

Электромагнитные методы в задачах мониторинга неоднородных вулканических образований

77-48211/638213

#08, август 2013

Дударов З.И., Долов С.М., Боготов Н.Х., Собисевич Л.Е., Мисеюк О.И.
УДК 550.385.003; 550.343.

ФГБУ науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

ФГБОУ высшего профессионального образования

«Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

omiseyuk@mail.ru

1. Постановка задачи

Вулканизм является одним из основных эндогенных процессов, формирующих облик нашей планеты и информирующих нас о состоянии её недр. Будучи экстремальным по своей сущности, он также способен проявляться в виде катастрофических событий, чреватых тяжелейшими последствиями для человечества и окружающей среды.

На территории европейской части России вблизи от жизненно важных и густонаселённых её центров существуют природные объекты с новейшими и современными проявлениями вулканизма – Эльбрусская и другие вулканические области в районе Северного Кавказа.

Однако, как это ни парадоксально, изученность глубинного строения вулканических центров Северного Кавказа, несмотря на отдельные крупные достижения в части познания тех или иных вулканических объектов, всё ещё не даёт основания для сколько-нибудь определённого предсказания места, времени и масштаба ожидаемых катастрофических вулканических событий. Причина – в отсутствии системных геолого-геофизических и аппаратурных исследований, позволяющих «видеть» изучаемый объект объёмно, включая и его внутреннее строение. Как ни многочисленны подходы к такому многомерному явлению как вулканизм, они не способны пока воссоздать целостную картину процесса, если не установлена

взаимосвязь между изучаемыми сторонами этого процесса, если не известно его глубинное строение.

Создание модели отдельного геологического объекта в составе вулканического образования, адекватного природе, помимо теоретических предпосылок и построений, основывается, прежде всего, и в основном на системном подходе при изучении его многочисленных и разнообразных проявлений в естественной среде. В этом смысле такой процесс познания можно начать, но практически невозможно закончить – многоликость и сущность явлений неисчерпаемы. И при этом получение новых экспериментальных данных, являющихся деталями строящейся модели, и новых представлений о них не исключает ранее полученных данных и представлений, а лишь углубляет и возможно изменяет представления.

Мы поставили перед собой цель приступить к построению принципиально новой модели «кольцевая структура-вулкан-очаг-гидротермы» в приложении к вулканическим образованиям Северного Кавказа. Для этого на первом этапе работ был выбран Пятигорский вулканический центр (ВЦ). Этот выбор продиктован следующими обстоятельствами.

Во-первых, этот вулканический центр является самым продвинутым в своем развитии сравнительно с другими вулканическими центрами Эльбрусской области – Кабардинским, Балкарским и собственно Эльбрусским. Ему насчитывается более 8 млн. лет, тогда как возраст других центров не превышает 4 млн. лет. По-видимому, это означает, что в Пятигорском ВЦ можно ожидать если не завершённую картину развития этого геологического феномена, то, по меньшей мере, более представительную в смысле набора стадий развития.

Во-вторых, Пятигорский вулканический центр обладает неоспоримым преимуществом перед другими ВЦ Северного Кавказа в части его изученности с геолого-геохимической точки зрения. Этим самым модель, отстроенная на его примере, может представить более ёмкую картину изучаемой системы, включающую её фрагменты от поверхности Земли до поверхности мантии.

2. Состояние исследований по проблеме.

Изучение глубинного строения вулканических построек задача сложная и очень трудоемкая. Этим можно объяснить ограниченное число надежных экспериментальных данных о глубинном строении вулканических систем с оконтуриванием пространственного положения локальных магматических структур.

Первые успешные работы в этой области были выполнены учеными лаборатории прикладной геофизики и вулканологии ИФЗ РАН в конце прошлого столетия, когда методом линеаментного анализа по технологии Ю.В. Нечаева был выполнен анализ

пространственного распределения значений поля тектонической раздробленности геологической среды в пределах Эльбрусской вулканической области [2] и построен вертикальный разрез, проходящий через вулкан Эльбрус и ориентированный вдоль главного Кавказского хребта. Полученные научные результаты дают общее представление о магматических структурах: в разрезе. Анализируя их, удастся выделить область глубинного магматического очага, близповерхностную вулканическую камеру на глубинах ниже 3 км, а также один из возможных путей перетока первичной магмы (рис. 1). Следует отметить, что технология линеаментного анализа является приближенной. Дешифрирование поверхностных линеаментов, выделенных по снимкам Земли с орбиты предполагает возможность внесения субъективных ошибок [3]. Однако, именно применение данной технологии открыло пути получения первичной информации, которая стала основой для изучения глубинного строения труднодоступных территорий на поверхности Земли.

