

УДК 551.21+550.831(837)

А.Г. Нурмухамедов

**ИССЛЕДОВАНИЕ GEOTERMALЬНЫХ PЕСУPСОВ
АВАЧИНСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ И ЕЁ ФЛАНГОВ**

Проведен анализа результатов геолого-геофизических исследований, проведенных в разные годы в районе Авачинской группы вулканов и её флангов. Более пристальное внимание уделено результатам электроразведочных работ методом МТЗ и гравиметрической съёмки масштаба 1:50000. Дана оценка результатов выполненных работ с точки зрения использования теплоэнергетического потенциала территории. Рекомендован комплекс геофизических методов для изучения морфологии периферического очага под Авачинским вулканом и поиска потенциально возможных зон взаимодействия очага с метеорными водами.

Ключевые слова: Авачинский вулкан, периферический очаг, электроразведка МТЗ, гравиметрическая съёмка.

1 Введение

Авачинская группа вулканов и её фланги издавна привлекают к себе пристальное внимание вулканологов, геофизиков и других исследователей как потенциальный источник тепловой энергии. Действительно, активные «домашние» вулканы Корякский и Авачинский расположены в непосредственной близости от наиболее обжитой, и в промышленном отношении освоенной, агломерации Юго-Восточной Камчатки.

Территория юга Камчатки достаточно хорошо изучена — вся площадь покрыта гравиметрической и аэромагнитной съёмками масштаба 1:200 000. По материалам гравиметрической и геологической съёмок построена структурно-формационная карта¹, опубликован ряд статей о геологическом строении региона, в том числе, и по его юго-восточной части [3, 4].

К юго-западу от Авачинской группы вулканов уверенно прослеживается гравиметрический минимум поля силы тяжести севе-

¹ *Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н. Отчет по обобщению материалов гравиметрической съёмки масштаба 1:200 000 с целью составления структурно-формационной карты Южной Камчатки масштаба 1:500 000. Елизово: ЕГ-ФЭ, 1986. 303 с.*

ро-западного простирания, который объясняется наличием линейной отрицательной структуры – новейшим Авачинским грабеном (рис. 1 (см. Приложение, стр. 302)). Данная структура входит в Крутогоровско-Петропавловскую зону поперечных дислокаций (ЗПД) [30] того же простирания. В южной части грабен осложнён вулканотектонической структурой (ВТС), куда входят вулканы Авачинской группы. Депрессия заполнена вулканогенно-осадочными и вулканогенно-терригенными кайнозойскими отложениями.

К наиболее древним образованиям анализируемого района относятся интенсивно дислоцированные отложения верхнеюрско-мелового возраста, относящиеся к граувакко-сланцевой, базальт-андезит-туфокремнистой формациям. Значительная часть площади занята олигоцен-миоценовыми и неогеновыми отложениями, относящимися к базальт-андезитовой, андези-дацитово-базальт-андезит-липаритовой формациям. В тектоническом отношении с северо-востока грабен ограничен Китхойской ВТС и Налычевским поднятием, с юго-запада – Петропавловским горстом (рис. 1).

С точки зрения гидрогеологического режима ледники, образованные в пределах Авачинской группы вулканов, являются районами водного питания для прилегающих термоминеральных источников, в том числе, для Кеткинского месторождения термальных вод (МТВ) и Быстринского месторождения пресных подземных вод (МППВ) [12].

В соответствии с результатами гидродинамического моделирования [12] и по данным пробуренных скважин, уровень грунтовых вод (в абсолютных отметках) меняется в пределах 100–400 м, с погружением в центральных участках ВТС до 500–800 м. К этому следует добавить, что в формировании водного режима, по-видимому, значительную роль играет древнее русло реки Авачи. Одной из вероятных причин того, что река оставила древнюю долину, было накопление вулканических выбросов у подножия вулканов [2]. Взрывное извержение Авачинского вулкана, направленное в юго-западном направлении, вызвало подпруживание реки пра-Авачи и изменение ее русла на современное состояние. Вероятно, это и послужило первопричиной образования Быстринского МППВ, которое сформировано у запруды – западной границы конуса выброса вулканического материала, которое в настоящее время подпитывается ледниковыми водами.

