

# Результаты оценки современного состояния «спящего» вулкана Эльбрус, полученные комплексом геолого-геофизических и дистанционных методов. Разработанная технология мониторинга активности «спящих» вулканов центрального типа (на примере Эльбруса, КБР, Россия)

А.Г. Гурбанов<sup>1</sup>, О.А. Богатиков<sup>2</sup>, Б.С. Карамурзов<sup>3</sup>, А.Б. Лексин<sup>4</sup>,  
В.М. Газеев<sup>5</sup>, Л.Е. Цуканова<sup>6</sup>, А.В. Шевченко<sup>7</sup>, С.М. Долов<sup>8</sup>

Прежде чем перейти к оценке вероятности возобновления активности «спящих» вулканов (и Эльбруса в частности) по комплексу геолого-геофизических и дистанционных данных и описанию разработанной нами системы мониторинга вулканической опасности, рассмотрим существующие категории классификации вулканов.

По классификации Н.Н. Гущина [16] вулканы по состоянию подразделяются на три типа: 1) *действующие* – с точной датировкой извержений в историческое время (самая ранняя датировка относится к 1500 году до н. э.); 2) *потенциально действующие* – с приблизительной датировкой последних извержений, определенной разными методами, дающей возраст не свыше 3 500 лет; 3) вулканы, находящиеся в сольфатарной стадии активности в историческое время, и современные сольфатарные поля. Включению вулканов в эту категорию послужило наличие сведений о времени последних извержений на основании определения возраста по <sup>14</sup>C, в отдельных случаях – по археологическим или каким-либо другим признакам.

## СБОР, СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ ПО ЭВЦ И ДРУГИМ «СПЯЩИМ» ВУЛКАНАМ

Анализ комплексных данных о современном состоянии вулкана Эльбрус и истории развития ЭВЦ показал, что по классификации Н.Н. Гущина [16] он относится к категории действующих вулканов (с точной датировкой извержений в историческое время –1170 и 990 лет назад), но «спящих» около 1 000 лет. В последние 13 лет на «спящем»

вулкане Эльбрус стал проявляться следующий ряд признаков, свидетельствующих о его переходе из пассивной в более активную фазу:

- увеличение количества периферических приповерхностных магматических камер;
- интенсивное таяние ледников над приповерхностными магматическими камерами;
- усиление фумарольной активности и, впервые за всю историю наблюдений за Эльбрусом, появление в 2007, 2009–13 гг. новых фумарол в нижней части вулканической постройки (на 250 и 410 м ниже станции канатной дороги «Кругозор»);
- усиление процесса дегазации расплава, находящегося в приповерхностных магматических камерах, с образованием над ними тонкодисперсных аэрозольных облаков с интенсивным выносом в периоды активности целого ряда элементов и самородных металлов, появление потоков водорода и «столбов» ярко-белого свечения [4, 5, 13, 14];
- увеличение к концу голоцена частоты повторяемости извержений и сокращение периодов покоя в вулканической активности.

На основании анализа рассмотренных выше типов извержений, составов и строения вулканических разрезов, характеризующих ЭВЦ, показано, что в истории его развития были следующие типы извержений: формирование вулканических разрезов докальдерной стадии происходило, скорее всего, при извержениях исландского типа; игнимбриты, туфы и туфолоавы риолитового и риодацитового составов (ранний этап кальдерной стадии) сформировались при извержении катмайского типа; вулкан Кюкюртли образовался при пелейском типе извержения; вулканические разрезы позднего этапа кальдерной стадии и

<sup>1</sup> Гурбанов А.Г. – к. г.-м.н., в.н.с. ИГЕМ РАН.

<sup>2</sup> Богатиков О.А. – академик РАН, гл. н. с. ИГЕМ РАН.

<sup>3</sup> Карамурзов Б.С. – д. ф.-м. н., профессор, ректор КБГУ.

<sup>4</sup> Лексин А.Б. – вед. программист ИГЕМ РАН.

<sup>5</sup> Газеев В.М. – к. г.-м. н., н. с. ИГЕМ РАН.

<sup>6</sup> Цуканова Л.Е. – н.с. НИИ физики ЮФУ, Ростов-на-Дону.

<sup>7</sup> Шевченко А.В. – к. пед. н., профессор, зав. кафедрой чрезвычайных ситуаций КБГУ.

<sup>8</sup> Долов С.М. – вед. инженер кафедры чрезвычайных ситуаций КБГУ.

раннего и позднего этапов посткальдерной стадии сформировались при комбинациях извержений плинианского и подледникового типов.

Выявлена закономерность, заключающаяся в увеличении частоты повторяемости извержений и сокращении продолжительности периодов покоя к концу голоцена. Это, в сочетании с практикой постоянным дацитовым составом извергавшихся лав и пирокластике в голоценовых разрезах и наличием многочисленных покровных ледников и фирново-снежных полей на Эльбрусе, позволило считать, что при возобновлении активности «спящего» вулкана извержение будет комбинированным – плинианским с подледниковым и с соответствующими катастрофическими событиями.

Известно, что вулканические извержения, как и все природные катастрофические явления, происходящие на Земле, проявляются циклично [10]. Считается, что подготовка нового извержения начинается со времени прекращения предыдущего, а само извержение является конечным этапом продолжительного процесса его подготовки. Вулканы извергаются с разной периодичностью. Например, три крупных кальдеры в Йеллоустонском парке (США) за последние 2 млн лет действовали с продолжительностью периодов покоя в 7 тыс. лет [50]. Вулкан Сент-Хеленс (запад США) пробудился после 123-летнего периода затишья и через 40–50 тыс. лет после своего первого извержения [38].

Изучение закономерностей проявления активности вулкана в прошлом позволяет решить ряд фундаментальных задач вулканологии и определить возможные опасности, которые возникнут при возобновлении его активности в будущем (как говорит афоризм «прошлое – это настоящее и будущее»).

Вулканологами выявлена определенная закономерность в периодичности проявления вулканической активности на Земле. Основной задачей в изучении этой периодичности является определение длительности (продолжительности) периода затишья между отдельными этапами извержений. В вулканическом поясе Армянского нагорья затишье между извержениями некоторых вулканов составляло около 250 лет.

Сейчас мы уже располагаем комплексом конкретных признаков (повышенная плотность теплового потока в пределах ЭВЦ, наличие под вулканом приповерхностных магматических камер и питающего их глубинного очага, активизация фумарольной активности, меняющаяся интенсивность процесса дегазации расплава в магматических камерах, обширная зона сейсмического затишья в контурах Эльбрусской кальдеры [35] и др.), свидетельствующих о переходе «спящего» вулкана Эльбрус в активную фазу. При этом важно учитывать, что Кавказ и Закавказье, включая Армянское вулканическое нагорье, находятся в

зрелой орогенной стадии развития [32]. Следовательно, первопричина магматических и вулканических явлений продолжает оставаться в стадии повышенной активности. Об этом свидетельствуют продолжающиеся горизонтальные и вертикальные дифференцированные движения земной коры на Кавказе, особенно в зоне Транскавказского поперечного поднятия (ТПП) [34].

Внедрение в земную кору магматических масс обусловило ее разуплотнение и как следствие этого – образование глубинных гравитационных минимумов (в редукции Буге), наблюдающихся в пределах Эльбрусского, Казбекского вулканических центров и по всему вулканическому поясу Армении [45, 46], расположенных в зоне ТПП.

Наличие под ЭВЦ расплава в камерах (на глубине 4–10 км ниже уровня моря и в питающем их очаге на глубине 28–80 км), под Арагац-Варденис-Сюникской вулканической областью (в камерах на глубине 5–6 км) и под Гегамским вулканическим нагорьем (в камерах на глубине 7–8 км) подтверждено аудиоманнителлурическим зондированием в виде высоко электропроводящих слоев [6, 44].

Известно, что орогенные вулканические пояса формируются на зрелых (энсиалических) островных дугах, на активных континентальных окраинах и в коллизионной обстановке типа континент-континент. После исследований Л.П. Зоненшайна [21], В.Р. Дикинсона [47], П. Липмана, Н. Сигимур, Х. Куно и др. принято считать, что проявления орогенного вулканизма, тенденции в последовательности и стадийности магматических проявлений в поясах различного типа очень сходны. Так, ранняя стадия орогенного вулканизма характеризуется монопородными базальт-андезитовыми ассоциациями. Средней стадии присуще преобладание риодацит-риолитовой ассоциации. Для поздней стадии характерны контрастные бимодальные базальт-риолитовые ассоциации повышенной щелочности [26, 27].

Для определения этапа, на котором сейчас находится ЭВЦ, проведено его сравнение с потухшими вулканами Гегамского хребта (Армения), для которых установлена [23] следующая временная (от древней к молодой) последовательность формирования: 1 – эксплозивно-пирокластические образования (включая игнимбриты); 2 – риолит-обсидиановые лавовые потоки; 3 – риолит-обсидиановые купола и экструзии; 4 – некки и потоки риолитов и риодацитов; и завершающий, 5-й, этап – извержение лавовых потоков андезитового и андезибазальтового составов [17]. Лавы 5-го этапа имеют средне-позднеплейстоценовый возраст [22]. Аналогичная последовательность наблюдается и при формировании позднеплиоценовой Верхнечегемской кальдеры: 1 – эксплозивно-пирокластические образования (спекшиесы

туфы) риолитового, а затем риодацитового и дацитового составов; 2 – внедрение гранит-порфиров; 3 – перерыв в вулканической активности (покровное оледенение); 4 – извержение посткальдерных андезитов, перекрывших моренные отложения; 5 – полное прекращение вулканической активности после извержения лав андезитового состава.