Дальнейшие геофизические исследования в Эльбрусской вулканической области проводились с целью уточнения полученных результатов. Экспериментальные работы по изучению глубинного строения вулкана Эльбрус и прилегающих районов были продолжены учеными из организации «Кавказгеология» Минприроды РФ под руководством В.Н.Арбузкина, который был выдающимся экспериментатором. Ими впервые был получен геоэлектрический разрез вулканической постройки Эльбруса с использованием технологии магнитотеллурического зондирования [4]. Характеризуя этот полевой эксперимент, отметим, что он был трудоемким. Достаточно заметить, что большому коллективу ученых потребовалось три месяца непрерывных полевых работ в сложных горных условиях, включая покрытую ледниками вулканическую постройку Эльбруса, чтобы пройти только один профиль методом магнитотеллурического зондирования и получить впервые геоэлектрический разрез, отражающий глубинное строение Эльбрусской вулканической области (рис. 2).

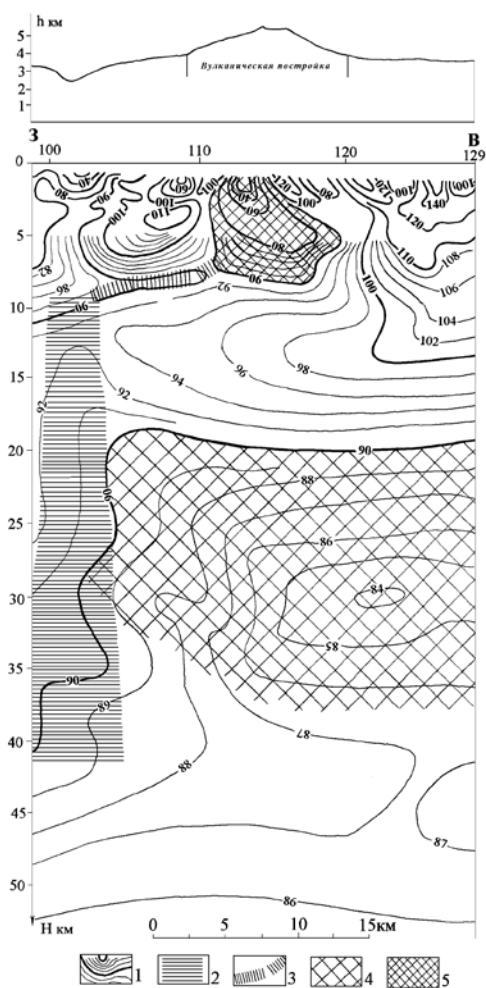


Рис. 1. Вертикальный разрез поля тектонической раздробленности коры, проходящий через вулкан Эльбрус и ориентированный вдоль простирания Кавказа [2].

1 – изолинии поля тектонической раздробленности коры в условных единицах; 2 – область повышенной раздробленности нижней части коры; 3 – близгоризонтальные ослабленные зоны (возможный путь перетока первичной магмы в вулканическую камеру); 4 – область anomalously пониженных значений поля в верхах базальтовой коры, рассматриваемая в качестве потенциального материнского магматического очага, служащего в прошлом поставщиком материала для заполнения вулканических камер; 5 – область anomalously пониженных значений поля в верхней части коры, отождествляемая с вулканической камерой.

Результаты интерпретации данных электроразведки (рис. 2), проведенной в районе Эльбрусского вулканического центра и на прилегающих территориях, позволили выявить достаточно резкое снижение сопротивлений (до 40 Ом м и ниже) на глубинах 5 - 10 км. Эти данные вполне укладываются в рамки современных теоретических представлений, согласно которым увеличение температуры до 400 – 1000°C приводит к уменьшению сопротивления горных на несколько порядков [5].

Таким образом, было установлено, что в вулканической постройке Эльбруса на глубине 5 – 10 км объект, выделен объект, обладающий низким сопротивлением. Он определен как магматическая камера.

Ниже по разрезу коры и несколько севернее вулканической постройки Эльбруса на глубине 25 - 55 км выявлена еще одна низкоомная аномалия шириной около 15 км. Эту аномальную область можно характеризовать как глубинный магматический очаг.

Важно отметить, что результаты магнитотеллурического зондирования подтвердили полученные ранее данные о глубинном строении вулкана Эльбрус. Были выявлены и дополнительные очаги, что позволило уточнить результаты, полученные с

использованием поля тектонической раздробленности геологической среды в районе вулканического центра.