2. Краткий обзор и анализ ранее выполненных работ

На протяжении последних десятилетий особо пристальное внимание ученых уделено Авачинскому вулкану. Ещё в 1960–62 гг. в районе вулкана выполнен комплекс геофизических работ [33], в том числе, наземная магнитная и гравиметрическая съёмки. Результаты модельных расчётов вдоль профиля, пересекающего Авачинский вулкан, показали, что в интервале глубин 2,5–5 км находится магматический очаг, питающий его. Кровля очага расположена на глубине $\sim 1,5$ км ниже уровня моря (н.у.м.). По некоторым оценкам очаг представлен андезит-базальтами – габбро-диоритами [31].

В 1982–84 гг. впервые был выполнен непрерывный сейсмический профиль КМПВ (корреляционный метод преломленных волн), пересекающий Авачинский вулкан с юга-запада на северо-восток. Результаты интерпретации полученных данных показали [7], что Авачинский вулкан расположен в грабенообразной депрессии, которая ограничена с обеих сторон разломами. Под вулканом в интервале глубин 1,5–5,0 км н.у.м. выделена зона относительного понижения скорости сейсмической волны, в верхней части которой фиксируется область повышенного поглощения высокочастотных составляющих проходящих Р-волн. Эти данные хорошо согласуются с ранее высказанными предположениями [31, 33] о существовании под Авачинским вулканом периферического магматического очага. Ниже по разрезу, в интервале глубин 9–17 км, выделена зона инверсии скорости, которую авторы интерпретируют как коровый магматический очаг.

Позднее на основе метода томографического восстановления разреза [10] была предложена модель сейсмогеологического разреза под Авачинским вулканом, в соответствии с которой основание грабена, представленное породами мелового фундамента, находится на отметке глубин 6 км н.у.м. При этом, по мнению авторов, область питания вулкана расположена в основании депрессии и её кровля находится на глубине порядка 3 км. Выше по разрезу, под вулканом, в интервале глубин 1–3 км, установлена зона поглощения высокочастотной составляющей сейсмических волн, которая свидетельствует «...о значительном разогреве вещества коры».

В 1979–1983 гг. в районе Авачинской группы вулканов выполнена гравиметрическая съёмка. В результате интерпретации получена объёмная модель аномальных тел под Авачинским вулканом и осуществлено геоплотностное моделирование вдоль профиля КМПВ. Как отмечают авторы выполненной работы [11] максимальная средняя плотность в блоке, содержащем предполагаемый очаг Авачинского вулкана составляет $2,88 \text{ г/см}^3$.

Позже была предложена геоплотностная модель, рассчитанная вдоль линии, пересекающей Вилючинский и Авачинский вулканы [34]. Плотностное моделирование выполнено по данным гравиметрической съёмки масштаба 1:200 000. Под Авачинским вулканом в интервале глубин $\sim 1\text{--}4 \text{ км}$ н.у.м. выделен объект повышенной плотности ($2,75 \text{ г/см}^3$), вероятно, отражающий наличие магматического очага. С севера к нему примыкает незначительный по размерам участок разуплотнения – $2,57 \text{ г/см}^3$, который совпадает с выделенной ранее зоной «значительного разогрева вещества коры» [10].

Выполнено геоплотностное моделирование и вдоль осевой части Авачинского грабена, которое показало ступенчатое строение основания структуры — ряд локальных депрессионных структур разделено узкими зонами поднятия [27]. Но здесь необходимо отметить, что моделирование поля силы тяжести (ПСТ) вдоль вытянутых структур, ограниченных латеральными неоднородностями различной плотности, может привести к существенным погрешностям в итоговой плотностной модели. Компенсируя региональный фон PST авторы модели «подняли» границу Мохо в Авачинском грабене до уровня 20–22 км. Но по данным ГСЗ мощность земной коры в анализируемом районе составляет порядка 42–45 км [1, 26]. Необходимо отметить, что по данным МОВЗ (метод обменных волн землетрясений), полученных вдоль регионального профиля, пересекающего Авачинский грабен [22], под Авачинской группой вулканов выделяется коромантийная зона отсутствия корреляции сейсмических границ. Вероятно, таким образом находит свое отражение ослабленная зона под вулканами.

В соответствии с полученной плотностной моделью, в узкой ослабленной зоне – в грабене, шириною 15–25 км, наблюдается подъём мантийного вещества с амплитудой локального

выступа более 20 км (!), что дает основание классифицировать структуру как новейший рифт (?). Но сейсморазведочными работами [7] наличие такого «мантийного выступа» не подтверждается – во всяком случае в разрезе вдоль профиля КМПВ этого не наблюдается. Даже если учесть, что переходная зона кора-мантия под вулканами может достигать 20 км [6], то собственно верхняя мантия под Авачинской группой вулканов находится на значительно больших глубинах, чем это показано в статье [27].