Следовательно, Эльбрус сейчас находится на 4-ом этапе развития, а его активность будет затухать после извержения более основных по составу (андезиты, андезибазальты) лав, чем в предыдущие этапы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

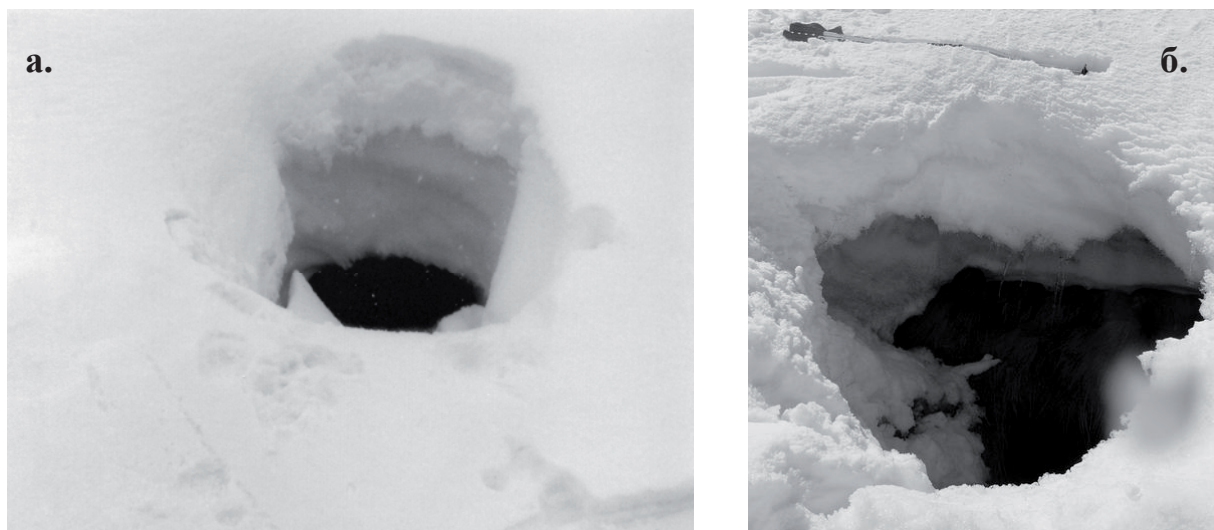
Возобновление вулканической деятельности на Северном Кавказе в настоящее время связывается, в первую очередь, с вулканом Эльбрус [11, 34]. Для прогнозной оценки возможности возобновления активности «спящего» вулкана Эльбрус было необходимо: выяснить, имеются ли под ним магматические камеры и питающий их глубинный очаг, относится ли он по ряду признаков к категории потухших, действующих или потенциально действующих; оценить состояние мантии в районе ЭВЦ по геофизическим данным и величинам гелиевых отношений в спонтанных газах минеральных источников Приэльбрусья и прилегающих территорий; выявить наличие/отсутствие фумарольной активности; провести анализ динамических характеристик вулканизма; определить общую продолжительность жизни ЭВЦ и отдельных стадий его активности; установить частоту повторяемости извержений и продолжительность периодов покоя в голоцене. С этой целью **на первом этапе исследований в 2012 г. по Проекту № 14 В 37.21.0617** Минобрнауки РФ были разработаны методики отдельных видов исследований, а на втором этапе (2013 г.) проведены комплексные исследования с их применением и была разработана система комплексного мониторинга вулканической опасности для ЭВЦ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭВЦ И ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЕГО ПРЕДЕЛАХ

ЭВЦ расположен в системе субмеридиональных разломов, являющихся западным ограничением зоны Транскавказского поперечного поднятия (ТПП), в месте пересечения Эльбрусского разлома с субширотным Сылтранским разломом. В истории развития вулкана выделено три крупных стадии – докальдерная, кальдерная и

посткальдерная с ранними и поздними этапами в двух последних. Возраст каждой из стадий был определен изотопными (K-Ar, U-Pb SHRIMP цирконометрия,  $^{14}\text{C}$ ) и ЭПР-методами датирования [34] и по соотношению отдельных лавовых потоков с «датированными» моренами нижне-неоплейстоценовой, средне-неоплейстоценовой и верхне-неоплейстоцен-голоценовой стадий оледенения. Эльбрус считался потухшим вулканом, но в последнее время получены принципиально новые данные, позволившие пересмотреть эту точку зрения. В конце 1950-х годов в районе Эльбруса была выявлена интенсивная отрицательная аномалия силы тяжести [1, 2, 3]. Ее интерпретация позволила определить основные параметры возмущающего тела и учесть гравитационное влияние вулканического конуса. Верхний срез возмущающего тела расположен ниже основания вулканического конуса Эльбруса, внутри палеозойского фундамента на глубине 0–2 км ниже уровня моря. Избыточная масса определена в  $15 \times 10^{11}$  тонн, а избыточная плотность по отношению к вмещающей породе – 0,5 г/см<sup>3</sup>. Основание тела уходит в древний фундамент до глубины 9 км и более, т. е. под вулканом существует значительный объем вещества с низкой плотностью, которое, вероятно, соответствует магматическому очагу при температуре внутри него не ниже 1 250 °С. В этой связи очень важно отметить, что рядом исследователей [15 и др.] описаны выходы водяного пара с примесью сернистого газа в районе восточной вершины Эльбруса и вдоль некоторых трещин северного склона. Анализ показал его близость по составу к фумаролам современных вулканов [29]. На существование еще не остывшего магматического очага под Эльбрусом указывает типичная для современных вулканических областей фумарольная деятельность, в частности в районе восточного вершинного кратера. Исследования Ю.П. Масуренкова [30] показали, что геотермический градиент под Эльбрусом достигает 100 °С/км при плотности теплового потока до  $5 \cdot 10^{-5}$  кал/см<sup>2</sup>, что более чем в 10 раз превышает фоновый показатель для Центрального Кавказа.

Многочисленные исследователи, сотрудники МЧС КБР и альпинисты отмечают, что с 2002 г. наблюдается активизация фумарольной деятельности в районе восточного вершинного кратера Эльбруса и на седловине, сопровождающаяся образованием линейных проталин и термогровов в снежно-ледовом покрове, выделениями водяного пара и сернистого газа. В апреле 2007 г. нами была обнаружена новая фумарола в 250 м ниже станции канатной дороги «Кругозор» (рис. 1). В 2008 г. она не была активной, но в 2009–2012 гг. она активизировалась вновь, а в 2009–2013 гг. появились новые фумарольные площадки, но уже на 160 м ниже первой.



**Рис. 1.** Новая воронкообразная фумарола, появившаяся в апреле 2007 г. (а) и в апреле 2009 г. (б) в 250 м ниже станции «Кругозор» канатной дороги на Эльбрус. Выделяется сернистый газ

О наличии под Эльбрусом магматического очага свидетельствуют результаты сейсмических и гравиметрических исследований. В районе ЭВЦ были зарегистрированы землетрясения с частотой колебаний 1–2 Гц при устойчивом присутствии на эльбрусских сейсмограммах интенсивной поверхностной волны, что характерно только для районов с современной вулканической активностью [42].

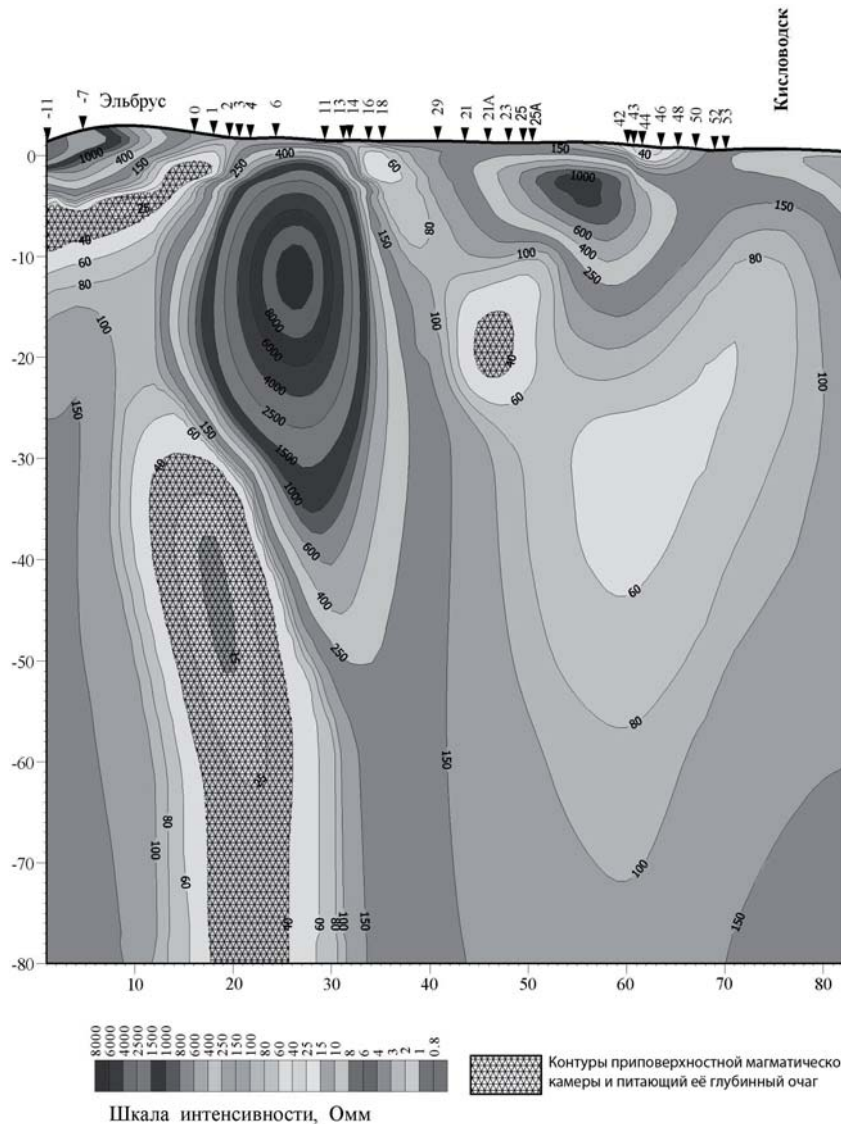
Другим информативным методом геодинимических исследований является регистрация периодических изменений силы тяжести из-за вынужденных колебаний земной коры и верхней мантии под воздействием переменного во времени и пространстве лунно-солнечного потенциала [31]. Наблюдения приливных вариаций силы тяжести на пункте «Нейтрино» выполнялись стационарным приливным кварцевым гравиметром [24]. Обработка А.В. Копеевым полученных данных показала заниженный на 0,6 % отклик земной коры на приливное воздействие на частоте основной лунной полусуточной волны  $M_2$  ( $d_{\text{набл}} = 1,163 \pm 0,005$ ) по сравнению с ожидаемым, моделируемым на основе идеально упругой коры и верхней мантии с учетом поправки на влияние океанических приливов ( $d_{\text{мод}} = 1,170$ ). Возможной причиной этого явления может быть наличие вещества пониженной упругости и, соответственно, повышенной вязкости, т. е. зоны частичного расплава в предполагаемых магматических камерах и питающем их глубинном очаге. Для получения новых данных о наличии/отсутствии магматических камер и питающего их очага были продолжены наблюдения на пунктах «Нейтрино», «Азау» и в пределах выявленных дистанционными методами тепловых аномалий. Эти наблюдения, в сочетании с микросейсмозондированием, магнитотеллурическим зондированием, дистан-