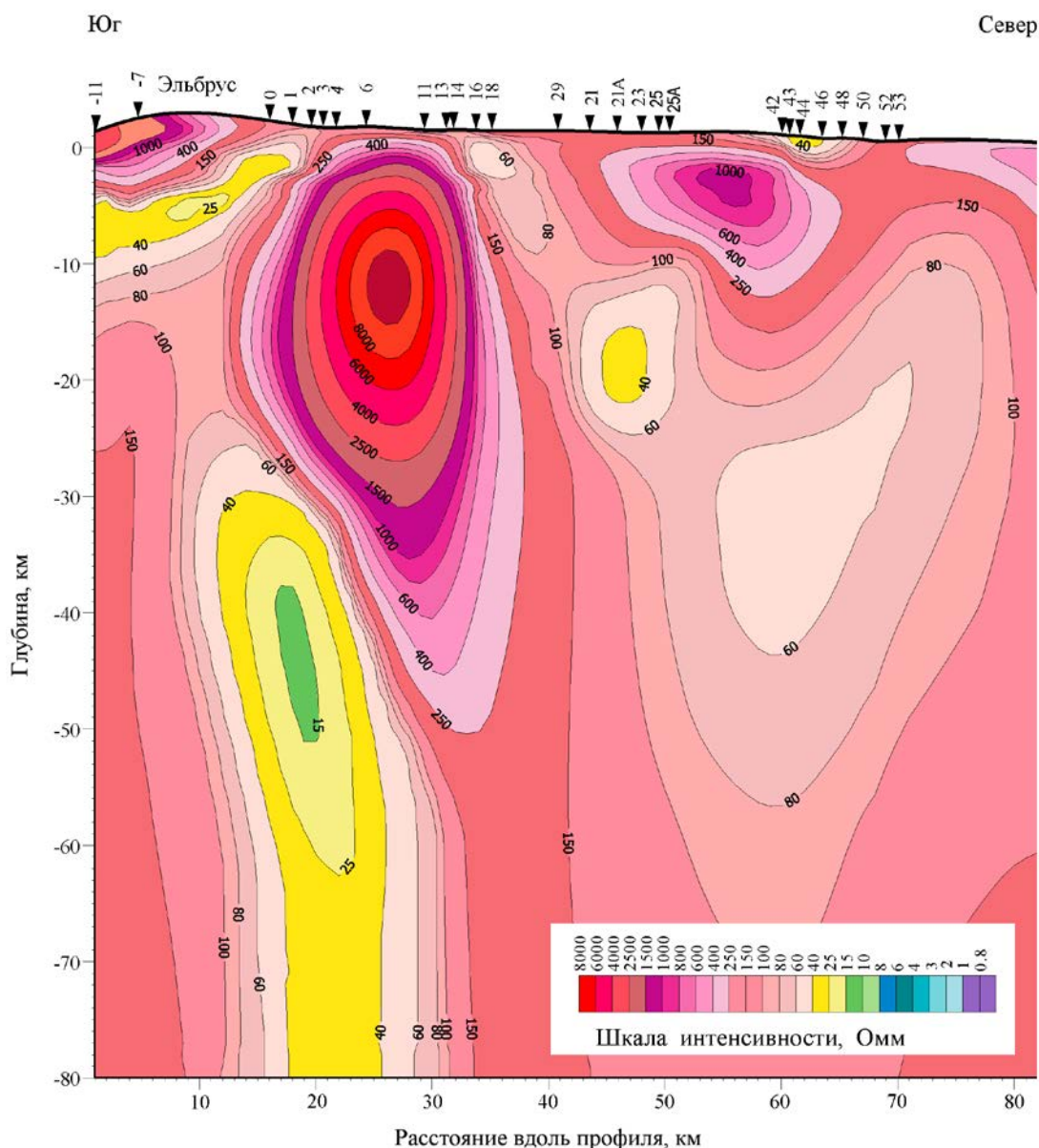


Рис. 2. Геоэлектрический разрез (изолинии равных сопротивлений), отражающий интерпретацию данных магнитотеллурического зондирования по Приэльбрусскому профилю [5].

Приведенный пример свидетельствует о том, что информационность современных электро- и геомагнитных технологий открывает широкие возможности для выделения и оконтуривания флюидо-динамических образований в теле вулканической постройки и в других труднодоступных районах вулканического центра. Подтверждение тому использование геомагнитных методов в задачах поиска залежей углеводородов, оценки объемов и сроков добычи нефти и газа, где существенное значение имеет выявление подводящих каналов углеводородной проработки в осадочном чехле и фундаменте. Известны стандартные геомагнитные технологии выделения слабомагнитных флюидных образований в слоистой геологической среде нефтегазоносных бассейнов [15 – 20].