Очевидно, что «восстановление» границы Мохо, в соответствии с данными ГСЗ на глубине 40–45 км, или хотя бы опускание её на более низкий уровень, чем это представлено в статье [27], приведёт к рассогласованию плотностной модели. Поэтому, с целью дальнейшего изучения геологического строения зоны сочленения Авачинского грабена с ВТС и, в частности, уточнения ее плотностной модели, требуется трехмерное численное моделирование ПСТ с учетом латеральных плотностных неоднородностей, с использованием современного программного обеспечения.

В 1979–1981 гг. Елизовской геофизической экспедицией (ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология») выполнены региональные работы МТЗ в комплексе с магнитовариационным профилированием вдоль субширотного профиля пос. Усть-Большерецк – мыс Шипунский. Работы реализованы с использованием пятикомпонентных аналоговых станций МТЛ-71. Диапазон регистрируемых периодов МТ-поля составил 10–2000 с, шаг наблюдений по профилю 15–20 км со сгущением в районе Авачинского вулкана². В результате выполненных работ получены глубинные геоэлектрические разрезы, отражающие распределение электропроводности в земной коре и верхней мантии на глубину до 100 км и более. Под Авачинским вулканом выделена аномалия электропроводности, происхождение которой объяснено [20] существованием на глубине в первые километры периферического магматического очага.

² Пак Г., Нурмухамедов А.Г. Отчёт о специальных комплексных геолого-геофизических исследованиях, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений в 1980–1982 гг. (Авачинская партия по прогнозу землетрясений). Елизово: ЕГФЭ, 1982. 283 с.

Помимо выделенной аномалии внимание привлекла экзотическая близповерхностная неоднородность, представленная горизонтальным проводящим каналом, обнаруженным детальными магнитовариационными измерениями [28], проведенными к юго-востоку от Авачинского вулкана. Канализируемые этой неоднородностью токи обуславливают значительный аномальный эффект, фиксируемый в интенсивных суточных вариациях геомагнитного поля. Авторы выполненной работы считают эту аномалию уникальной, сравнивая её с близким аналогом – Алертской аномалией в Канадской Арктике.

Анализ материалов показывает, что контуры «Авачинской аномалии» [29] практически полностью совпадают с линейной структурой северо-западного простирания – Авачинским грабеном (рис. 1). По данным магнитовариационного профилирования [20] локальная неоднородность находит свое отражение в виде необычной ориентировки индукционного вектора в ближайшей к грабену точке МТЗ – параллельно береговой линии, в то время как в других прибрежных точках сохраняется их ортогональная ориентировка в сторону океана.

Кроме изучения Авачинской группы вулканов, в районе реализован широкий комплекс геолого-геофизических исследований, направленный на поиски термальных вод. В частности, в результате электроразведочных работ методом зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБЗ)³, выполненных ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология» летом 1984 г., открыто Кеткинское МТВ. Впоследствии, в 1987–1990 гг., вся территория от верховий р. Авача до нижнего течения р. Нальчева (рис. 1) была покрыта электроразведкой методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и гравиметрическими съёмками масштаба 1:50000^{4,5}. Северо-восточные границы площади

³ Нурмухамедов А.Г., Нетёсов Ю.П. Отчёт о геофизических работах, проведенных 2-ой Кеткинской партией в 1982–84 гг. Пиначевская площадь. Елизово: ЕГФЭ, 1984. 86 с.

⁴ Нурмухамедов А.Г., Попруженко С.В. Отчёт об общих поисках термальных вод в северо-западной части Петропавловского геотермального района, 1-я очередь – геофизические работы 1987–1989 гг. (N-57-89-Ф, Б, В, Г; N-57-101-А, Б; N-57-102-А). Елизовская партия. Книга I – текст отчета. Елизово: ЕГФЭ, 1989. 256 с.

⁵ Нурмухамедов А.Г., Желтухин А.С. Отчет по подготовке геофизической основы для поисков термальных вод (опережающие работы) в юго-восточной

геофизических работ вплотную примыкают к подножиям вулканов Авачинской группы. В эти же годы выполнены работы МТЗ в районе Верхне-Налычевского МТВ, благодаря чему были уточнены контуры месторождения и предложена модель его строения⁵.

Рассмотрим подробнее результаты работ МТЗ в районе, расположенном между Авачинской группой вулканов и городской агломерацией Петропавловска-Камчатского.

