенсивности собственных колебаний неоднородных структур вулкана Эльбрус от частоты по данным регистрации землетрясения в Турции. Указаны периоды отдельных мод (в секундах) [6, 7]

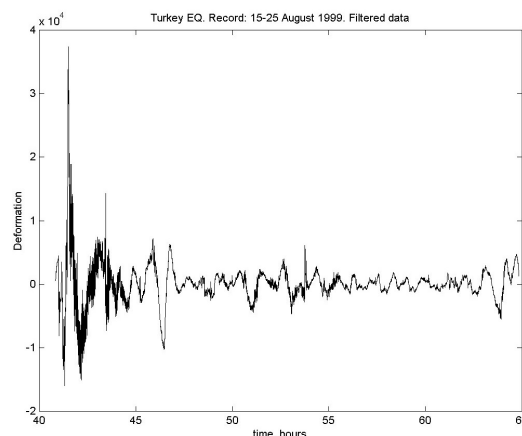


Рис. 3. Амплитудно-временная характеристика резонансного отклика геофизической среды на внешнее воздействие, обусловленное землетрясением в Турции [6, 7]

В процессе полевых работ 2006–2007 гг. в районе Эльбрусского вулканического центра установлены следующие важные факты, свидетельствующие о возможной активизации вулканических процессов на глубине (в магматических камерах и очаге).

Еще в сентябре 2002 г. под восточным вершинным кратером Эльбруса, на площади около 150×250 м произошло быстрое таяние снежно-ледового покрова. В результате обнажился голоценовый лавовый поток в виде черного пятна. В процессе полевых работ в июле 2006 г. было установлено, что площадь этого черного пятна на обнаруженной тепловой аномалии увеличилась вдвое. Кроме того, непосредственно под восточной вершиной Эльбруса, на высоте около 5400 м появились еще два новых пятна (со стороны рек Баскан и Малка). Появление пятен также обусловлено быстрым таянием льда в пределах тепловых аномалий, в результате чего продолжилось обнажение голоценовых лавовых потоков.

Наблюдаемые аномальные явления, развивающиеся на таких высотах (4500–5000 м), обусловлены, скорее всего, постоянными повышенными температурами поверхности на отдельных участках вулканической постройки. При этом одну из основных причин повышения температур в отдельных изученных районах Эльбрусского вулканического центра естественно связывать с наблюдающейся в этом регионе повышенной флюидной активностью. В подтверждение сказанного следу-

ет привести и тот факт, что в западной части аномалии, расположенной в районе восточной вершины, происходит интенсивное отступление языка ледника Кюкюртли. Здесь альпинисты неоднократно отмечали запах сернистого газа [11].

В августе 2007 года комплексная геофизическая экспедиция Института физики Земли РАН, Кабардино-Балкарского и Кубанского государственных университетов Министерства образования и науки РФ, совершила 4 восхождения на обе вершины вулкана Эльбрус и к озеру у подножья ледника Малый Азау.

Уже первое восхождение на восточную и западную вершину убедили членов экспедиции в том, что в этом регионе на поверхности вулканической постройки развиваются аномальные тепловые процессы. На восточной вершине вулкана была обнаружена фумарола.

Исследования тепловых полей, проведенные в районе восточной вершины вулкана, показали, что температура поверхностного слоя породы на дне фумаролы составила в момент посещения 6°C . Сотрудники экспедиции ощущали выход флюидов (паров и других газов), затрудняющих пребывание непосредственно в районе фумаролы. Других фумарол на восточной вершине в период посещения обнаружено не было.