Характеризуя состояние исследований по затронутой проблеме, отметим одно из последних достижений американских ученых в этой области, открывших расплавленную зону под плитой Кокос при помощи метода, который использует небольшие колебания электрического и магнитного полей Земли в изучаемом районе литосферы [21]. В процессе проведения электромагнитных наблюдений на морском дне они установили, что слабые вариации электрических и магнитных полей позволяют выйти на технологии, которые дают возможность построить и изучить внутреннюю структуру изучаемого геологического образования в сложно построенной геологической среде океанического дна вплоть до глубины 160 км (рис. 3).

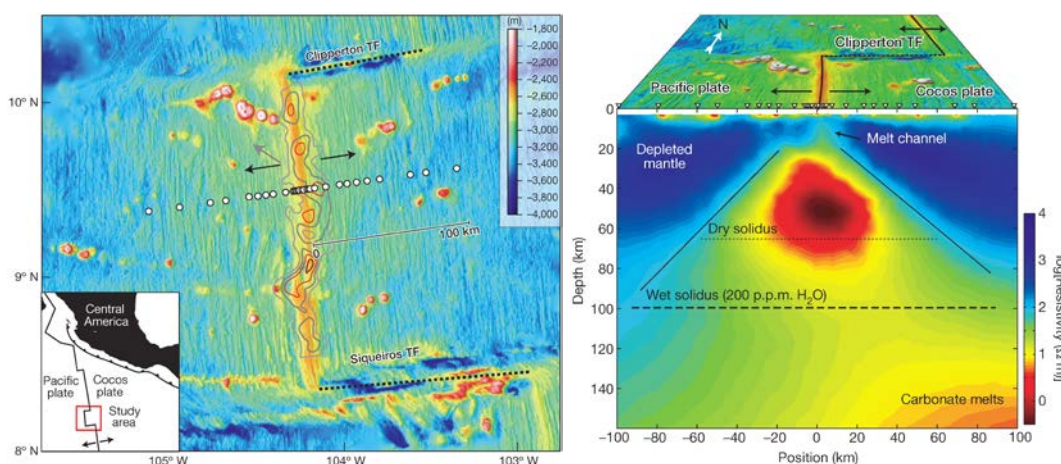


Рис. 3. Схема эксперимента (слева) с использованием электромагнитных датчиков, размещённых на дне океана с целью изучения особенностей глубинного строения земной коры и верхней мантии, а также результаты интерпретации полученных данных [21].

Приведенный пример показывает, что современные геоэлектромагнитные технологии являются эффективным геологическим инструментом, который сегодня с успехом применяются геофизиками и геологами при проведении, как фундаментальных исследований, связанных с глубинным строением литосферы, так и в промышленности при оконтуривании углеводородных месторождений. В вулканологии эти методы позволят в будущем контролировать структуры магматических образований в теле вулканической постройки и другие контрастные неоднородности, распределенные в геологической среде отдельных вулканических провинций.

К сожалению, все аппаратные комплексы, реализующие технологии геоэлектромагнитного зондирования литосферы, требуют расстановки большого числа заглубленных в грунт датчиков, что представляется затруднительным в горных условиях, где расположены вулканические постройки. В этом авторы убедились, используя серийный магнитотеллурический регистратор типа MTU-5 в работах на вулкане Горы Карабетовой (Таманская грязевулканическая провинция). Общий вид

магнитотеллурической станции и пример установки одного из датчиков в «тело» грязевого вулкана показан на рис. 4а,б.



Рис. 4. Магнитотеллурическая станция MTU-5, установленная в районе грязевого вулкана Горы Карабетова (а) и электрод, установленный в тело вулканической постройки (б).