Исследуемую площадь с юго-запада на северо-восток пересекает региональный профиль, вдоль которого реализован комплекс геофизических методов МТЗ и МОВЗ [14, 15, 22]. В своей центральной части он полностью совпадает с отдельным профилем МТЗ, пересекающим Авачинский грабен севернее Авачинского вулкана (рис. 2 (см. Приложение, стр. 303)). Работы проводились с целью изучения земной коры и верхней мантии в области сейсмической активности и современного вулканизма. Шаг наблюдений вдоль профиля 2–3 км, максимальный период регистрируемых вариаций МТ-поля 1000 с., но в отдельных пунктах он достигал 3000 с.

В результате двумерного численного моделирования, выполненного вдоль профиля с использованием программы [35], получена глубинная геоэлектрическая модель [15]. В соответствии с ней в районе Авачинской группы вулканов, в интервале глубин 1–6 км, выделяется зона с аномально низким значением удельного сопротивления – 10 Ом·м на фоне 200–1000 Ом·м. Высказано предположение о том, что в этом месте земная кора пронизана глубинными разломами, по которым магматический расплав поступает в ее близповерхностные участки.

Площадные работы МТЗ на исследуемой территории реализованы по сети наблюдений ~ 2×2 км (рис. 2). В Авачинском грабене, к востоку от пос. Радыгина, работы МТЗ выполнены вдоль 4-ех параллельных профилей, а в районе седловины между Авачинским и Корякским вулканами отработан отдельный профиль МТЗ, пересекающий грабен в северо-восточном направлении. Шаг наблюдений по профилям ~ 0,5 км. Диапазон

части Петропавловского геотермального района в 1988–90 гг. и в северо-восточной его части в 1990–1992 гг. Моховская партия. Книга I – текст отчета. Елизово: ЕГФЭ, 1992. 312 с.

регистрируемых вариаций МТ-поля, в основном, составил 0,1–100 с., но в отдельных пунктах максимальный период достигал 800–1000 с.

Подробный анализ кривых МТЗ, полученных в разные годы, представлен в статьях [15, 16]. В соответствии с проведенной систематизацией, кривые разделены по направлениям, соответствующим простиранию и вкрест простирания основных структур Камчатки. Отмечено, что для изучения электропроводности глубинной составляющей земной коры и верхней мантии следует использовать так называемые продольные кривые МТЗ [17, 19, 23].

В дальнейшем двумерное моделирование вдоль регионального профиля было повторено, но уже с привлечением материалов МТЗ, полученных по программе поиска и разведки гидротерм^{4,5}. Таким образом, плотность информации по данным МТЗ в районе Авачинской группы вулканов существенно увеличена. На этот раз, моделирование реализовано с использованием программы Ф. Ваннамейкера [37]. В результате получена более детальная картина распределения электропроводности вдоль профиля [17]. Так, к западу от Петропавловского горста в интервале глубин 25–40 км выделен низкоомный объект — 20 Ом·м на фоне 500 Ом·м. По мере приближения к Авачинской группе вулканов наблюдается его подъем, а в районе грабена кровля проводника (10 Ом·м) фиксируется на отметке глубин 10 км. Выше по разрезу, в интервале 1–5 км, выделен проводник (8 Ом·м на фоне 100 Ом·м), отражающий низкоомный вулканогенно-осадочный комплекс пород, заполняющий Авачинский грабен.

Модель строения земной коры, построенная по данным МТЗ и КМПВ [17] представлена в рис. 3 (см. Приложение, стр. 304). В соответствии с моделью, зоны пониженных скоростей совпадают с аномалиями электропроводности. Наибольшее количество гипоцентров вулканических землетрясений сосредоточено над предполагаемым периферическим очагом.

Позже, в результате обобщения комплекса данных предложена геолого-геофизическая модель земной коры под Авачинским вулканом [18]. Ее параметры близки к модели, представленной в рис. 3, но здесь значительное внимание уделено коровой аномалии электропроводности, которая, по мнению

авторов [18], отражает наличие в земной коре проницаемой зоны – зоны глубинного разлома, по которой циркулируют гидротермальные растворы. Зона разгрузки гидротерм, и их аккумуляция возможны в Авачинском грабене. На это указывает наличие в верхней части разреза (1–5 км) контрастной аномалии электропроводности. Данный фактор вызывает повышенный интерес, так как анализируемый объект (грабен, осложненный ВТС) расположен в непосредственной близости от наиболее развитой агломерации Южной Камчатки, где предполагаемые гидротермы могут быть использованы в теплоснабжении населенных пунктов.