Измерение температур на поверхности вулканической постройки производилось при помощи миниатюрных термографов High Capacity Temperature Loggers iButton с кор-

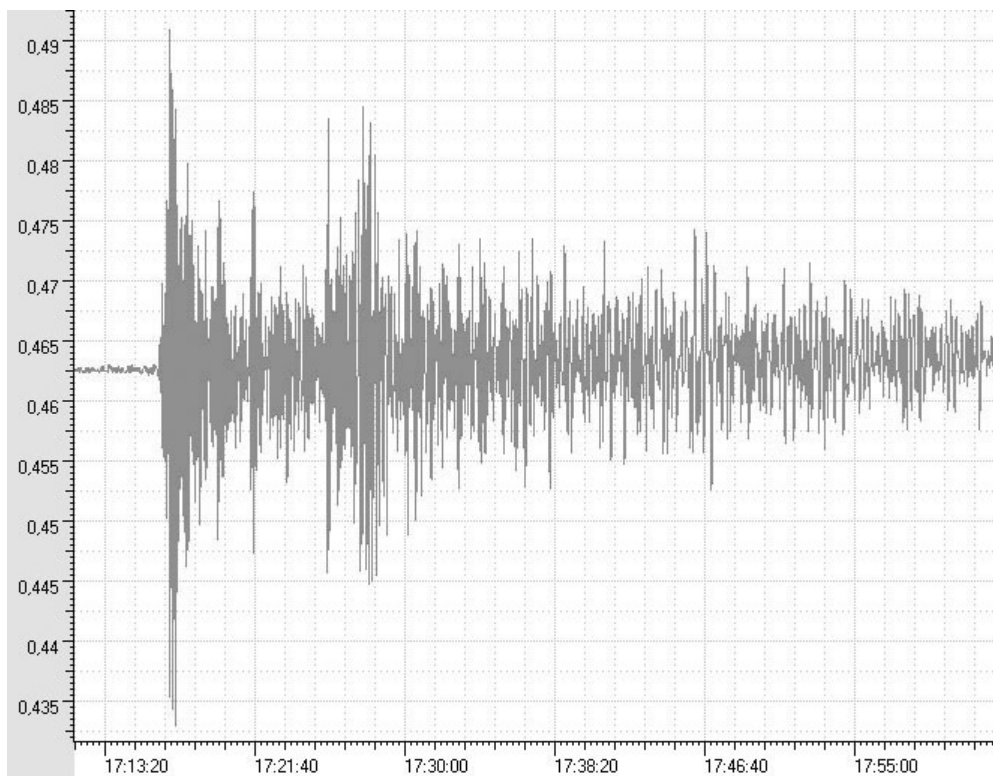


Рис. 4. Наклономерная запись землетрясения в районе острова Ява (Лаборатория № 3, Нальчик, канал СЮ)

