

УДК 551:550.343.534.11

DOI: 10.23671/VNC.2015.3.55277

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ЮЖНОГО СЛОНА ГОРЫ ЭЛЬБРУС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**© 2015 Е.А. Рогожин, д.г.-м.н., проф., А.В. Горбатиков, к.ф.-м.н.,
Н.В. Андреева, М.Ю. Степанова**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, г. Москва,
ул. Б. Грузинская, д.10, стр. 1; e-mail: direction@ifz.ru

В статье приведены результаты комплексных геолого-геофизических исследований южного склона горы Эльбрус и части Баксанского ущелья. В ходе полевых работ выполнено геолого-геоморфологическое картирование в совокупности с исследованием глубинного строения с помощью метода микросейсмического зондирования (ММЗ). Выявлены особенности геолого-геоморфологического строения вулканического сооружения и его глубинная структура. Так, на глубинном разрезе ясно проявились зоны разломов, а также вулканические очаг и камера. Таким образом, подтверждено, что Эльбрус является потенциально активным вулканом.

Ключевые слова: вулкан, сейсмичность, микросейсмы, профиль, разрез, разлом, земная кора.

Введение

В результате проведенных в последние годы геолого-геофизических, геохимических и других наблюдений под Эльбрусом в центральной части земной коры обнаружена обширная магматическая камера [Короновский, 1985; Короновский, Рудаков, 1962; Милановский, Короновский, 1960, 1961]. Поэтому вулкан нельзя считать полностью потухшим, а лишь можно квалифицировать его в качестве временно «спящего» в настоящее время [Богатиков и др., 1998; Милановский, Короновский, 1960 и др.]. То есть, имеются весомые основания ожидать в будущем новой активизации вулканических процессов в пределах Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ).

Методом ММЗ был пройден профиль, опирающийся на 32 точки наблюдения с расстоянием между точками 500 м. Начальная точка профиля лежит в верхней части южного склона г. Эльбрус на высоте 4800 метров над уровнем моря. Конечная точка расположена в Баксанском ущелье возле северной оконечности пос. Байдаево на высоте 1960 метров (рис. 1). Таким образом, в едином разрезе по этому профилю предполагалось изучить, с одной стороны, детали глубинного строения вулканической постройки г. Эльбрус, и, с другой стороны, исследовать структурные особенности недр в области кристаллического массива Большого Кавказа.

Обоснование актуальности исследований

Работа была выполнена в русле исследований по изучению сейсмотектоники древних проявлений вулканизма центрального сектора Большого Кавказа [Лаверов и др., 2005; Рогожин и др., 2005, 2014, 2015; Горбатиков и др., 2015;]. В ходе этих

работ были получены сведения о древних, не известных ранее сильных землетрясениях, произошедших в голоцене на Центральном Кавказе, в окрестностях вулканов Эльбрус и Казбек. Радиоуглеродные датировки палеосейсмодислокаций и определения возраста продуктов древних извержений вулкана показывают, что в последние 7 тысяч лет произошло, как минимум, четыре сильных извержения вулкана Эльбрус и пять землетрясений с магнитудой 6,5–7,0. В целом наблюдается отсутствие синфазности в проявлениях эндогенных процессов вулканизма и сейсмичности, хотя возникновение умеренных по силе землетрясений, связанных с конкретными сильными извержениями, также возможно. Объяснение этой закономерности кроется, по-видимому, в периодической смене обстановки относительного сжатия и растяжения в литосфере вулканической области. Сжатие сопровождается охлаждением коры и верхней мантии. Поэтому накапливаются напряжения, порождающие сильные землетрясения. Растяжение открывает каналы для глубинного вещества, поэтому активность выражается в вулканических извержениях. Напряжений, достаточных для возникновения крупных землетрясений, в прогретой литосфере не накапливается.

Поскольку район Эльбруса в настоящее время попадает в зону глубокого сейсмического затишья, то можно предположить, что здесь сейчас происходит подготовка нового вулканического извержения.