Определенный интерес и с точки зрения структурной геофизики, и с точки зрения поиска гидротермальных ресурсов, вызывают результаты работ, которые ранее были представлены только в производственных отчетах. Так, по данным электроразведки МТЗ, выполненной по сети 2×2 км построена карта суммарной продольной проводимости (S) до поверхности высокоомного основания (рис. 4 (см. Приложение, стр. 305))⁵. Под «высокоомным основанием» подразумевается верхнемеловой комплекс пород (ВМКП), характеризующийся удельным сопротивлением 100–300 Ом·м и более. Значение S определялось в каждой точке МТЗ с применением двухслойной палетки [9] по восходящей ветви амплитудной кривой ρ_r , рассчитанной по эффективным параметрам [8]. Величина S отражает рельеф поверхности высокоомного основания и находится в прямой зависимости от мощности вулканогенно-осадочного комплекса пород и степени его электропроводности.

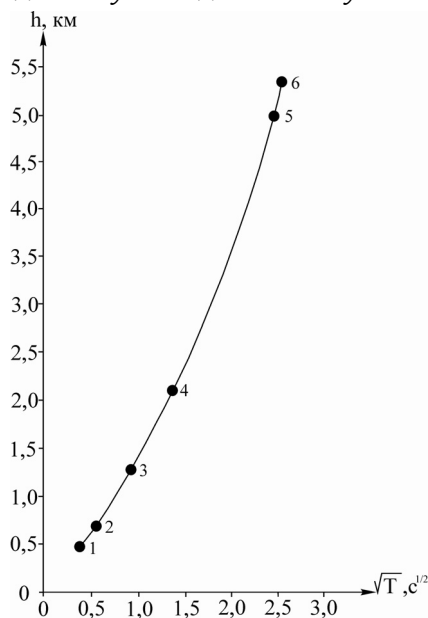
На карте S Авачинский грабен выделяется как аномальный проводник северо-западного простирания. Его границы отражены в градиентных зонах, разделяющих участки с низкими (10–50 Сим) и высокими (120–330 Сим) значениями S . В самом грабене, осложнённом вулканотектонической депрессией, выделяются участки с максимальными значениями S , достигающих 380 Сим и более. Уровень проводимости в таких местах, в соответствии с концепцией, изложенной в статье [18], может зависеть от степени насыщения кайнозойских отложений термальными водами. Таким образом, анализируемая карта может дать информацию о наличии проводящих зон (участков, струк-

тур), перспективных на обнаружение гидротерм со скрытой формой разгрузки.

В результате интерпретации данных МТЗ построена схема глубин (от дневной поверхности) до кровли высокоомного основания (рис. 5 (см. Приложение, стр. 306)). Определение глубин в каждой точке МТЗ осуществлялось на основе зависимости (рис. 6) между смещением минимума амплитудной кривой ρ_t по оси \sqrt{T} от мощности кайнозойских отложений — глубины до ВМКП. Для определения этой зависимости использовалась информация по скважинам ГК-1 (глубина до ВМКП 470 м), ГК-2 (683 м), ГК-2А (670 м), Р-2 (1290 м), Р-3 (пройдено 1,5 км – ВМКП не вскрыт), а также данные сейсморазведки КМПВ, по которым кровля ВМКП в грабене в районе Авачинского вулкана находится на глубине ~ 5 км [7]. К этому следует добавить, что полученные результаты (рис. 5) хорошо согласуются с геоэлектрической моделью земной коры [17], где в районе Авачинского грабена на глубине 5 км также выделено высокоомное основание (500 Ом·м).

Как видно из схемы (рис. 5), максимальная глубина погружения ВМКП (≥ 5 км) отмечается в районе, осложненном ВТС. Но в юго-восточной части грабена наблюдается высокоамплитудный подъем его основания. Здесь глубина до ВМКП уменьшается до 1,5–2,5 км. Таким образом, контрастный перепад глубин в самом грабене достигает 2,5–3,5 км.