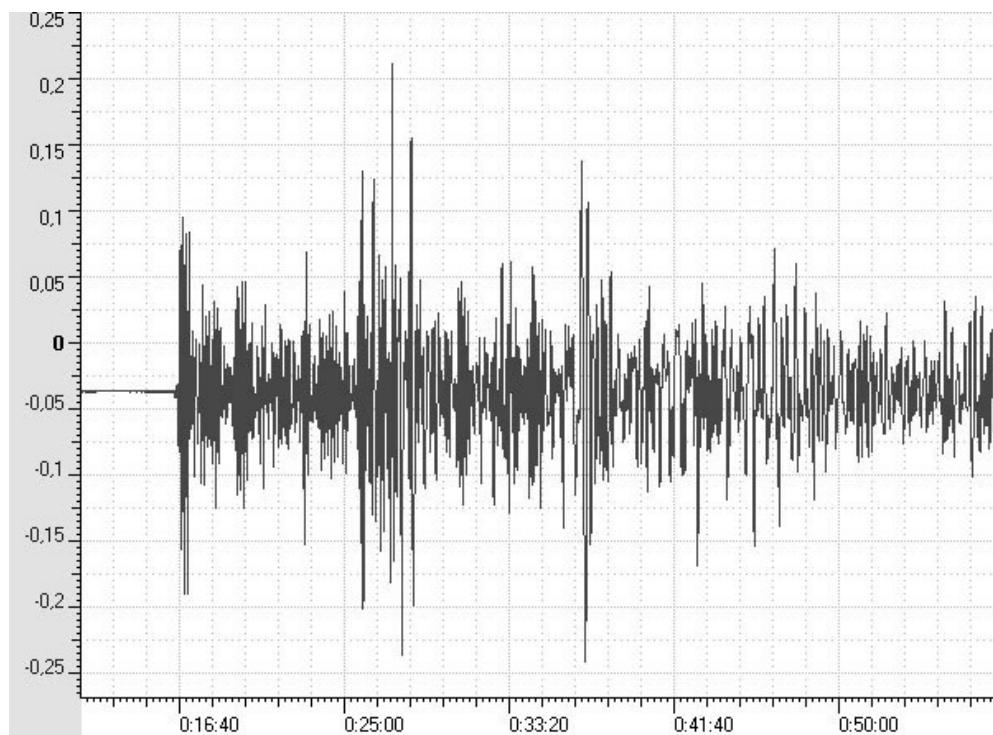


Рис. 5. Наклономерная запись землетрясения в районе острова Ява и его спектр (Лаборатория № 1, Баксан, СЮ)

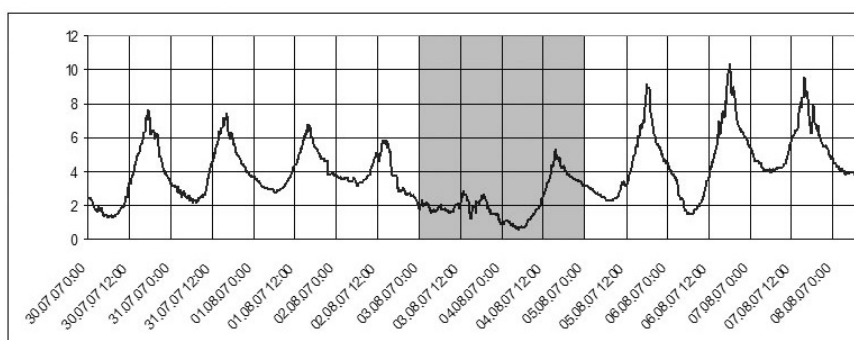


Рис. 6. Результаты измерений температуры датчиком № 1 на высоте 3828 м (район хижины гляциологов). Измерения проведены в период с 30 июля по 8 августа 2007 г.

поративным обозначением DS1922. Они являются контактными защищенными регистраторами температуры, относящимися к семейству iBDL. Каждый термограф представляет собой полностью защищенный одноканальный электронный самописец (далее «логгер»).

В процессе восхождения «логгеры» устанавливались (по мере подъема сотрудников экспедиции на вершину) в местах, где имелись выходы коренных пород (лавовых потоков и других геологических образований). Во всех случаях, когда представлялось возможным, «логгеры» устанавливались в расщелины на теневой стороне таким образом, чтобы избежать несанкционированного доступа альпинистов, совершающих постоянные восхождения на Восточную и Западную вершины Эльбруса.

Пример записи поверхностной температуры, зафиксированной на вулканической постройке «логгером» № 1 (высота 3828 м), приведен на рис. 6.

«Логгер» был установлен прямо в выходы лавового потока на высоте не более 15 см от поверхности вулканической постройки; ледник Малый Азау (его срединная часть) находится ниже места установки датчика более чем на 200 м.

Результаты измерений показывают, что в районе установки «логгера» имеется устойчивая температурная аномалия. Температуры здесь изменяются в течение суток от 0,2 до 8,0–10,0°C, а с 3 по 5 августа, когда в районе вулканической постройки сплошная облачность, температура днем и ночью оставалась в пределах 2,0°C.

Таких аномалий было обнаружено в районе Эльбрусского вулканического центра более пяти (рис. 7).

Полученные экспериментальные данные по тепловым полям и отдельным тепловым аномалиям в районе Эльбрусского вулканического центра, пространственно совпадающих с приповерхностными магматическими камерами, выявленными комплексом геолого-геофизических методов, могут служить хорошим индикатором возможности возобновления вулканической активности в изучаемом регионе.

Таким образом, на современном этапе изучения «спящих» вулканов необходимо, прежде всего, уточнить внутреннюю структуру вулканической постройки, аппаратными методами оценить частотные характеристики разломно-блоковых структур, теоретически изучить их резонансные особенности, характерные размеры отдельных структур вулкана (магматической камеры, магматического очага), а затем постараться выделить зафиксированные волновые структуры на фоне собственных колебаний Земли, определить тепловые аномалии и оценить динамику тепловых процессов в районе вулканической постройки.