Ранее с целью изучения глубинного строения складчатой системы были пройдены два профиля – Осетинский, пересекающий Большой Кавказ в центральной

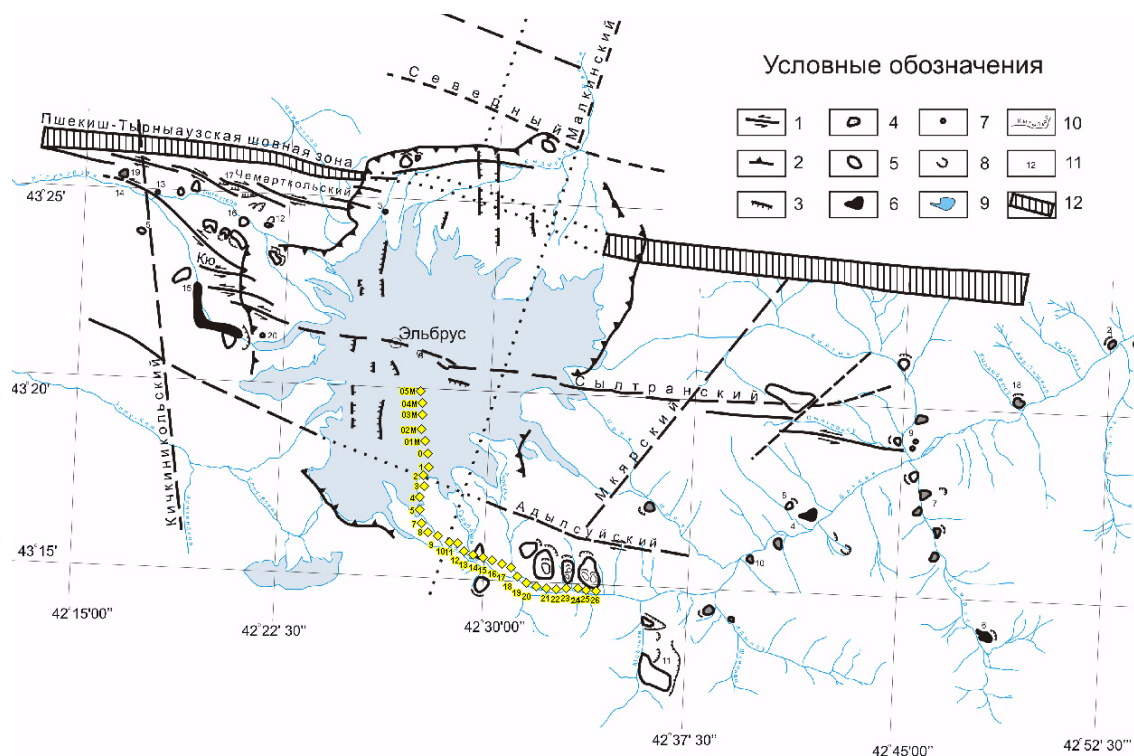


Рис. 1. Разломы и палеосейсмодислокации разных типов в районе Приэльбрусья [Рогожин и др., 2005, с изменениями].

1 – разрывные нарушения и направление смещения по ним; 2 – границы Эльбрусской кальдеры; 3 – первичные сейсмодислокации; 4–6 – вторичные сейсмодислокации: 4 – обвалы, 5 – оползни, 6 – каменно-ледовые лавины; 7 – сеймовибрационные явления; 8 – стенки отрыва вторичных сейсмодислокаций; 9 – ледники; 10 – реки; 11 – точки наблюдения. 12 – Пшекиш-Тырныаузская шовная зона. Желтыми точками с номерами показано положение профиля ММЗ.