ционными и GPS-технологиями, позволили дать позитивный ответ о наличии магматических камер под положительными устойчивыми тепловыми аномалиями и оценить глубины залегания их кровель и подошв. Вышеуказанные тепловые аномалии были заверены данными автоматических термодатчиков.

Гравиметрические и магнитные данные о наличии под вулканическим конусом Эльбруса приповерхностных магматических камер и питающего их глубинного очага подтверждены магнитотеллурическими исследованиями по Приэльбрусскому профилю, проходившему между восточной и западной вершинами Эльбруса. В итоге построены модели вдоль линии профиля на полную мощность земной коры [6]. Интерпретация данных магнитотеллурических зондирований, выполненных на склонах Эльбруса и в непосредственной близости от него, позволила выявить, что: обнажающиеся на поверхности вулканогенные породы ЭВЦ имеют высокие (>1000 Ом) сопротивления; кристаллическое основание Эльбруса сложено метаморфическими породами и палеозойскими гранитами, имеющими высокие сопротивления (сотни, тысячи Ом). Под устойчивой положительной тепловой аномалией № 1 (данные дистанционного теплового зондирования), на глубине 5–10 км ниже уровня моря зафиксировано резкое снижение сопротивлений до 40 Ом и ниже. Снижение сопротивлений обусловлено тем, что с увеличением температуры до 400–1 000 °С сопротивление горных пород падает на несколько порядков. Это, вместе с данными о том, что разность температур между стенками и центрами периферических очагов андезидацитового состава стратовулканов Камчатки, при их радиусе 3,0–3,5 км, составляет около 1 000 °С [41], позволяет

считать, что объект низкого сопротивления, выявленный под Эльбрусом на глубине 5–10 км, является приповерхностной периферической магматической камерой. Ниже нее, в разрезе коры и несколько севернее г. Эльбрус, на глубинах 25–80 км выявлена еще одна низкоомная аномалия шириной около 15 км, круто (до 80°) погружающаяся на север. Ее контур практически совпадает с контуром низкоскоростной области, выявленной МОВЗ, где скорость продольных волн, по данным томографии, аномально мала. Учитывая, что верхней аномалии проводимости также соответствует аномалия низких скоростей продольных волн, эту аномальную область можно рассматривать как глубокий магматический очаг. Такие параметры глубокого очага, как более высокая проводимость и меньшая скорость сейсмических волн, позволяют предположить, что температура находящегося в нем расплава достаточно высокая. Следовательно, выявлены аномальные участки, которые интерпретируются как промежуточная магматическая камера и питающий ее глубокий очаг. Прогнозируя состав этих аномальных образований, естественно считать, что в районе ЭВЦ в течение длительного временного интервала (после последнего извержения) началась частичная гравитационная дифференциация расплава, и его масса имеет здесь переменную плотность (более легкие газонасыщенные фракции скопились вверху, а тяжелые – внизу камер). В верхних частях магматических камер скопились и газы, что оказало влияние на структуру гравитационной аномалии.

Об активном состоянии верхней мантии под ЭВЦ и возможном плавлении под ее термальным воздействием континентальной коры свидетельствуют величины гелиевых отношений в спонтанных газах из минеральных источников и изотопия Rb, Sr, Sm, Nd [28, 34]. В пределах ЭВЦ имеется около 80 минеральных источников с обильным выделением углекислоты и с максимальной температурой 22–24 °С. Считается, что



**Рис. 2.** Геоэлектрический разрез, отражающий интерпретацию данных, полученных методом магнитотеллурического зондирования по линии Приэльбрусского профиля. Горизонтальная ось – расстояние по профилю в км, вертикальная ось – глубина в км. Слева на разрезе – юг, справа – север [6]

минеральные источники Приэльбрусья имеют ювенильное происхождение, а их корни связаны с тем магматическим очагом, который в прошлом питал извержения вулкана [28].

### ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения данных о наличии периферических магматических камер и питающего их глубокого очага были проведены целенаправленные гравиметрические исследования по серии профилей в контурах выявленных дистанционным зондированием устойчивых положительных тепловых аномалий. Для этого в Баксанской геодинамической обсерватории ГАИШ МГУ

были выполнены абсолютные измерения силы тяжести баллистическим лазерным гравиметром FG-5 с точностью 2 мкГал, что позволило привести результаты всех гравиметрических съемок к единому абсолютному уровню и дать их объективную интерпретацию. После чего в Приэльбрусье А.В. Копаевым (ГАИШ МГУ), при нашем участии, были выполнены гравиметрические наблюдения по 10 профилям кварцевыми термостатированными широкодиапазонными гравиметрами «Содин» при шаге съемки от 200 м до 2 км, что соответствует требованиям к съемке масштаба 1 : 200 000 и точности наблюдений 0,3–0,5 мГал. В результате проведенных исследований создана новая карта аномалий Буге для Приэльбрусья с разделением гравитационного поля на региональную и локальную составляющие. Региональная составляющая отражает притяжение магматического очага и притяжение зоны глубокого магмоподводящего Сылтранского субширотного разлома, к которому приурочены: неоплейстоцен-голоценовые вулкан Эльбрус, серия некков, Сылтранская вулканическая постройка. Остаточное поле локальных аномалий связано с периферическими магматическими камерами, находящимися на глубинах до 10 км. Были выявлены три тела аномальной плотности, соответствующие периферическим магматическим камерам, расположенным под вершинными кратерами Эльбруса на глубинах 3–5 км ниже уровня моря, с диаметром порядка 10 км, с плотностью 2,2–2,3 г/см<sup>3</sup> [8]) и 8–14 км – под Сылтранской вулканической постройкой.

В связи с тем, что вулкан является активным и возможно возобновление его активности в будущем, работы по комплексному изучению ЭВЦ должны быть продолжены, с включением в них и GPS-технологий.

**GPS-измерения** были начаты в 1993–1994 гг. по международной программе «WEGENER» и продолжены в Приэльбрусье летом 2005–2006 гг. Их продолжение при реализации разработанной нами «Программы комплексного мониторинга ...» в течение 6–7 эпох измерений даст важнейшую информацию о: неотектонических процессах; скоростях современных вертикальных и горизонтальных (с определением направлений) перемещений отдельных блоков коры в Приэльбрусье; динамике магматических камер в пределах ЭВЦ.

Анализ имеющихся литературных и наших радиологических данных показал, что Эльбрус сформировался в интервале времени от раннего неоплейстоцена до голоцена включительно, а последние (из продатированных) извержения были 1170–990 С14 лет назад [34]. Начало позднего этапа посткальдерной стадии активности Эльбруса приходится на голоцен, что является одним из важных аргументов в пользу возможного возрождения его активности в будущем.

Аналогичная ситуация описана [48] для вулкана Медисин Лэйк (Каскадные Горы, США), где после периода покоя в 6 000 лет активность вулкана в голоценовое время возобновлялась несколько раз в интервале от 4 300 до 900 лет назад. Эти данные подтверждают отнесение Эльбруса к классу «А» действующих вулканов с датировкой извержений в историческое время и не исключают возможность его будущих извержений. Важно отметить, что возможные вулканические катаклизмы Эльбруса будут сопровождаться катастрофическими воздействиями на природные экосистемы Евразии, в первую очередь юга России, и создавать угрозу жизни людей и экономики ряда регионов Северного Кавказа.

### ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СО СПУТНИКОВ (NOAA, LANDSAT, ASTER) ТЕРРИТОРИИ ПРИЭЛЬБРУСЬЯ

В связи с тем, что в пределах ЭВЦ по геофизическим данным установлено наличие глубокого очага и приповерхностных магматических камер, последние должны прогреть перекрывающие их породы, а это должно отразиться на земной поверхности в виде положительных тепловых аномалий различной интенсивности. Для проверки этого предположения и выявления таких камер нами были привлечены тепловые дистанционные методы зондирования земной поверхности со спутника NOAA.