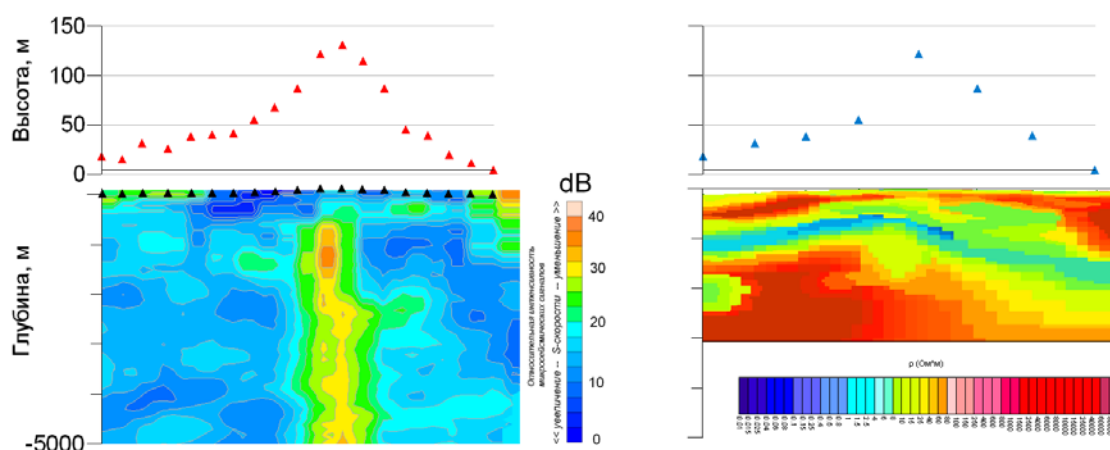


Рис. 5. Результаты профильных геофизических исследований на грязевом вулкане горы Карабетова (Таманская грязевулканическая провинция). Вертикальные разрезы вдоль геофизического профиля, полученные методами низкочастотного микросейсмического зондирования (слева) [1, 22] и магнитотеллурического зондирования (справа) [18].

Нетрудно понять (рис. 4б), что процесс расстановки таких датчиков на поверхности вулканической постройки, которая сложена твердыми изверженными породами, потребует применения специального бурового оборудования, что не всегда возможно.

Авторы настоящей статьи поставили перед собой цель найти пути проведения электромагнитного мониторинга слоистых геологических структур при помощи стандартных переносных протонных магнитометров на примере территории Пятигорского вулканического центра.

3. Проведение исследований в районе Пятигорского вулканического центра.

Пятигорский вулканический центр - это современная действующая природная система, имеющая наиболее длительную историю и достаточно полно изученная в части ее глубинного строения, представляет в этом отношении особый интерес [6–9]. Здесь расположена самая крупная гора Пятигорья – Бештау (рисунок 6), сложно построенная, многофазная интрузия, являвшаяся главным носителем магматического вещества и поставщиком глубинных флюидов разнообразного состава [7]. С целью уточнения глубинной структуры Бештау и получения информации о геомагнитных аномалиях в районе Пятигорского вулканического центра нами были проведены специализированные экспедиционные работы. Полевую, пешеходную магнитную съемку в районе Бештау мы проводили с использованием портативного протонного магнитометра типа ММП-203 (рисунок 6Б). Магнитометр такого класса позволяет регистрировать значение полного магнитного поля с погрешностью не более ± 1 нТл, в диапазоне 20-100 мкТл, при температуре окружающей среды от -30 до $+50$ °С. Систематическая погрешность измерений в полевых условиях не превышает ± 2 нТл, а средняя квадратичная ошибка одного измерения 1,5 нТл [10].

Серийно выпускаемый протонный магнитометр конструктивно состоит из магниточувствительного сенсора, регистрирующего блока и блока питания. Это малогабаритный прибор, который удобно использовать в труднодоступных районах вулканических центров.

Принцип работы протонного магнитометра ММП-203 основан на эффекте свободной прецессии протонов в магнитном поле Земли. В результате электромагнитного воздействия на сенсор протоны прецессируют вокруг направления земного магнитного поля с угловой скоростью ω , пропорциональной полной напряженности магнитного поля Земли T [11]:

$$\omega = aT \quad (1)$$

где a - коэффициент пропорциональности.

Для исключения технических ошибок, перед проведением полевых исследований, используемый прибор прошел метрологический анализ в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.



Рис. 6. А – общий вид на лакколит Бештау; Б – комплект переносной аппаратуры для изучения геомагнитного поля: 1 – приемник магнитного поля, 2 – протононосодержащий датчик, 3 – узел питания, 4 - GPS, 5 – соединительный кабель; В – рабочий момент - регистрация геомагнитного поля рабочей группой в полевых условиях.

В процессе изучения геомагнитного поля горы Бештау нами были пройдены три профиля общей протяженностью 42 км. Среднее расстояние между точками наблюдения составляло при этом 100 метров.

4. Технология полевых наблюдений. Основные научные результаты.

Технология полевых наблюдений сводилась к следующему. Магнитометр, который размещен в ранцевом подвесе, (рисунок 6В) устанавливается вдоль направления N-S (рисунок 1В) и оператор производит опрос.

Полученные значения натурных наблюдений заносятся в таблицу.

В процессе проведения полевого эксперимента каждый пункт привязывался GPS приемником к единой сети наблюдений.

Всего в процессе полевого эксперимента было проанализировано 370 точек пройденного профиля (рисунок 7). В результате были получены значения модуля вектора магнитного поля в изучаемой области. Все экспериментальные данные были привязаны к известным координатам поверхности вулканической постройки.

Затем по данным анализа стационарных магнитометров, расположенных в лабораториях Северо-Кавказской геофизической обсерватории (координаты: N43.25,

Е42.72) и Вернекубанском геодинимическом полигоне ВСЕГИНГЕО (координаты: N43.56, E42.13), было установлено, что в период проведения полевых работ с 19.04.13 10:46 по 21.04.13 17:35 магнитное поле Земли оставалось относительно спокойным и суточными вариациями в первом приближении можно было пренебречь [10].