части, и Туапсинский, который проходит в Западной части Кавказа. По этим профилям были построены глубинные разрезы. Главной особенностью является наличие крупного низкоскоростного тела в коре под Осетинским профилем, под наиболее высокими центральными частями Большого Кавказа. Именно здесь располагаются центры молодого вулканизма Кельского плато. На Туапсинском профиле, где молодые вулканы отсутствуют, такого тела не наблюдается [Горбатилов и др., 2015, Рогожин и др., 2015]. При этом узкими вертикальными или наклонными карманами, заполненными низкоскоростным веществом, сопровождаются в недрах зоны крупнейших разломов на обоих разрезах.

С целью возможного обнаружения вышеупомянутого тела и его границ, а также зон крупных разломов в Приэльбрусье был заложен Баксанский профиль (рис. 1, 2).

Доисторические проявления вулканизма в Приэльбрусье

В центральном секторе Северного Кавказа отмечались неоднократные извержения вулкана Эльбрус в позднем плейстоцене и голоцене [Богатилов и др., 1998; Короновский, 1985; Милановский, Короновский, 1960, 1961; Короновский, Рудаков, 1962]. Определение возраста с помощью разных методов показало, что в позднем неоплейстоцене и в голоцене извержения имели место 39 ± 5 , 28 ± 3 , 23 ± 2 , ~ 21 , $\sim 9,2-9,3$, $\sim 7,8-8,0$, $\sim 7,2$, $\sim 6,0$, $\sim 4,9$, $\sim 4,6$ тыс. лет назад и в I–II веках н.э. [Богатилов и др., 1998]. Имеются сведения об извержениях, датированных цифрами примерно 1,3 и 1,0 тысячи лет назад. При этом происходили излияния лавовых потоков, выбросы газовых и палящих туч, возникали пепловые облака и катастрофические лахаровые сели. Исследования 2002–2003 гг. позволили подтвердить реальность двух извержений из этого списка с помощью радиоуглеродных датировок палеопочв [Рогожин и др., 2005; Рогожин и др., 2014]. Первое вулканическое событие, произошедшее примерно 6000 лет тому назад, сопровождалось лахаровыми потоками. Отложения одного такого лахара перекрыли палеопочву, датированную временем 6410 ± 100 лет назад (ИГАН 2616)*, на высокой, сорока-пятидесятиметровой надпойменной террасе на левом борту р. Баксан в устье левого притока – р. Кылдыбашсу (рис. 1, точка № 2). Второе вулканическое извержение датируется на основании изучения палеопочвы, перекрытой озерными отложениями на третьей надпойменной террасе р. Кызылкол (в верховьях р. Малка). Этот горизонт имеет возраст 1780 ± 70 лет (ИГАН 2591) и отражает процесс быстрого захоронения богатой гумусом почвы под отложениями подпрудного озера, возникшего в результате запруживания реки Кызылкол в приустьевой части лавовым потоком. Примерно в это же время возник обвал горных масс в верхнем течении р. Баксан (несколько ниже по течению реки у поселка Эльбрус). Погребенный под обвалом горизонт палеопочвы имеет радиоуглеродный возраст 1630 ± 50 лет (ИГАН 2612). Вероятно, этот обвал возник в процессе извержения вулкана и был вызван сопровождающими его сейсмическими подвижками умеренной силы.

Методы исследований

Методика геолого-геоморфологических исследований предполагает совместный анализ материалов, полученных при полевых и камеральных работах: дистанционных зондированиях, сборе данных о формах рельефа, изучении обнажений,

* ИГАН – сокращенное название Института географии РАН, в лаборатории которого проводился радиоуглеродный анализ образцов (цифрами показан № образца).

деформаций террасовых комплексов и поверхностей выравнивания. Эти методические подходы позволяют составить представление о степени новейшей активности разрывных и складчатых дислокаций.