Метод теплового дистанционного зондирования (ТДЗ) основан на бесконтактном определении плотности потока излучения поверхности в инфракрасном (ИК) тепловом диапазоне длин волн (8–14 мкм), а регистрируемое излучение выражается в значениях радиационной температуры (РТ). Средства ТДЗ могут обеспечить измерение РТ с чувствительностью 0,1 °С, а высокое быстродействие ИК-систем обеспечивает возможность исследования свойств земной поверхности на больших территориях с различной степенью детальности. В приповерхностном тепловом поле отражаются:

- вещественно-структурные неоднородности объектов природного и техногенного происхождения от поверхности до глубины проникновения суточных (0,5–1,0 м), сезонных и годовых (20–50 м) колебаний температуры;
- процессы тепломассопереноса в геологической среде и техногенных объектах;
- экзогенные и эндогенные источники теплового воздействия.

Тепловая инерция (ТИ) пород и веществ характеризует их свойства восприятия и отдачи тепла. Породы и вещества с высокой ТИ характеризуются медленной скоростью восприятия и отдачи тепловой волны и наоборот.

Изучаемые методами ТДЗ поверхности и объекты подвержены процессам нестационарного

теплого воздействия и поэтому информативной оказывается «кажущаяся тепловая инерция» (КТИ), параметр, определяемый по РТ, измеренной в ночное и дневное время в течение небольшого отрезка времени (до недели) [18].

Для построения распределений РТ и различных производных параметров могут быть использованы данные сканирующих радиометров AVHRR 2, 3 (NOAA 11-17), TM и ETM+ (Landsat 5, 7), MODIS и ASTER (Terra). Для решения нашей задачи наиболее приемлемы данные с радиометров AVHRR 2, 3 и спутника ASTER. Обобщение публикаций по обнаружению в приповерхност-

ном тепловом поле проявлений вулканической, тектонической и сейсмической активности показало возможность изучения этих процессов средствами космического теплового зондирования и организации их мониторинга [7, 9, 12, 18, 25, 34, 36, 37, 39, 43, 49, 51]. Методика выявления устойчивых положительных тепловых аномалий над приповерхностными магматическими камерами вулкана Эльбрус со спутника NOAA изложена в [34].

Интенсивность приповерхностных тепловых аномалий, связанных с активными геологическими процессами, обычно варьирует от десятых

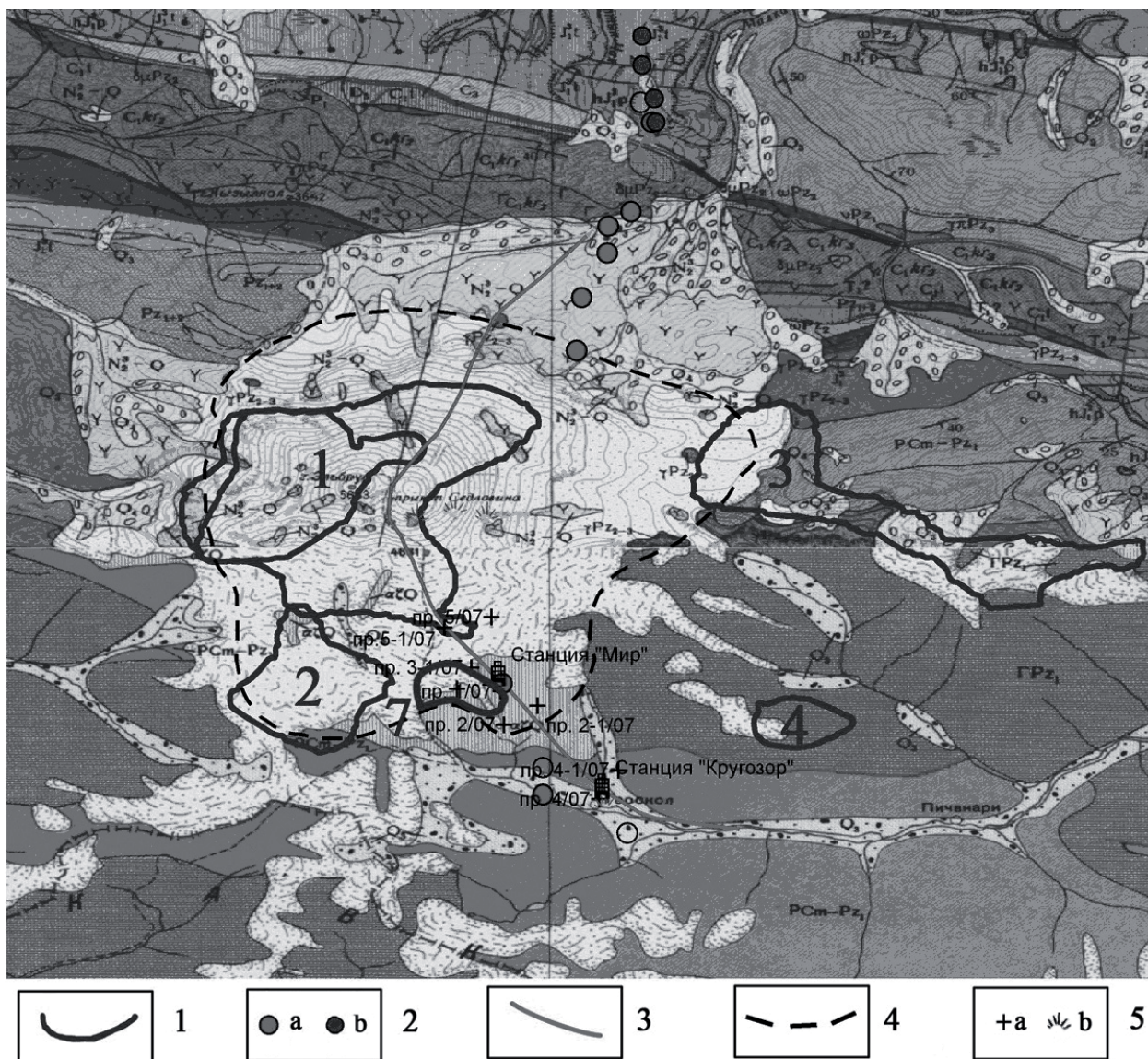


Рис. 3. Карта тепловых аномалий (август 1997–2012 гг.) с учетом результатов геологических и геофизических исследований. Составлена А.Г. Гурбановым, А.Б. Лексиним и О.В. Ляшенко. Условные обозначения: 1 – тепловая аномалия и ее номер; 2 – линия магнитотеллурического и магнитного профилей: а – метод обменных волн землетрясений (МОВЗ), б – магнитотеллурическое зондирование (МТЗ); 3 – границы кальдеры достоверные; 4 – границы кальдеры предполагаемые; 5 – фумаролы (b) и места отбора проб снега для геохимических исследований и их номера (a)



**Рис. 4. Бурные водотоки в районе «Приюта Одиннадцати» (2012 г.)**

долей до нескольких градусов и редко до первых десятков градусов. Анализ данных по тепловой инерции (ТИ) различных типов осадочных, метаморфических и магматических пород, обнажающихся в пределах ЭВЦ, показал, что только во временном интервале 2–4 часа ночи можно получить объективные данные о температурах земной поверхности. Площадь для анализа данных ТДЗ на район ЭВЦ составила 39 × 39 км<sup>2</sup>. В результате обработки данных ТДЗ со спутника NOAA составлена схематическая карта устойчивых положительных тепловых аномалий (рис. 3).

Под положительными тепловыми аномалиями № 1, 1-А, 2, 3 и 7 геофизическими методами (магнитотеллурическое зондирование и гравиметрия по профилям) установлены периферические магматические камеры и питающий их глубинный очаг с расплавом на глубинах 2–8 км и 25–80 км ниже уровня моря, соответственно. Температура расплава, судя по температуре гомогенизации расплавных включений в кварце [40], достигает 1100 °С. О наличии под этими аномалиями камер с еще не остывшим расплавом также свидетельствуют: интенсивное таяние ледников в районе аномалий (это отчетливо видно на восточной вершине Эльбруса и в районе бочки, в районе «Приюта 11» – рис. 4, в 150 м выше станции кресельной дороги «Бочки»); активизация известных и появление новых фумарол с интенсивным выделением водяного пара и сернистого и других газов не только в верхней (район седловины между вершинами), но уже и в нижней части вулканической постройки (ниже станции «Кру-

гозор»); дегазация расплава в периферических камерах, сопровождающаяся образованием аэрозольных облаков и «столбов» ярко-белого свечения над аномалией № 2 (у станции канатной дороги «Мир» и даже над «Поляной Азау» (немного ниже опоры №1 новой канатной дороги – рис. 5).

Необходимо отметить, что если природа аномалий № 1, 1А, 2, 7 и 3 подтверждается данными геофизических исследований, то остальные аномалии требуют дополнительной и целенаправленной проверки геофизическими методами, которые могут доказать наличие/отсутствие под ними приповерхностных магматических камер.

Анализ полученных геолого-геофизических и дистанционных данных, увеличение частоты повторяемости извержений Эльбруса в голоцене и сокращение продолжительности периодов его покоя дали основание считать, что в будущем здесь возможно возобнов-

таться, что в будущем здесь возможно возобнов-



**Рис. 5. «Столб» ярко-белого свечения, появившийся в мае 2012 г. ниже опоры № 1 новой канатной дороги над «Поляной Азау»**



ление вулканической активности, которая будет сопровождаться катастрофическими событиями. В связи с этим возникла острая необходимость внедрения разработанной нами «Программы комплексного мониторинга и анализа признаков вулканической опасности в районе Эльбруса» и гляциологической опасности в пределах ЭВЦ, являющегося как уникальной природной лабораторией, так и возможной потенциальной природной угрозой.