Рис. 6 График зависимости положения минимума (\sqrt{T} , с) на кривой МТЗ от глубины (h , км) до кровли ВМКП. Точки на графике – известные по разным данным значения глубин до ВМКП в сопоставлении с минимумом на кривых МТЗ (ρ_k) в близких точках наблюдения: 1 – 470 м (скв. ГК-1); 2 – 683 м (скв. ГК-2), 670 м (скв. ГК-2А); 3 – 1290 м (скв. Р-2); 4 – 2100 м (по данным МТЗ⁴); 5 – 5000 м (по данным МТЗ [17]); 6 – 5400 м (по данным КМПВ [7])



Юго-западная граница грабена находит отражение в резком перепаде глубин до высокоомного основания. Так, на 1,5 км горизонтального проложения глубина до ВМКП увеличивается от 1,4 до 3,5 км. Эта градиентная зона отождествляется с системой разломов, отделяющих Авачинский грабен от Петропавловского горста. При этом, необходимо отметить, что в рисовке изолиний (к юго-западу от вулканов) наблюдается тенденция к их развороту от генерализованного северо-западного к северо-восточному направлению. Похожая картина в этом месте наблюдается и в морфологии изолиний суммарной продольной проводимости на карте *S* (рис. 4).

Одной из важных оценок, используемых в электротомии, является геоэлектрическая анизотропия, характеризующая степень неоднородности среды. Дополнительную информацию по этому параметру можно получить используя методику Эггерса. В основе метода лежит определение главных значений и главных направлений тензора импеданса [8]. По главным значениям импеданса (Z_{max} и Z_{min}) вычисляется параметр неоднородности:

$$N = |Z_{max} - Z_{min}| / |Z_{max} + Z_{min}|.$$

Обоснование метода, а также формулы расчёта представлены в статье [5]. Суть параметра N заключается в следующем: в случае горизонтально-однородной среды – $N = 0$. Отклонение N от 0 есть мера горизонтальной геоэлектрической неоднородности среды. Расчет векторов Эггерса⁶ и параметров N реализован для вариаций МТ-поля на периоде равном 25 с.

В результате построена карта параметра неоднородности N , где в большинстве точек МТЗ вынесены векторы Эггерса (рис. 7 (см. Приложение, стр. 307)). Как видно по карте, Авачинский грабен выделяется как структура, характеризующаяся высокими значениями N (0,6–0,8). Участки с максимальными значениями ($\geq 0,9$) зафиксированы в зоне, примыкающей к северо-восточной границе грабена. В целом же, границы грабена отражаются в виде изолиний, вытянутых преимущественно в северо-западном направлении. Но в том месте, где изолинии

⁶ Подготовка алгоритма и программы расчета вектора Эггерса и параметра N выполнена в 1990–1991 гг. Смирновым В.С. для ЭВМ ЕС-1033 в виде отдельного модуля в пакете программ IMTAD⁴.

глубин до ВМКП (рис. 5) делают разворот, изолинии параметра N также меняют свое направление с северо-западного на северо-восточное. Очевидно, в этом месте в геоэлектрических параметрах находит свое отражение структура, которая направлена вкрест простирания основным структурам исследуемой территории. Действительно, в результате гравиметрической съёмки м-ба 1:50 000 в анализируемом участке выделено тектоническое нарушение (разлом) северо-восточного простирания, которое делит Петропавловский горст на Тундровое поднятие и Краснореченскую депрессию (рис. 1)⁵. Разлом уверенно выделяется по нескольким трансформантам поля силы тяжести, в том числе и по его второй вертикальной производной — V_{zz} (рис. 8 (см. Приложение, стр. 308)). Возможно, данное тектоническое нарушение является фрагментом, ранее выделенного Авачинско-Вилючинского линеамента [13]. Но здесь следует отметить, что существование линеамента отрицается С.Е. Апрельковым и А.Е. Святловским [3]. В своей статье они отмечают, что «... этот разлом нельзя найти на кондиционных геологических картах, нет его признаков и в геофизических полях». Но как раз последние работы, выполненные в 1990–1992 гг., показывают, что, во всяком случае, в районе Петропавловского горста значительное по масштабам тектоническое нарушение уверенно выделяется по геофизическим данным (рис. 7, 8).

В зоне пересечения разлома с грабеном расположен Авачинский вулкан с его коровым и периферическим магматическими очагами. Вероятно, зона разлома является тем многоступенчатым сместителем, вдоль которого сформирован высокоамплитудный подъем кровли ВМКП в юго-восточной части грабена.

На основе комплекса данных построен геолого-геофизический разрез вдоль Авачинского грабена (рис. 9 (см. Приложение, стр. 309)), где исходя из расчетных модельных данных [32] вынесены предполагаемые контуры магматического очага и зоны его высокотемпературного влияния. К этому следует добавить, что в результате работ АМТЗ, выполненных на южных склонах вулкана, на глубине 200–400 м выделены зоны с аномально низким уровнем удельного сопротивления. Природа аномалий до конца не изучена и, по мнению авторов работы [25], требует своего дальнейшего исследования.