Метод микросейсмического зондирования (ММЗ) [Горбатилов и др., 2008; Горбатилов, Цуканов, 2011] относится к группе пассивных методов сейсморазведки и может применяться при решении геолого-геофизических и структурных задач для различных классов геологических объектов в различных географических и климатических условиях. К настоящему времени накоплен значительный опыт использования ММЗ в научно-исследовательских и промышленных проектах на территории России, стран СНГ и за рубежом [Gorbatikov et al., 2004; Горбатилов и др., 2008; Горбатилов, Цуканов, 2011]. Модель формирования микросейсмического поля в ММЗ не исходит из обязательной слоистости среды. В этой связи считается, что основной вклад в микросейсмическое поле вносится фундаментальными модами Рэлея, а наличие высших мод минимально. Информативным параметром (полезным сигналом) в ММЗ является искажение амплитудного поля при взаимодействии со скоростными неоднородностями. Форма и глубина залегания неоднородности оцениваются исходя из распределения искажения на поверхности и частоте, на которой это искажение проявляется. Согласно численным экспериментам, разрешающая способность метода при восстановлении изображения по горизонтали оценивается как $(0,25-0,3) \lambda$, где λ – эффективная зондирующая длина волны [Горбатилов, Цуканов, 2011]. Оценка разрешения по вертикали составляет величину $(0,3-0,5) \lambda$, где λ – эффективная длина волны для средней глубины между неоднородностями. Также показано, что обнаружить присутствие изолированной малой неоднородности возможно, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 раз и более.

Основные закономерности формирования сигнала в ММЗ, полученные на численной модели, находятся в хорошем соответствии с результатами полевых экспериментов. В ряде экспериментальных наблюдений было обнаружено, что субвертикальные неоднородности наблюдаются раздельно на значительных глубинах. Исследования показали, что такой эффект может наблюдаться, если коэффициент Пуассона материала включения приближается к нулевому значению [Gorbatikov et al., 2004]. В природных условиях это может означать наличие во включениях развитой микротрещиноватости. Решение обратной задачи в методе микросейсмического зондирования, так же как и в большинстве геофизических методов, не единственно. Невозможно восстановить сложный комплекс параметров среды, исходя только из распределения амплитудной реакции неоднородностей на облучение микросейсмическими волнами. Тем не менее, сам характер проявления геологических объектов в разрезах ММЗ может дать информацию, полезную для геологической и тектонической интерпретации.

Интересно, что субвертикальные геологические неоднородности и скоростные границы для ММЗ являются предпочтительными, а субгоризонтальные границы – «неудобными» объектами. В отличие от ММЗ, в методе отраженных волн (МОВ) субгоризонтальные геологические тела и скоростные границы являются предпочтительными объектами. Это объясняется взаимным пространственным положением волновых фронтов и скоростных границ. Так, идеально горизонтальная в пределах измерительного профиля скоростная граница при использовании ММЗ может быть незаметной. О горизонтальных границах в ММЗ можно судить по нарушению характера волновой картины, по аналогии с тем, как определяют присутствие и по-

ложение субвертикальных разломов в МОВ. В этом смысле ММЗ можно рассматривать как своеобразное «ортогональное дополнение» к МОВ.

Основные черты разломной тектоники

Район Приэльбрусья приурочен к сложному тектоническому узлу, образованному пучками пересекающихся разломов близширотного «кавказского» и близмеридионального «транскавказского» простираний (рис. 1). Из близширотных наиболее значительной является Пшекиш-Тырныаузская шовная зона древнего (палеозойского) заложения и длиной несколько сотен километров. В этой зоне современная активность связана со смещениями по Чемарткольскому правостороннему взбросо-сдвигу. Также субширотным является левосторонний Сылтранский активный разлом, протягивающийся непосредственно через привершинную вершинную часть двуглавого Эльбруса. Наконец, на южном склоне вулканического конуса, непосредственно к северу от субширотного отрезка долины р. Баксан прослеживается Адылсуйский активный правосторонний сдвиг. В зонах всех этих трех разломов обнаружены многочисленные первичные и вторичные (гравитационные и вибрационные) сейсмодислокации, оставленные древними голоценовыми землетрясениями [Рогожин и др., 2005; Рогожин и др., 2014].