### ПРИЗНАКИ ПОВЫШЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЭЛЬБРУСА

Полевыми наблюдениями на поверхности вулканической постройки Эльбруса выявлены следующие признаки проявления современной активизации вулканических процессов, протекающих на глубине (в магматических камерах и в глубинном очаге):

1. В сентябре 2002 г. под восточным вершинным кратером Эльбруса, на площади около 150 × 250 м, произошло быстрое таяние снежно-ледового покрова, сопровождавшееся выделениями пара и сернистого газа. В результате обнажилась часть лавового потока. В июне 2006 г. эта площадь увеличилась вдвое, а под восточной вершиной Эльбруса, на высоте ~ 5 400 м из-за быстрого таяния ледника обнажились части голоценовых лавовых потоков со стороны долин рек Баксан и Малка, что сопровождалось до 2013 гг. активизацией фумарольной активности с интенсивными выбросами водяного пара и сернистого газа, как из фумарол, так и из трещин в леднике. На обнажившихся лавовых выходах восточной вершины обнаружены новообразованные колонии лишайников, что не характерно для таких высот и, скорее всего, обусловлено постоянными повышенными температурами в пределах аномалий. В западной части аномалии № 1 происходит очень интенсивное отступление ледника Кюкюртли и периодически происходят выбросы пара и чувствуется сильный запах сернистого газа. В районе бокки, расположенной на 350 м ниже восточной вершины Эльбруса, по результатам геолидарной съемки в леднике идентифицированы [4, 5] четыре фумарольных канала, которые в 2012 г. вышли на дневную поверхность. Появление каналов в массивном льду толщиной до 45 м свидетельствует о поступлении в камеру новых порций газонасыщенного расплава из глубинного очага и переходе вулкана в более активную фазу.

2. В пределах тепловой аномалии № 3, в районе перевала Ирик, наблюдается интенсивное таяние снежно-ледового покрова и выделение сернистого газа. В западной части этой аномалии наблюдается интенсивное образование термогратов в леднике, с периодическими выбросами водяного пара и сернистого газа.

3. Во фронтальной части ледника Малый Азау (около озера) в районе тепловой аномалии № 2 установлено, что за период с июля 2001 г. по август 2013 г. произошло интенсивное таяние его «языка» (мощность до 10–15 м) с образованием термогратов, выделением сернистого газа и появлением (26.12.2005 г. с 14.00 до 16.00) над активным разломом субмеридионального простирания «столба» ярко-белого свечения. Все это обусловлено наличием под ледником и под тепловой аномалией промежуточной магматической камеры. Природа этого свечения рассмотрена в [13, 14]. Для расшифровки природы и геохимии этого явления на Эльбрусе начаты комплексные исследования в пределах тепловых аномалий, расположенных над магматическими камерами. По данным В.К. Милюкова [33], расплав в периферических магматических камерах сильно газонасыщен. Изучение петрофизических свойств (плотность, пористость и проницаемость) вулканических пород Эльбруса и метаморфических пород его цоколя показало [13], что дегазация магматического расплава из камер вполне реальна и подтверждена геохимическими и электронномикроскопическими исследованиями [14] проб снега и их сухого остатка (выявлены ультрадисперсные – 2–5 мкм частички галита, сильвина, барита, хлоридов, опала, циркона, халькопирита, самородной платины и др.), отобранных в контурах аномалий. Над тепловыми аномалиями, сформировавшимися над магматическими камерами, лидарной съемкой выявлены тонкодисперсные, аэрозольные облака, а водородной съемкой – потоки водорода [4, 5]. Появление «столбов» с ярким свечением рассматривается как индикатор присутствия под положительной тепловой аномалией камеры с расплавом, имеющим избыточное флюидное давление. В этом случае в камеру должна поступить новая порция газонасыщенного расплава, что повысит в них флюидное давление до величины, равной литостатическому или более него. Наличие над такими камерами зон повышенной проницаемости обеспечивает интенсивную и быструю дегазацию расплава, а в результате взаимодействия выходящих газов и/или микроэлементов с ультрафиолетовым космическим излучением или солнечным светом может возникнуть свечение в виде «столбов». При изучении геохимических аспектов этого свечения и оценки масштабов выноса газами ряда элементов бралось отношение их содержаний в основной пробе снега к фоновой (находится за пределами аномалий) и получалась относительная величина превышения (в разы) над содержанием конкретного элемента в фоновой пробе. Геохимический анализ отобранных проб показал (табл. 1), что в районе «столбов» свечения у восточного края тепловой аномалии № 2 наблюдаются повышенные (в разы) концентрации: Al – 28; Hg, Li, Sr – 25; W, Ca – 13; Cu, Mo – 10; Pb, Zr – 7; B, Ti, Rb – 6; Th – в

Результаты геохимического анализа (в мкг/л) проб снега методом ICP MS

Элемент	Пред. обн. мкг/л	1/07	2/07	2-1/07	3/07	3-1/07	4/07	4-1/07	6/09	5/07	5-1/07
Li	0.2	2.36	2.34	1.80	0.25	0	0	0	0.52	0.29	0.55
Be	0.05	0.18	0.10	0.10	0	0	0.19	0	0	сл.	0.07
B	3.0	38.36	68.27	37.49	9.47	1.54	0	0	0	70.2	41.03
F	-	25349	35027	24939	3809	1498	4765	5219	не опр.	7319	12848
Na	40.0	7742	14254	3131	6780	4630	329	424	93.8	5707	2903
Mg	3	528.5	2275	233.7	886.6	787	203	37.68	183.1	859.3	754.5
Al	10	103	162.3	61.84	28.47	0	143	24.81	0.55	31.98	92.85
Si	-	8961	12628	9373	2113	1679	2955	2943	-	5122	3625
P	-	1226	1592	1149	162.7	119.3	217	296.2	-	589	292.7
S	-	3031	4465	3362	1004	878.4	1021	1086	111.8	1451	1854
Cl	-	29878	38956	11464	7620	5058	1084	771.1	не опр.	9617	4059
K	-	6531	12719	5556	4647	4987	2912	5008	293.5	5768	5042
Ca	300	2469	10865	862.6	2718	1511	701	373.3	112.8	2746	4170
Sc	0.1	4.40	6.74	4.67	1.35	0.55	1.33	1.15	-	1.68	2.58
Ti	0.4	12.06	27.65	4.89	1.66	0	1.60	1.31	-	3.21	6.88
V	-	6.63	12.84	4.37	2.94	1.56	0.68	0.72	0.52	3.18	2.34
Cr	0.5	4.80	6.82	3.97	1.48	0.34	1.38	1.21	-	2.45	2.79
Mn	0.2	7.31	29.90	7.69	0.45	0	6.18	4.87	0.65	1.40	1.63
Fe	30	635.9	1021	625.2	85.18	40.07	175	126.1	31.88	270	185.5
Co	0.05	0.36	0.83	0.45	0.14	0.10	0.13	0.17	1.75	0.22	0.37
Ni	4	8.81	37.63	7.94	0	0	0	0	0.04	1.64	0.91
Cu	3	7.70	50.06	4.93	2.58	1.28	1.37	1.61	3.6	281	103.9
Zn	5	73.28	137.1	40.96	24.55	14.36	90.6	0	5.53	6.57	4.71
Ga	0.02	0.05	0.14	0.10	0.04	0	сл.	0.03	3.9	0.09	0.02
Ge		0.06	0.1	0.07	0.06	0	0	0.01	0.21	сл.	0.08.
As		1.73	2.49	1.18	0.64	0.97	0.80	0.39	-	0.62	0.41
Se	5	12.11	12.28	17.10	6.15	1.66	0	7.45	0.11	0	2.15
Br	-	343.5	488.5	306.4	113.1	44.3	0	0	-	122	114.6
Rb	0.05	2.49	4.76	0.83	1.43	0.75	0.17	0.22	-	2.01	0.61
Sr	0.5	5.50	33.10	1.31	5.45	2.77	1.83	1.47	3.38	5.54	6.57
Zr		0.14	0.38	0.05	0.18	0.13	0.08	0.06	0.02	0.06	0.14
Nb	0.02	0.01	0.37	сл.	0.01	0.05	сл.	0	0.24	сл.	сл
Mo	0.05	0.31	1.13	0.12	3.07	6.75	0.34	0.04	0.04	0.33	0.33
Ag	0.05	0.18	0.21	0.06	0	0	0	сл.	0.12	0	0
Cd	0.1	0.16	0.89	0.26	0	0.04	0.09	0	2.84	0.17	0.06
Sn	0.1	0.73	1.96	0.92	0	0	0	0	0.06	0.17	0
Sb	0.05	0.10	0.28	0.11	0	0	0	0	0.56	0	0
I	0.1	8.41	15.81	5.80	3.31	1.46	0.91	2.11	не опр.	6.69	3.37
Cs	0.05	0.05	0.09	0.06	0.02	сл.	0.08	0.04	-	0.04	0.02
Ba	0.1	21.96	35.56	16.18	1.38	0	3.01	0.63	0.06	2.08	1.06
La	0.02	0.36	0.41	0.27	0.44	0.15	0.08	0.10	0.27	0.10	0.09
Ce	0.02	0.54	0.89	0.43	1.09	0.20	0.09	0	0.06	0.22	0.09
Pr	0.01	0.05	0.09	0.05	0.02	0.02	0.02	сл.	0.10	0.05	0.04
Nd	0.04	0.16	0.14	0.10	сл.	0.01	0.12	0.03	≤0.01	0.04	0.05
Sm	0.04	0.06	0.07	0.08	0	0	0	0.04	0.03	0.08	0
Eu	0.03	0.01	0.03	0.02	сл.	сл.	0	сл.	≤0.01	0.04	сл
W	0.05	0.18	0.91	0.07	4.0	12.60	1.06	0.05	0.02	0.36	0.18
Re	0.05	0.01	0.05	0.05	0.08	0.08	0.01	0	34.87	0	сл.
Os	0.01	0.01	0.04	0.01	0	0	0	0	-	сл.	0
Pt	0.05	0.07	0.12	0.03	сл.	0	0	0	≤0.01	0.01	0
Au	0.01	0.09	0.10	0.06	0.11	0.05	0.03	0	2.41	0.04	0
Hg	0.2	0.59	12.18	0.48	8.91	0.71	0	0.04	0.02	0.70	0.43
Tl	0.02	0.05	0.06	0.03	0	0.04	0	0	-	0.01	0
Pb	0.3	1.48	5.04	0.73	0.26	0	1.0	0	≤0.01	0.40	0.37
Bi	0.02	0.06	0.04	0.02	0	0.05	0.04	0.03	0.39	0.03	0
Th	0.01	0.03	0.05	0.01	0	0.01	сл.	0	≤0.01	сл.	сл.
U	0.01	0.02	0.11	0.05	0.14	0.06	0.02	0.01	0.01	0.06	0.02