Располагая набором таких данных можно переходить к анализу условий развития вулканического процесса в регионе.

Литература

1. Бабешко В. А. К расчету параметров высокочастотного резонанса в трехмерном случае // ДАН. 1994. Т. 335. № 1. С. 55–58.
2. Ворович И. И., Бабешко В. А., Пряжина О. Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. 246 с.
3. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 220 с.
4. Собисевич А. Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 354 с.

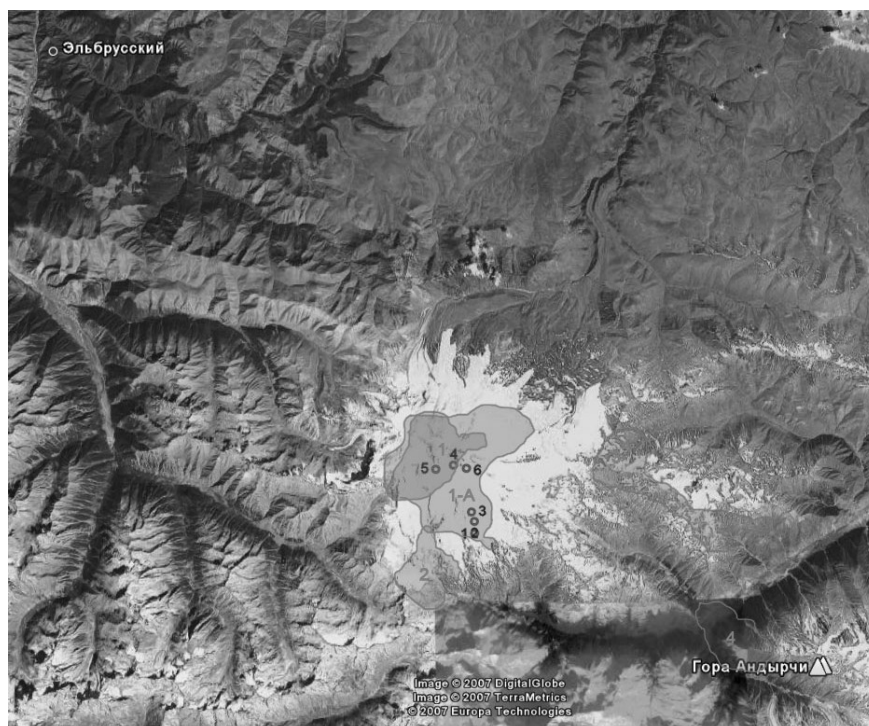


Рис. 7. Карта тепловых аномалий в районе вулканической постройки Эльбруса

5. Богатилов О. А., Нечаев Ю. В., Собисевич А. Л. Космические технологии в изучении геологических структур вулкана Эльбрус // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Материалы XXXVI Тектонического совещания, Москва, 4–7 февраля 2003 г. Т. 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 44–48.
6. Собисевич Л. Е., Милоков В. К., Собисевич А. Л. Механико-математический мониторинг магматических структур вулкана Эльбрус. Сб. научн. тр. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 48–76.
7. Милоков В. К. Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология. № 1. 2006. С. 1–13.
8. Федотов С. А., Мелекесцев И. В. и др. Действующие вулканы Камчатки. Коллективная монография в двух томах. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 302, Т. 2. 412 с.
9. Алексеев А. С., Глинский Б. М., и др. Изучение структуры вибросейсмического поля мощных источников // Проблемы геоакустики: методы и средства. М.: МГУ, 1996. С. 155–160.
10. Рогожин Е. А., Собисевич Л. Е., Нечаев Ю. В. и др. Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа / Под ред. акад. Н. П. Лаверова. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 336 с.
11. Лаверов Н. П., Добрецов Н. Л., Богатилов О. А. и др. Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.

Статья поступила 28 мая 2007 г.

Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

© Собисевич Л. Е., Лиходеев Д. В., 2007