Крупнейшим из «транскавказских» является Малкинский разлом северо-северо-восточного простирания, непосредственно трассирующийся под восточным склоном Эльбруса. Он четко прослеживается на поверхности на севере района, в долине р. Малка, а южнее, под снежно-ледниковым покрытием горы и молодыми лавовыми полями выделяется лишь предположительно. Еще два поперечных разлома – Кичкиникольский близмеридионального простирания и Мкярский северо-восточной ориентировки – обрамляют вулканическую гору с запада и востока соответственно.

На склонах Эльбруса имеется еще ряд непротяженных меридиональных уступов, отражающих на поверхности второстепенные разрывные нарушения «транскавказской» ориентировки.

Результаты исследований

По результатам полевых работ был построен глубинный разрез, пересекающий южный склон Эльбруса и показывающий отклонение скоростей волн от региональной скоростной модели в большую и меньшую сторону (см. рис. 2).

На разрезе под пригребневой частью Эльбруса хорошо выделяются три линейные области пониженных скоростей, сменяющие друг друга в направлении от поверхности вглубь коры. Непосредственно в теле горы Эльбрус это приповерхностная система связанных между собой низкоскоростных объемов в диапазоне абсолютных высот от 1,5 до 3,5 км над уровнем моря. Второй ярус низкоскоростных объемов выделен в верхней части земной коры – в диапазоне абсолютных глубин 6,5–11 км, и самый глубокий ярус – в средних горизонтах коры на глубинах с 19 до 33 км от уровня моря (рис. 2).

Каждая область низкоскоростных неоднородностей разреза отделена от другой более высокоскоростными объемами вещества и вместе они образуют как бы цепочку. Можно предположить, что выделенный в теле горы объем представляет собой южную периферию остаточной вулканической камеры, которая формировала рельефную поверхность горы во время последней активной фазы вулканизма. Эта об-

ластей обнажена на участке в верхней части разреза в 2–3 км южнее его начала. Породы тут представлены сильно раздробленными дацитами и риодацитами (рис. 3). Такая раздробленность пород способствует снижению скоростей на этих участках.

Предполагается, что нижние низкоскоростные объемы представляют собой магмасодержащую камеру и очаг, поскольку они расположены в непосредственной близости от г. Эльбрус и не имеют тенденции к распространению в южном направлении за пределы горы. Кроме того эти неоднородности разреза сопоставлялся с геофизическими и сейсмологическими данными других исследователей [Лиходеев, Михаленко, 2012; Маловичко и др., 2014] о землетрясении 2012 года, сейсмические волны от которого проходили прямо через вулканическую структуру Эльбруса. Из этих данных видно, что при прохождении через кору под Эльбрусом S-волна пропадает. Это подтверждает наличие магматического расплава в зоне пониженных скоростей пород. Наличие расплава также подтверждается данными по Приэльбрусскому сейсмическому профилю [Арбузкин и др., 2002; Собисевич и др., 2004], на котором наблюдается уменьшение значений скоростей продольных волн прямо под Эльбрусом.

Продолжение профиля ММЗ на юг позволяет увидеть другие существенные особенности глубинного строения Приэльбрусья. Так, под южным склоном горы в 2,5 км к югу от наивысшей точки профиля обнаружено узкое (шириной 300–500 м) низкоскоростное тело, проникающее в земную кору до глубины около 20 км. Этот низкоскоростной «карман» на поверхности отвечает зоне Адылсуйского разлома, имеющего запад-северо-западное простирание. Далее к югу, в районе изменения простирания профиля ММЗ на запад-северо-западное, откуда он трансформируется вдоль Баксанского ущелья, за пределами вулканической постройки обнаруживается еще одно низкоскоростное включение. Это узкий «карман», проникающий с углом наклона к юго-востоку 75° в верхние горизонты коры от поверхности до глубины 2–3 км ниже уровня моря. Это нарушение ассоциируется с южной частью Малкинского разлома.