5; Cr, Mn, Ni, Zn, Se, Ag, Cd – 3,5–4,5; Sb, F, Sc, V, I – в 2,5. В западной части тепловой аномалии № 2 и у станции «Мир» канатной дороги установлены повышенные содержания: В – в 426; Hg – 28; Na, Ba – 20–23; Zn – 15; Ni – 9; Bi, Sn, Li – 6–8; Mn, Sc – 5; Ti, Rb, – 4; F, Cl, Al, Th, Br, As, Mg, Au – в 3,5–2,5 раза по сравнению с фоновыми пробами снега.

*Примечание.* Расположение тепловых аномалий показано на рис. 3. Места отбора проб снега: 1/07 – над маленькой тепловой аномалией № 7 в районе станции канатной дороги «Мир»; 2/07 – в месте столба свечения, расположенного между станциями канатной дороги «Мир» и «Кругозор»; 2-1/07 – фоновая проба, расположенная в 350 м западнее места отбора пробы 2/07; 3/07 – новый столб свечения, расположенный напротив станции «Мир»; 3-1/07 фоновая проба, отобранная в 200 м восточнее пробы 3/07; 4/07 – новая фумарола, появившаяся в марте 2007 г. в 250 м ниже по склону от станции «Кругозор»; 4-1/07 – фоновая проба, отобрана в 150 м восточнее; 6/09 – та же фумарола, но более активная в 2009 г.; 5/07 – зона повышенной трещиноватости над южным краем тепловой аномалии № 1-А (район ледника Гарабаши) в 700 м выше по склону от станции «Мир»; 5-1/07 – фоновая проба, отобрана в 200 м к востоку от аномалии.

Рассмотрим особенности фумарольной активности на примере новой фумаролы, выявленной в марте 2007 г. ниже станции канатной дороги «Кругозор». Диаметр ее канала ~ 0,7 м и глубина в снегу до 1,7 м. Из микротрещин в почве выходил пар со слабым запахом сернистого газа. Температура почвы достигала + 12 °С, а внешнего воздуха – 10 °С. В 2008 г. эта фумарола не была активной. В марте-апреле 2009–2010 гг. она вновь активизировалась. Диаметр термоканала составил ~ 1,5 м и уходил на глубину до 2 м. Температура почвы доходила + 16 °С, а внешнего воздуха – 13 °С и ощущался сильный запах сернистого газа. Появление этой фумаролы в нижней части вулканического конуса свидетельствует об активизации вулканических процессов на Эльбрусе.

Результаты анализов проб льда, взятых из термоканала, приведены в таблице № 1. Сравнительный анализ этих двух проб льда из фумарольных каналов (4/07 и 6/09) показал следующие изменения в геохимии при дегазации. В 2009 г., по сравнению с 2007 г., с газами и водяным паром выносились: меньшие количества Be, Si, P, Sc, Ti, Cr, As, Rb, Cs; а Na, Zr, W – в 3–5 раз; Sb, K, Ca, Mn, Mo, Nd – в 10 раз; Zn – в 18 раз; Pb – в 100 раз; Al – в 260 раз; и большие количества: Li, Fe, Ga, Ge, Se, Nb, Ag, Sn, Sb, Sr, Hg, Pt – в 2 раза; а Cu, Cd, Pr – в 3–5 раз; Au, Co, Bi – в 8–10 раз; Re – в 340 раз.

Такая картина, вероятно, отражает поступле-

ние новой порции расплава в магматическую камеру и изменение его геохимического состава.

Наличие процесса дегазации в пределах положительных тепловых аномалий [13, 19, 20] и появление над ними аэрозольных облаков [4] убедительно свидетельствует об активном состоянии вулкана Эльбрус.

## ВЫВОДЫ

Проведенные комплексные геолого-геофизические и дистанционные исследования позволяют с высокой вероятностью констатировать следующее:

1. На основании полученных новых данных оценено современное состояние Эльбруса как действующего, но пока «спящего» вулкана, постепенно переходящего за последние 13 лет в более активную фазу. Наиболее вероятный сценарий его пробуждения предполагает взрывной характер извержения и связанные с ним катастрофические события.

2. Установлены следующие признаки перехода Эльбруса в более активную фазу: формирование новых периферических камер, фиксирующихся дистанционными методами в виде устойчивых положительных тепловых аномалий; периодически проявляющаяся фумарольная активность в разных частях вулканической постройки; плотность теплового потока в районе ЭВЦ, в 10 раз превышающая фон для Центрального Кавказа; появление в процессе дегазации расплава в магматических камерах «столбов» ярко-белого свечения над зонами повышенной проницаемости в их кровле, что свидетельствует о поступлении в камеры новых порций газонасыщенного расплава; проявление на вулканической постройке малоамплитудных тектонических (сеймо-вулканических) подвижек; выявленная закономерность, заключающаяся в увеличении, к концу голоцена, частоты повторяемости извержений при сокращении продолжительности периодов покоя в вулканической активности.

3. Наличие ПОЗ, зоны сейсмодислокаций овальной формы и зоны сейсмического затишья, совпадающих с границами эльбрусской кальдеры, убедительно свидетельствуют о наличии большого объема расплава под ЭВЦ, находящегося в выявленных периферических магматических камерах и питающем их глубинном очаге. Это свидетельствует об активном состоянии «спящего» вулкана Эльбрус.

4. Величины изотопных отношений гелия (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) в спонтанных газах термальных минеральных источников Приэльбрусья свидетельствуют об активном состоянии мантии под этим регионом.

5. Важнейшей задачей комплексного изучения строения вулкана Эльбрус является про-

гнозирование участков возможных извержений путем выявления активных сейчас зон тектонических нарушений над известными периферическими магматическими камерами.

6. Существование прямой зависимости между проводимостью горных пород и их температурой позволяет рекомендовать мониторинг проводимости вулканических камер и питающего их глубинного очага методом МТЗ с периодичностью 1 раз в 2 года. Это поможет изучать их вариации и при устойчивом увеличении проводимости, а значит и температуры, прогнозировать активизацию вулканических процессов, как в отдельных магматических камерах, так и в питающем их глубинном очаге.

7. Возможная активизация Эльбруса в будущем делает необходимым проведение мониторинга активности вулкана Эльбрус (по разработанной нами «Программе...») с применением геологических, геофизических (включая анализ спектров мод деформационных полей) исследований, дистанционных методов и GPS-технологий.

#### **ПРОГРАММА КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА С ОТСЛЕЖИВАНИЕМ И АНАЛИЗОМ ПРИЗНАКОВ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЭВЦ**

На основании анализа выявленных закономерностей в эволюции вулканизма в пределах ЭВЦ и особенностей проявления вулканической активности в пространстве и времени дана оценка современного состояния вулкана и показана возможность возобновления вулканической активности в его пределах.

С учетом выявленных критериев перехода «спящего» вулкана Эльбрус в более активную фазу развития разработана «Программа комплексного мониторинга с отслеживанием и анализом признаков вулканической опасности для ЭВЦ». В рамках «Программы комплексного...» дальнейшей перспективой применения дистанционных методов является использование тепловых космических снимков высокого пространственного разрешения (60–90 м) со сканера ASTER спутника Terra, осуществляющего съемку, как в дневное, так и ночное время суток. На их основе возможно наблюдение за изменением приповерхностного теплового поля, как над зонами неотектонических нарушений, так и над периферическими магматическими камерами. Это поможет более детально расшифровать динамику как положительных тепловых аномалий, а соответственно, и обусловивших их магматических камер, так и зон активных разломов в пространстве и во времени.

Кроме того, необходимы исследования на тестовых участках с известными и хронометри-

рованными извержениями вулканов (например, вулканы Камчатки), которые позволят выявить характерные тенденции в динамике приповерхностного теплового поля, предшествующие извержениям.

Исходя из опыта проведенных исследований, разработана «Программа комплексного мониторинга ....», направленная на снижение степени риска, людских потерь и минимизацию возможного материального ущерба от вулканических катастрофических событий и их последствий. Для внедрения этой Программы уже готовы к использованию: созданные нами карты устойчивых положительных тепловых аномалий; данные о расположении и глубинах залегания кровель и подошв магматических камер и питающего их глубинного очага; места выходов фумарол и «столбов» ярко-белого свечения; расположение зон активных разломов. При реализации Программы для отслеживания и анализа признаков нарастания вулканической опасности и расшифровки их динамики необходимо привлекать высококвалифицированных специалистов в областях: вулканологии, геологии, геофизических, сверхточных геодезических (GPS-технологии) методов исследований; теплового дистанционного зондирования, а для компьютерного моделирования извержения и связанных с ним катастрофических событий – специалистов в области ГИС-технологий.