Построение результирующего магнитного поля с использованием описанных выше наблюдаемых значений было выполнено с использованием геостатистического подхода (метод «Kriging»).

Выбранный подход основан на использовании ячеек с известными значениями поля анализируемой поверхности, для расчета (прогноза) значений пустых ячеек. В процессе вычислений создаются вариограммы для оценки значений статистических зависимостей, называемых пространственной автокорреляцией, и на основании полученного результата определяются предполагаемые значения пустых ячеек.

В процессе проведения расчетов использовалось известное соотношение вида (9):

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

где, $Z(S_i)$ - измеренное значение в ячейке i ;

λ_i - неизвестный вес измеренного значения ячейки i ;

S_0 - расположение ячейки, для которой вычисляется прогноз;

N - число измеренных значений.

Полученные научные результаты позволили построить карту геомагнитного поля самого большого лакколита Кавказских минеральных вод (рис.8).

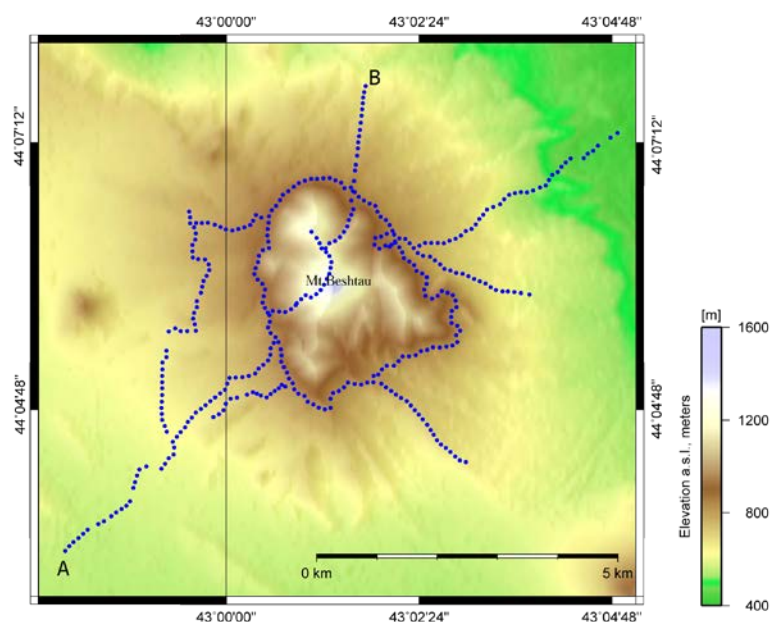


Рис. 7. Пункты регистрации геомагнитного поля в районе горы Бештау.