Присутствие еще одного четко выраженного разлома (предположительно ЮВ падения под углами $75\text{--}80^\circ$) видно на профиле в месте впадения в Баксанское ущелье ледниковой реки, сходящей с г. Чегет. Зона разлома в недрах выглядит низкоскоростным уз-

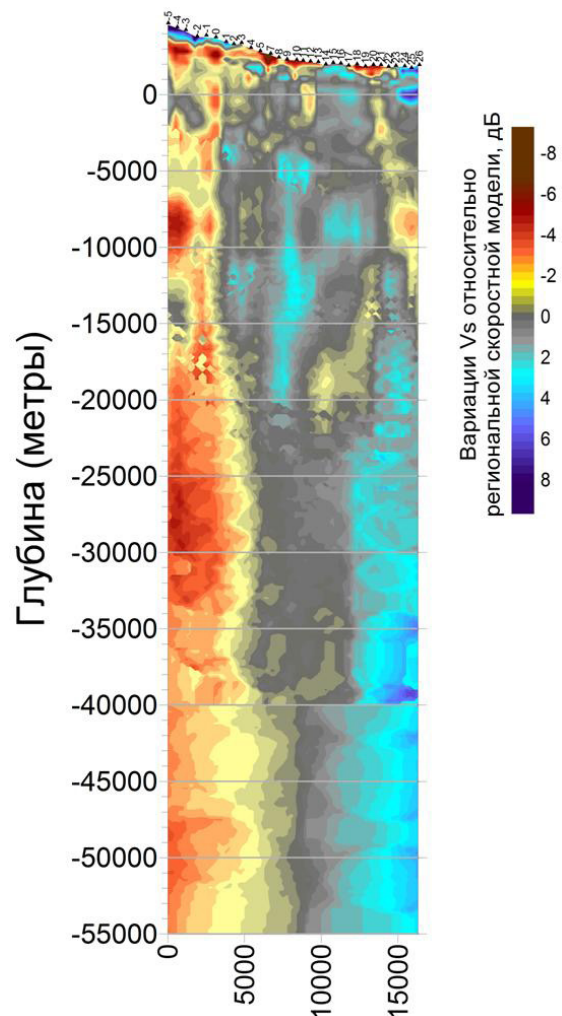


Рис. 2. Разрез ММЗ на южном склоне г. Эльбрус (север слева). Положение линии профиля представлено на рис. 1.



Рис. 3. Обнажения сильно раздробленных дацитов и риодацитов на южном склоне г. Эльбрус

ким «карманом», трассирующимся в недра до глубины 15 км ниже уровня моря. На рис. 1 близким по характеристикам нарушением является продолжение на юг Мкярского разлома северо-северо-восточного простирания. Все три зоны разломов характеризуются отклонением от среднего уровня сейсмического шума -2–5 дБ.

Выводы

Проведенные геолого-геофизические исследования с использованием метода микросейсмического зондирования позволили подтвердить наличие низкоскоростного объема под верхней частью южного склона г. Эльбрус. На разрезе под пригребневой частью Эльбруса четко выделяются три линейные области пониженных скоростей, сменяющие друг друга в направлении от поверхности вглубь коры. Непосредственно в теле горы Эльбрус это приповерхностная система связанных между собой низкоскоростных объемов в диапазоне абсолютных высот от 1,5 до 3,5 км над уровнем моря. Второй ярус низкоскоростных объемов выделен в верхней части земной коры – в диапазоне абсолютных глубин 6,5–11 км, и самый глубокий ярус – в средних горизонтах коры на глубинах с 19 до 33 км от уровня моря. Предполагается, что нижние низкоскоростные объемы представляют собой магмасодержащую камеру и очаг, поскольку они расположены в непосредственной близости от г. Эльбрус и не имеют тенденции к распространению в южном направлении за пределы горы. Кроме того, на южном склоне горы и в ее южном подножье выявлены три разлома «кавказского» и «транскавказского» простираний, проникающие в виде узких субвертикальных низкоскоростных «карманов» в земную кору.