Содержание «Программы комплексного мониторинга....» и последовательность ее реализации приведены ниже.

1. Ежегодные наблюдения за динамикой уже выявленных устойчивых положительных тепловых аномалий, расположенных над предполагаемыми периферическими магматическими камерами и за появлением новых тепловых аномалий. Осуществляется с помощью ежегодной (или посезонной) обработки материалов ночного теплового дистанционного зондирования. Обработка материалов дистанционного зондирования должна проводиться в ИК и в видимом диапазонах за летний и зимний периоды. Ее необходимо проводить в ретроспективе за 15–20 лет. Выявленные аномалии интерпретируются и разбраковываются (с геологической точки зрения) для выделения «устойчивых» положительных тепловых аномалий, которые предположительно могли быть обусловлены приповерхностными магматическими камерами. Предлагаемый метод космического теплового дистанционного зондирования является экспрессным и недорогим. Его применение позволит: ускорить предварительный этап работ по выявлению признаков наличия/отсутствия приповерхностных магматических камер в пределах вулканических центров; определить минимально необходимое количество геофизических (гравиметрическое, сейсмическое и

магнитотеллурическое зондирования) и GPS-профилей и наметить на топоосновах места их заложения. В итоге будет значительно снижена стоимость работ по этапу, за счет рационального расположения геофизических и GPS-профилей.

2. Ежегодные полевые наблюдения за известными фумаролами, с фиксацией мест возникновения новых фумарол и динамикой их активности с использованием данных теплового дистанционного зондирования и наземных автоматических термодатчиков, устанавливаемых на аномалиях, фумарольных площадках и фоновых датчиков, фиксирующих все колебания температур через каждые 2 часа в течение года. Особое внимание уделяется наблюдению за появлением над магматическими камерами «столбов» ярко-белого свечения, что будет свидетельствовать о поступлении в камеры новых порций газонасыщенной расплава и повышении в них флюидного давления. Геологическое обследование выявленных дистанционными методами положительных тепловых аномалий на местности, с фиксацией на топооснове: участков интенсивного таяния снежно-ледового покрова; мест выброса водяного пара и сернистого газа; новообразованных или активизировавшихся старых фумарол; мест появления столбов ярко-белого свечения. Выбор на местности участков для заложения геофизических и GPS-профилей.

3. Геофизические исследования проводятся с периодичностью 1 раз в 2 года по намеченным профилям. После выбора на местности мест для геофизических профилей и пунктов закладки постоянных постаментов для проведения измерений, строятся постаменты. Причем линии перпендикулярно пересекающихся редких профилей должны проходить через все поле устойчивой тепловой аномалии и выходить на 0,6–1,0 км за ее пределы. Затем на выбранных профилях проводится первая эпоха геофизических (гравиметрия, сейсмическое и магнитотеллурическое зондирования) исследований. Одновременно с ними (на тех же постаментах) проводятся и GPS-измерения скоростей вертикальных и горизонтальных перемещений блоков пород. В результате будет получена информация: о наличии/отсутствии под аномалиями периферических магматических камер и питающего их глубинного очага; об их формах и размерах; глубинах залегания их кровель и подошв. Последующие эпохи измерений дадут информацию о динамике магматических камер и глубинного очага.

4. Проведение на стационарных пунктах (постаменты) геофизических профилей ежегодных сверхточных геодезических (GPS-технологии) измерений скоростей вертикальных и горизонтальных перемещений блоков пород над приповерхностными магматическими камерами. Эти измерения должны проводиться непосред-

ственно до или сразу же после геофизических исследований. Первая эпоха измерений даст точные координаты пунктов наблюдений, а все последующие эпохи – скорости смещений относительно исходных координат и высотных отметок. Профили GPS-измерений должны также выходить на 0,5–1,0 км за пределы контуров устойчивых положительных тепловых аномалий. Проведение этих измерений даст возможность оценить скорости подъема или опускания и горизонтальных перемещений земной поверхности в контурах тепловых аномалий, а следовательно, и над магматическими камерами. Подъем земной поверхности в пределах аномалий, скорее всего, будет обусловлен поступлением в камеры новых порций расплава, что приведет к увеличению их объемов и будет свидетельствовать о возможном будущем извержении в месте ее нахождения. Если же происходит опускание земной поверхности в контурах тепловых аномалий, то это значит, что новые порции расплава не поступают в камеры, а находящийся в них расплав остывает и постепенно кристаллизуется (происходит уменьшение его объема), что неизбежно должно сопровождаться опусканием поверхности над камерой. В этом случае возобновление вулканической активности здесь маловероятно. GPS-измерения по зонам активных разломов дадут информацию о скоростях вертикальных и горизонтальных перемещений по ним.

5. Анализ результатов геологических исследований в районах выявленных дистанционными методами положительных тепловых аномалий (появление новых фумарол или активизация старых, выбросы водяного пара, сернистого и других газов, появление столбов ярко-белого свечения, интенсивное таяние снежно-ледового покрова), в сочетании с результатами геофизических и GPS-исследований, поможет разбавить тепловые аномалии и выявить среди них «устойчивые», под которыми находятся магматические камеры с расплавом.

6. Ежегодное нанесение на геологическую карту и разрезы к ней результатов геологических (активные разломы, фумаролы), дистанционных (контуров тепловых аномалий, активные разломы), геофизических (глубины залегания кровель и подошв магматических камер и питающего их очага) и геодезических (данные GPS-измерений вертикальных и горизонтальных скоростей перемещения блоков) исследований и их анализ. Это поможет расшифровать динамику эндогенных процессов.

7. Экспертная оценка, по комплексу выявленных признаков, нарастания вулканической опасности, с указанием предполагаемого местонахождения эруптивных центров будущих извержений, и в зависимости от этого – типов и масштабов возможных катастрофических событий

при возобновлении вулканической активности.

8. Компьютерное моделирование с ежегодным обновлением картины вулканической опасности, возможных типов извержений и сопутствующих катастрофических событий.

9. По совокупности всех полученных комплексных данных ежегодно проводятся: анализ этих данных, а на его основе – построение конкретной картины: поведения расплава, газов в камерах; перемещения блоков пород над приповерхностными магматическими камерами; динамики фумарольной активности и выявление мест, где возможно рождение новых вулканов или эруптивных центров в пределах ЭВЦ.

10. Составление многофакторных карт-накладок и сводной карты риска возобновления вулканической опасности и связанных с ней возможных типов катастрофических событий.

11. На основании анализа результатов комплексных исследований, указанных в пунктах 1–6 «Программы...»); расчетов по динамике объемов расплава в магматических камерах (по глубинам залегания кровель и подошв); скоростей вертикального подъема над камерами блоков коры (т. е. скоростей всплывания расплава к дневной

поверхности) и с учетом неотектоники делается приблизительный расчет времени и места, в котором расплав может достичь дневной поверхности. Это время и может быть временем начала возможного будущего извержения в данном конкретном месте. Знание мест проявления, типов и масштабов катастрофических событий, связанных с прошлыми извержениями в пределах ЭВЦ, поможет оценить типы, масштабы возможных будущих катастрофических событий и места их вероятного проявления при возобновлении вулканической активности. На основе этих данных проводится компьютерное моделирование для выявления возможных мест извержений и связанных с этим катастрофических событий. В итоге будут составлены карты риска возобновления вулканической опасности и связанных с ними катастрофических событий. Такие карты помогут снизить степень риска, количество людских потерь и минимизировать возможный материальный ущерб от вулканических катастрофических событий и будут представлять несомненный интерес для администраций республик и краев Северного Кавказа, региональных управлений МЧС и МЧС России.