В результате проведенных гидрогеологических^{7,8} и геофизических работ⁵ выделен ряд участков, перспективных на вскрытие гидротерм. В соответствии с разработанными рекомендациями, необходимо доизучение выделенных площадей, что повысит вероятность получения геотермальных ресурсов, как возможных источников тепловой энергии. В настоящей статье не представляется возможным из-за ограничений по объему публикации подробно изложить информацию по каждому из перспективных объектов, тем не менее, необходимо отметить, что основная их часть примыкает к юго-западной границе Авачинского грабена.

В заключение обзора можно сделать *основные выводы*:

- аномально низкоомной доминантой исследуемой территории является Авачинский грабен. Его структура осложнена вулканотектонической депрессией, образуемой несколькими вулканами.

- в зоне пересечения грабена с разломом северо-восточного простирания сформирован аппарат Авачинского вулкана с его коровым и неглубоко залегающим периферическим высокотемпературным очагом. По разным оценкам [10, 17, 18] кровля периферического очага находится на глубине порядка 2 км от дневной поверхности.

- наибольшей перспективой обнаружения гидротерм обладают участки, примыкающие к юго-восточной границе Авачинского грабена.

- периферический очаг может быть объектом изучения с целью эксплуатации его тепловой энергии.

3. Предпосылки для постановки геофизических работ

Уже давно известные на полуострове месторождения термальных вод активно используются с целью теплоснабже-

⁷ Ворожейкина Л.А. Опыт-методическая работа по применению геологоструктурных, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях. Отчёт Авачинской тематической гидрогеологической партии о результатах работ, проведенных на Петропавловской площади в 1989–1995 гг. ТГФ Камчатгеолкома, 1995. 258 с.

⁸ Серезников А.И., Лазарев В.А. Отчёт о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями и картографированием масштаба 1:200 000, проведенного на территории листа N-57-XXVII в 1991–1996 гг. Книги I, II – текст отчета. ДП «Камчатнедра»: ФГУ ТФИ, 2000. 386 с.

ния небольших населенных пунктов, таких как поселки Термальный и Паратунка в Юго-Восточной Камчатке или Эссо и Анавгай в Центральной Камчатке. Есть и другие довольно многочисленные примеры эксплуатации гидротерм в народном хозяйстве Камчатского края. Но для теплоснабжения больших городов, таких как Петропавловск-Камчатский, Елизово, Вилючинск требуются более значительные по масштабам и запасам источники тепла. Такими источниками, например, могут быть прошедшие технологический цикл термальные воды геозлектростанций на Мутновском месторождении парогидротерм (МПГТ). Но доставка горячих вод на большие расстояния сопряжена с большими техническими трудностями и потерями тепла в трубопроводе. Очевидно, тоже самое можно сказать и о перспективах эксплуатации Верхне-Паратунского МТВ, где значительные запасы гидротерм пока не используются.

Привлекательна идея использования глубинного тепла периферического очага под Авачинским вулканом, который расположен в непосредственной близости от городской агломерации столицы Камчатки.

Ещё в семидесятые годы прошлого столетия рассматривалась возможность использования тепла магматического очага Авачинского вулкана [31]. А в 2006 году академик РАН С.А. Федотов с соавторами предложил развёрнутый анализ результатов геологических и геофизических исследований, позволяющих судить о наличии незастывшего магматического очага под Авачинским вулканом и оценить глубину его залегания и примерные размеры. Основные расчеты и идеи изложены в коллективной работе [32], где дана оценка запасов тепла горных пород, нагретых магматическим очагом вулкана с момента его возникновения и до настоящего времени. Проанализированы геолого-геофизические предпосылки использования тепловой энергии нагретых пород, вмещающих магматический очаг, для тепло- и электроснабжения города Петропавловска-Камчатского.

В публикации предлагается создание подземной геотермальной циркуляционной системы (трещинного теплообменника) с помощью бурения наклонных скважин глубиной порядка 3,5 км. Для извлечения тепла горных пород предполагается

создание в приочаговой зоне искусственной подземной циркуляционной системы (теплового котла), составной частью которой являются глубокие скважины и трещинные теплообменники. По одной скважине (системе скважин) вода закачивается, а затем, разогретая в процессе теплообмена вода поступает на поверхность через другую скважину или систему скважин. В своей работе авторы предлагают участок под бурение первой очереди скважин. Его расположение планируется в юго-западной части подножия вулкана. Эксперимент с извлечением глубинного тепла Земли по указанной схеме реализован во Франции [36].