Литература

1. Арбузкин В.Н., Компаниец М.А., Швец А.И., Греков И.И., Литовко Г.В. и др. Отчет о комплексных геолого-геофизических исследованиях по Приэльбрусскому профилю. ФГУП «Кавказгеолсъемка». Ессентуки, 2002. 120 с.
2. Богатиков О.А., Гурбанов А.Г., Мелекесцев И.В. и др. Проблема активизации вулкана Эльбрус (Северный Кавказ) и возможные её последствия // Глобальные изменения природной среды. Мин. Науки и технологий РФ. РАН. Новосибирск. 1998. С.153–164.
3. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. №7. С. 66–84.
4. Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзобоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли, 2015, №1, с. 28–39.
5. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. №4. С.96–112.
6. Короновский Н.В. Эльбрус – действующий вулкан // Природа. 1985. №8. С. 42–52.
7. Короновский Н.В., Рудаков Л.М. О возрасте последних извержений Эльбруса // Изв. Вузов. Геология и разведка. 1962. №8. С. 133–135.
8. Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатиков О.А. и др. Новейший и современный вулканизм на территории России. Отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. 604. с.
9. Лиходеев Д.В., Михаленко В.Н. Температура кровли магматической камеры вулкана Эльбрус // Геофизические исследования, 2012, том 13, №4, С. 70–75.
10. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заклюковская А.С., Преснов Д.А. Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, №4. С. 47–57.
11. Милановский Е.Е., Короновский Н.В. Геологическое строение и история формирования вулкана Эльбрус // Тр. ВАГТ, 1960. Вып. 6. 190 с.
12. Милановский Е.Е., Короновский Н.В. Новые данные о древнейших этапах развития вулкана Эльбрус // ДАН СССР. Т. 141, №2. 1961. С. 433–436.
13. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника, 2015, №2, с. 36–49
14. Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В., Овсяченко А.Н., Спиридонов А.В., Бурканов Е.Е. О соотношении проявлений вулканизма и землетрясений на северном Кавказе в голоцене. // Физика земли. 2005, №3. С. 33–46.
15. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М. ИФЗ РАН, 2014. 256 с.

16. Собисевич А.Л., Нечаев Ю.В., Арбузкин В.Н., Трофименко Е.А., Пруцкий Н.И., Греков И.И. Новые геофизические данные о структуре магматических образований в районе Эльбрусского вулканического центра // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 272–285.

17. Gorbaticov A. V., Kalinina A. V., Volkov V. A., Arnoso J., Vieira R., Velez E. Results of Analysis of Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain // Pure appl. Geophys. 2004. V. 161. P. 1561–1578.

DOI: 10.23671/VNC.2015.3.55277

PRELIMINARY DATA ON THE DEEP STRUCTURE OF THE SOUTHERN SLOPE OF ELBRUS MOUNT FROM STUDY OF THE COMPLEX OF GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL METHODS

© 2015 E.A. Rogozhin, Sc. Candidate (Geol.-Min.), A.V. Gorbaticov, Sc. Doctor (Phys.-Math.), N.V. Andreeva, M.Yu. Stepanova

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, 123995, Moscow, B. Gruzinskaya 10/1; e-mail: direction@ifz.ru

The article presents the results of integrated geological-geophysical studies of the southern slope of the Elbrus mount and part of the Baksan valley. During the field works performed geological and geomorphological mapping in conjunction with the study of the deep structure using microseismic sounding method. Peculiarities of geological and geomorphological construction of volcano and its deep structure. So, in the deep horizons was made clear the fault zones, and the volcanic hearth and chamber. Thus, it is confirmed that Elbrus is a potentially active volcano.

Keywords: volcano, seismicity, microseisms, profile, cross-section, fault, Earth's crust.