*Работа выполнена при финансовой поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0617 от 15 августа 2012 г.); Программы 4 Президиума РАН, Направления 3, Проекта 3.5, подпроекта «Современные изменения природной среды Северного Кавказа», гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ 2012–2013 гг. (проект НШ-2721.2012, руководитель академик О.А. Богатиков).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Авдулов М.В.** О геологической природе гравитационной аномалии Эльбруса // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1962. № 9. С. 67–74.
2. **Авдулов М.В.** Строение земной коры по данным гравиметрии на Центральном Кавказе // Сов. геология. 1963. № 9. С. 73–89.
3. **Авдулов М.В., Короновский Н.В.** О геологической природе Эльбурского гравитационного минимума // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1993. № 3. С. 32–39.
4. **Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Дканиялов М.Г., Фомичев В.В. и др.** Научно-технический отчет по результатам комплексной экспедиции на Эльбрус, июнь 2007. «Изучение фумарольной активности вулкана Эльбрус, исследование состава тектонических аэрозолей и фирна». – Москва, ИЗМИРАН, 2007. 33 с.
5. **Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Бобков А.В., Дканиялов М.Г.** Изучение вулканических аэрозолей на вулканах Авачинский, Корякский, Эльбрус. Связь потока аэрозолей с деформациями поверхности. Магматизм и рудообразование. Матер. конференции, посвященной 125-летию со дня рождения акад. А.Н. Заварицкого. 18–19 марта 2009 г. – М.: ИГЕМ РАН. 2009. С. 10–12.
6. **Арбузкин В.Н., Компаниец М.А., Швец А.И., Греков И.И., Литовко Г.В. и др.** Отчет о комплексных геолого-геофизических исследованиях по Приэльбурскому профилю. Фонд ФГУП «Кавказгеолсъемка», Ессентуки. 2002. 120 с.
7. **Аэрокосмические методы в геоэкологии.** Под ред. В.И. Лялько. – Киев: Наукова думка, 1992. 205 с.
8. **Богатиков О.А., Гурбанов А.Г., Мелекесцев И.В. и др.** Проблема активизации вулкана Эльбрус (Северный Кавказ) и возможные ее последствия // Глобальные изменения природной среды / Мин. науки и технологий РФ, РАН. – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ. 1998. С. 153–164.
9. **Бойков А.М., Корниенко С.Г.** Отражение долговременной сейсмической активности на температурных картах по данным космической съемки / Геодинамика и сейсмичность Восточного Кавказа. Материалы научно-практической конференции 2–5 сентября 2002 г., Махачкала, 2002. С. 10–12.
10. **Большой Кавказ в альпийскую эпоху** // Отв. ред. Ю.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2007, 368 с.
11. **Геодинамика, сеймотектоника и вулканизм Северного Кавказа** (Автор. коллектив: Е.А. Рогожин, Л.Е. Собисевич, Ю.В. Нечаев, А.Л. Собисевич, О.А. Богатиков, А.Г. Гурбанов, В.И. Коваленко, В.М. Газеев, Б.Г. Поляк, Б.Г. Покровский, В.Ю. Лаврушин, В.И. Куликов, И.В. Мелекесцев, Д.Г. Кацуг, В.К. Милуков, А.В. Копаев / Под ред. акад. Н.П. Лаврова. – М.: ОИФЗ РАН. 2001. 336 с.
12. **Горный В.И.** Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности / Докл. АН СССР. 1988, т. 301, № 1, с. 67–69.
13. **Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Цуканова Л.Е., Лексин А.Б. и др.** Приповерхностные магматические камеры «спящего» вулкана Эльбрус (Россия): новый вид дегазации расплава, ее геохимические особенности и рудная минерализация // Вестник Владикавказского научного центра РАН, 2009, т. 9, № 2, С. 24–36.
14. **Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Цуканова Л.Е., Лексин А.Б., Газеев В.М., Мохов А.В., Голностаева Т.А., Жариков А.В., Шмонов В.Б., Докучаев А.Я., Горбачева С.А., Шевченко А.В.** Необычные виды дегазации из расплавов периферических магматических камер «спящего» вулкана Эльбрус (Россия): геохимические и минералогические особенности // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 3–20.
15. **Гусев А.М.** Эльбрус. – М.: Гостехиздат. 1948. С. 5115.
16. **Гущин И.И.** Извержения вулканов мира. Каталог. – М.: Наука. 1979. С. 474.
17. **Джирбациян Р., Карапетян С., Бигаззи Г.** Новые данные по геохронологии и геохимии позднеколлизийных

риолит-обсидиановых куполовидных вулканов в Армении: изотопная датировка геологических процессов – новые методы и результаты. Материалы I-й Российской конф. по изотопной геохимии. – М.: GEOS. 2000. С. 128–130.

18. **Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Корниенко С.Г. и др.** Космические методы выявления зон активной тектоники и современной геодинамики / Наука и техника в газовой промышленности, 2000, № 2, с. 76–82.

19. **Жариков А.В., Витовцова В.М., Гурбанов А.Г.** Транспортные свойства пород Эльбрусского вулканического центра (по экспериментальным данным) // Ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ЕСЭМПГ – 2009 14–15 апреля 2009 г.). РАН Отдел наук о земле, ИГЕМ, ГЕОХИ им. Вернадского, ИЭМ, РФФИ. М.: 2009. С. 28.

20. **Жариков А.В., Бурмистров А.А., Гурбанов А.Г.** Филтрационные свойства пород Эльбрусского вулканического центра // Вестн. ОНЗ РАН. Т. 2. 2010. С. 88–94.

21. **Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев И.М.** Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. – М.: Недра. 1976. 230 с.

22. **Карпетян К.Н.** Вулканы Гегамского нагорья. В кн.: Новейший вулканизм некоторых районов Армянской ССР. – Ереван. Изд. АН Арм. ССР. 1973. С. 5–62.

23. **Караханян А., Джрбашян Р., Трифонов В., Флип Э., Аракелян С.** Активные вулканы и вулканическая опасность на территории Армянского нагорья и сопредельных областей // Изв. НАН РА. Науки о земле, 2004. LVII. № 1. С. 3–24.

24. **Копаев А.В., Юшкин В.Д., Леонтьев И.А.** О возможности наблюдений земных приливов модернизированными кварцевыми гравиметрами Содин // Докл. АН СССР. 1993. Т. 333. № 1. С. 90–93

25. **Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г.** Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловых космической съемки // Вестн. Владикавказского научн. центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 25–40.

26. **Курчавов А.М.** Зональность орогенного вулканизма и проблемы ее геодинамической интерпретации // Литосфера. 2004. № 3. С. 71–83.

27. **Курчавов А.М.** Латеральная изменчивость и эволюция орогенного вулканизма складчатых поясов, геотектоника. 1994. № 2. С. 3–18.

28. **Лаверушин В.Ю., Поляк Б.Г., Дубинина Е.О. и др.** Новейший вулканизм и углекислые воды Северного Кавказа // Сб. Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии. М.: ИФЗ РАН, КБГУ им. Х.И. Бербекова. РООУ ППГ, 2005. С. 128–155.

29. **Масуренков Ю.П.** Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области. М.: Тр. ИГЕМ. – М.: АН СССР. 1961. 132 с.

30. **Масуренков Ю.П.** Плотность теплового потока и глубина залегания магматического очага под вулканом Эльбрус // Бюл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 79–82.

31. **Мельхиор П.** Земные приливы. – М.: Мир. 1972. 688 с.

32. **Милановский Е.Е.** Орогенный вулканизм и тектоника Кавказа. Тезисы докл. Международн. коллоквиума по тектонике Альпийской складч. области Евразии и Малой Азии. Тбилиси. 1965. С. 78–79.

33. **Милюков В.К.** Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 1–13.

34. **Новейший и современный вулканизм на территории России.** (Отв. ред. Н.П. Лаверов. Авторский коллектив: Н.П. Лаверов, Н.Л. Добрецов, О.А. Богатиков, В.Г. Бондур, А.Г. Гурбанов, В.И. Коваленко и др.). – М.: Наука. 2005. 604 с.

35. **Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В. и др.** О соотношении проявлений вулканизма и землетрясений на Северном Кавказе в голоцене // Физика Земли. 2005. № 3. С. 33–46.

36. **Савин А.В.** Разномасштабные проявления геотермической активности // Тез. докл. Междунар. симпозиума «Тепловая эволюция литосферы и ее связь с глубинными процессами». – М.: Недра. 1989. С. 125–126.

37. **Сардаров С.С. (мл.), Савин А.В., Суетнова Е.И.** Геотермический критерий тектонической активности / Геофизические методы в геотермии: Сб. научн. тр. Института проблем геотермии Даг. ФАН СССР, 1986, вып. 6. С. 5–9.

38. **Свансон Д.А., Касадевалл Т.Дж., Дзуризин Д., Ньюхолл С. и др.** Прогнозы и предсказания извержений вулкана Сент-Хеленс, США // 27-й Международн. геол. конгресс, коллоквиум Об. землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. Доклады. Т. 6. М., 1984. С. 92–105.

39. **Современные изменения в литосфере под влиянием природных и антропогенных факторов / В.И. Осипов, А.Л. Яншин, И.И. Молодых и др.; Гл. Ред. В.И. Осипов.** – М.: Недра, 1996. 222 с.

40. **Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гурбанов А.Г. и др.** Состав магматических расплавов вулкана Эльбрус и Казбек (Кавказ) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2001. № 4. С. 441–448.

41. **Федотов С.А.** О входных температурах магм. образований, размерах и эволюции магм. очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. № 4. 1980. С. 3–29.

42. **Хитаров Н.И., Шукин Ю.К., Сизов А.В.** К оценке активности вулкана Эльбрус // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275, № 4. С. 952–984.

43. **Христофорова Н.Н.** Конвективные ячейки в мантии и тепловой поток / Георесурсы, 2001, № 1. С. 20–27.

44. **Черняевский Г.А., Яникян В.О., Мириджанян Р.Т.** Некоторые результаты глубинного магнитотеллурического зондирования на территории Армянской ССР // Изв. АН АРМ. ССР. Науки о земле. 1980. № 6. С. 43–50.

45. **Ширинян К.Г., Аджимамудов Э.Б.** Тектонические условия новейших вулканических проявлений Армении (по данным геофизических исследований). В сб. Вулканизм и глубинное строение Земли. Тр. II Всесоюзн. вулканолог. совещания. Т. 3. – М.: Наука. 1966. С. 82–89.

46. **Ширинян К.Г., Карпетян С.Г.** О возможности возобновления вулканической деятельности на Армянском вулканическом нагорье // Изв. НАН РА. Науки о земле. 2004. LVII. № 2. С. 3–8.

47. **Dickinson W. R., Hatherton T.** Andesitic volcanism and seismicity around the Pacific // Science. 1967. vol. 157. N 3790. P. 801–803.

48. **Donnelly-Nolan J.M, Champion D.E., Miller C.D. et al.** Post – 11000 year volcanism at Medicine Lake volcano, Cascade Range. Northern California // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N 812. P. 19693–19704.

49. **Savin A.V., Kornienko S.G.** Surface anomalies of temperature as indicators of new geodynamics // Proceedings of the International Conference «The Earth's Thermal Field and Related Research Methods», May 19–21, 1998, Moscow, Russia, pp.241–243.

50. **Smith R.B., Christiansen R.L.** Yellowstone Park as a window on the Earth interior // Sci. Amer. 1980. vol. 242. N 2. P. 104–117.

51. **Tronin A.A.** Thermal Infrared Satellite Data for Seismic Area Research (Japan, China and Europe) // Proceedings of the International Conference «The Earth's Thermal Field and Related Research Methods», June 17–20, 2002, Moscow, Russia, pp.280–284.