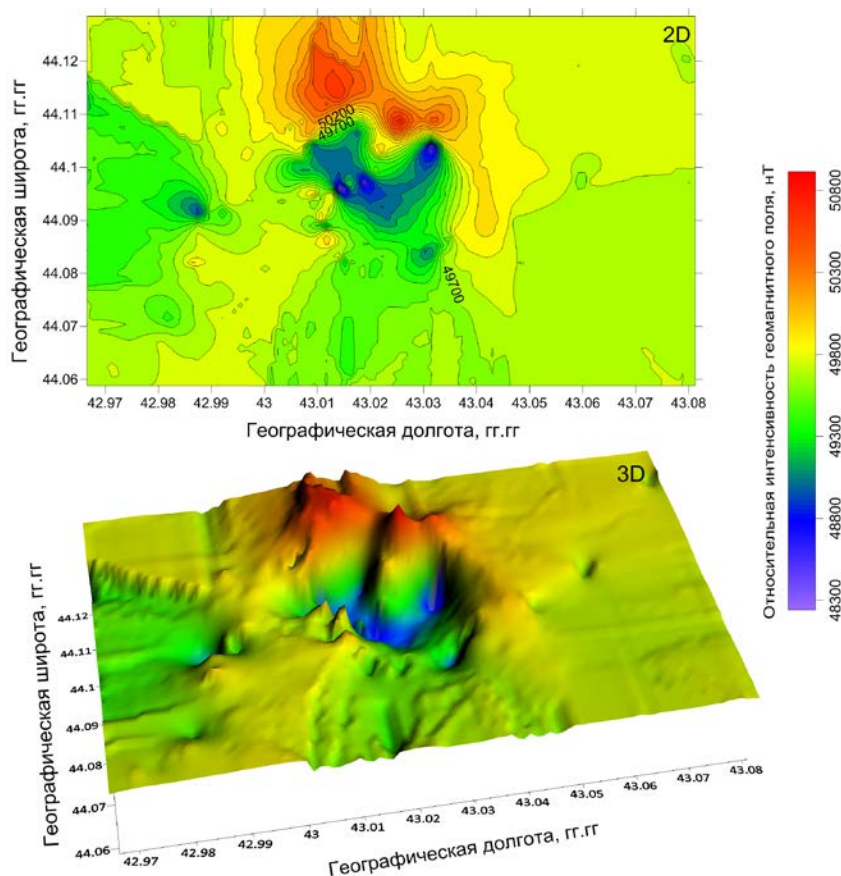


Рис.8. Карта геомагнитного поля лакколита Бештау.

В процессе проведенного полевого эксперимента и проведенного анализа натурных данных, полученных на вулканической постройке Бештау, нами были впервые в истории инструментальных наблюдений выделены участки, где отмечаются характерные локальные магнитные аномалии в геомагнитном поле Земли.

Верхний участок карты, отражающий структуру аномальных значений магнитного поля, свидетельствует о наличии в теле лакколита Бештау разуплотненных локальных геологических образований. Это своеобразные каналы, по которым глубинные флюиды поднимаются на поверхность.

Особый научный интерес представляет профиль А-В (рисунок 7) проходящий через вершину Бештау. Максимальный градиент магнитного поля вдоль данного профиля составляет величину 3433 нТл.

Сопоставляя полученные экспериментальные результаты магнитной съемки на данном отрезке с проведенными при нашем участии исследованиями по изучению глубинного строения Бештау сейсмическими методами [7, 13, 14], можно отметить, что аномально пониженные значения магнитного поля в отдельных объемах горы Бештау находится в хорошем согласии с низкоскоростными неоднородностями в недрах лакколита (рис. 9).

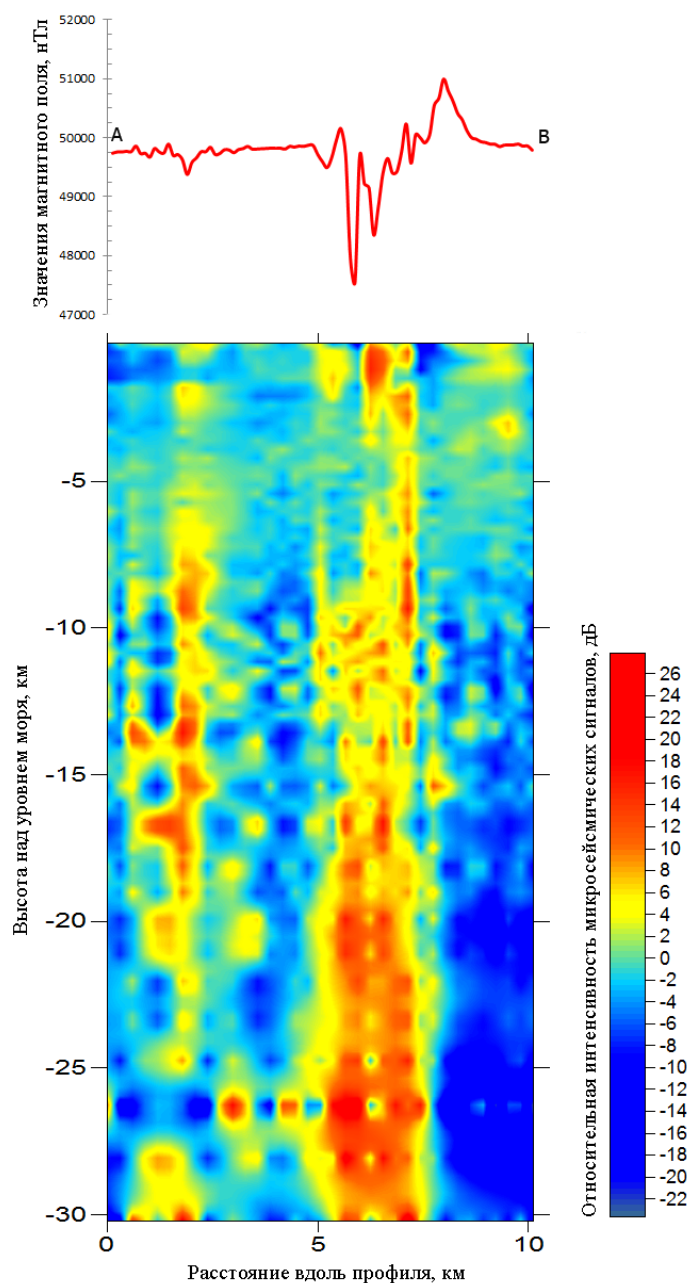


Рис. 9. Сопоставительный анализ геомагнитных данных лакколита Бештау с глубинным строением лакколита Бештау по данным низкочастотного микросейсмического зондирования.

5. Заключение

Проведенные натурные магнитометрические полевые эксперименты по зондированию глубинных неоднородностей в земной коре показали, что развиваемая технология мониторинга вулканических образований при помощи переносных протонных магнитометров позволяет получать достоверную информацию о строении сложно построенной геологической среды. Она значительно проще и менее трудоемкая по сравнению с известными электромагнитными и сейсмическими технологиями.

Полученные в процессе полевых экспериментов научные результаты подтверждены независимыми сейсмическими экспериментами, выполненными на Бештау учеными из

ИФЗ РАН при нашем участии с использованием технологии зондирования на поверхностных волнах.

Подводя итог полевого эксперимента, авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность доктору геолого-минералогических наук Юрию Петровичу Масуренкову за постоянное внимание и поддержку наших исследований на Северном Кавказе и Канониди Константину Харлампиевичу, который обеспечивал калибровку и бесперебойную работу полевого протонного магнитометра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 гг. (государственный контракт № 14.518.11.7051 от 19 июля 2012)» и Программы №4 Президиума РАН.

6. Список литературы

1. Горбатилов 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.
2. Нечаев Ю.Н., Собисевич А.Л. Космические технологии в задачах механико-математического моделирования внутреннего строения геофизической среды. Третий Международный аэрокосмический Конгресс IAC' 2000. Сборник тезисов. Москва. 23-27 августа 2000 г.
3. Богатилов О.А., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л. Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // ДАН. 2002. Т. 387. № 3. С. 244 – 247.
4. 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.
5. Арбузкин В.Н., Компаниец М.А., Швец А.И., Греков И.И., Литовко Г.В. и др. Отчёт о комплексных геолого-геофизических исследованиях по Приэльбрусскому профилю. ФГУП «Кавказгеолсъемка». Ессентуки, 2002. С. 120.
6. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Комкова Л.А., Лаверова Н.И. Флюидно-магматические системы Северного Кавказа. – М.: Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2010. – 280 с.
7. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л. Современная флюидно-магматическая система Пятигорского вулканического центра // ДАН (Геофизика). 2010. Т. 435. № 6. С. 815 – 820.

8. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л. Пульсационно-вихревое развитие Эльбрусской вулканической области (как следствие миграции мантийного плюма?) // ДАН (Геофизика). 2010. Т. 432. № 1. С. 105 – 109.
9. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В., Шевченко А.В. Тепловые аномалии Северного Кавказа // ДАН (Геофизика). 2009. Т. 428. № 5. С. 667 – 670.
10. Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. – 2008. – Т. 44. – С. 12–25.
11. Хмелевской В.К. Методы прикладной и скважинной геофизики. Дубна, 1997. 276 с.
12. ArcGIS Spatial Analyst. Руководство пользователя. Стр .141 – 150.
13. Дударов З.И., Жостков Р.А., Масуренков Ю.П., Шевченко А.В., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения Пятигорского вулканического центра методом микросейсмического зондирования // Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и 25 сессия российского акустического общества», Москва, 2012.
14. Zhostkow R.A., Masurenkov Yu.P., Dudarov Z.I. Shevchenko A.V., Dolov S.M., Danilov K.B. Deep Structure of the Pyatigorsk Volcanic Center (Northern Caucasus) // European Geosciences Union General Assembly 2012, Vienna, Austria, 2012. EGU2012-4299.
15. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М: Недра, 1981. 327 с.
16. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально однородных сред. М.: Недра. 1991. 250 с.
17. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.Б. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Изд-во МГУ, 1997.
18. Бабешко В.А., Ратнер С.В., Лозовой В.В., Сыромятников П.В. Комплексные геофизические методы в изучении глубинного строения Земли для построения модели напряженно-деформированного состояния земной коры // Вестник ЮНЦ РАН. 2007. №2.
19. Лобковский Л.И., Левченко Д.Г., Леонов А.В., Амбросимов А.К. Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. М.: Наука, 2005. 325с.
20. Dziewonski A. Long term observatories in the oceans: synergies in science and technological solutions // Long - Term Observations in the Oceans. OHP/ION Joint Symposium. Japan, 2001. P. 245-246.
21. Key K, Constable S, Liu L, Pommier A. Electrical image of passive mantle upwelling beneath the northern East Pacific Rise // Nature. 2013 Mar 28; 495(7442). Pp. 499 – 502. doi:10.1038/nature11932.
22. Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // ДАН. 2008. Т. 422. № 4. С. 542 – 546.