Теоретические расчеты показывают, что кроме собственно периферического очага с «температурой стенки» 900°C есть и приочаговая область его высокотемпературного влияния [32]. Ожидается, что на глубине 3–3,5 км температура на забое скважин в зоне теплового котла (в зоне горячих сухих пород) составит примерно $200\text{--}350^{\circ}\text{C}$. Эти данные получены в результате теоретических расчетов. Но, как представляется, для задания дорогостоящей глубокой скважины (скважин), проходка которой планируется в высокотемпературной агрессивной среде, требуются экспериментальные данные. Поэтому, для уточнения модели строения Авачинского вулкана, в частности, для уточнения положения периферического очага и морфологии его кровли, а также с целью поиска потенциально возможных зон взаимодействия указанного очага с метеорными водами, рекомендуется постановка комплекса геофизических работ – электроразведки МТЗ и гравиразведки. Предполагается, что результаты этих работ позволят выбрать оптимальное место под заложение первой скважины, определить ее наклон, азимут проходки и, по возможности, уменьшить глубину бурения.

Положительный опыт организации таких работ (МТЗ, гравиразведка), реализованных в 2004–2010 гг. в районе Мутновского МПГТ, указывает на высокую результативность комплекса. Достаточно отметить, что в результате проведенных исследований был локализован участок под бурение глубоких скважин (температура на забое $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ и более) с целью вскрытия высокотемпературного энергоносителя – пароводяной смеси (ПВС). Первая же скважина Гео-1 вскрыла мощный при-

ток ПВС [21]. Пробуренные затем ещё 4-е скважины также оказались весьма продуктивными.

Есть положительный опыт электроразведочных работ МТЗ и в районе Кошелевского месторождения парогидротерм, и в других местах, характеризующихся наличием высокотемпературного энергоносителя.

4. Предложение по постановке геофизических работ

Предлагаемые к постановке геофизические методы планируется реализовать на южных-юго-западных флангах Авачинского вулкана и на его склонах. С учетом имеющегося опыта работ на рис. 10 (см. Приложение, стр. 310) представлена схема отработки площади. Рассмотрим рекомендуемые к постановке геофизические методы.

Площадные работы МТЗ:

Для изучения зоны сочленения вулканотектонической депрессии с Авачинским грабеном предлагается постановка работ МТЗ по сети наблюдений $0,5 \times 0,5$ км. Площадь участка составит ~ 35 кв.км. Его северо-западная часть совпадает с местом, предложенным академиком Федотовым С.А. с соавторами [32] под бурение глубоких скважин. Диапазон периодов регистрируемых вариаций МТ-поля планируется выбрать с учётом гарантированного изучения разреза на глубину до 10–15 км с записью 4-х компонент поля (E_x, E_y, H_x, H_y). В процессе работ предполагается использовать технологию **V5 SYSTEM-2000 «Phoenix Geophysics»**, с применением аппаратурно-программного комплекса *MTU-5A* (*MTU-5; MTU-2E*) канадского производства.

Работы МТЗ вдоль отдельных профилей:

Данное направление исследований планируется реализовать в тех местах на склонах вулкана, где невозможна отработка площади по регулярной сети $0,5 \times 0,5$ км. Всего планируется отработать примерно 8 профилей, общей протяженностью порядка 30 пог.км. Шаг наблюдений по профилю 0,5 км. Технология работ и аппаратура предусматриваются те же, что и при работе МТЗ по сети $0,5 \times 0,5$ км.

По полученным данным в результате двумерного численного моделирования МТ-поля будут разработаны 2D-геоэлектрические модели (2D-разрезы), охватывающие глубины до 10–15 км. Совокупность разрезов, полученных по каждому профилю,

послужит исходным материалом для первых итераций при реализации трехмерного моделирования. Ожидается, что конечным результатом будет создание 3D-геоэлектрической модели Авачинского вулкана, где будут выделены геоэлектрические неоднородности, характеризующиеся различным уровнем удельного сопротивления, в том числе, относительно низкоомный участок, отождествляемый с периферическим очагом.

Глубинное магнитотеллурическое зондирование – ГМТЗ:

Для количественной оценки влияния регионального индукционного эффекта (берегового эффекта) [19, 23] на результаты магнитотеллурического зондирования предполагается отработать профиль МТЗ вдоль Авачинского грабена, ортогонально береговой линии Авачинского залива (рис. 10). Регистрация МТ-поля будет осуществляться в варианте глубинного магнитотеллурического зондирования – ГМТЗ. Кроме анализа берегового эффекта будет уточнена картина распределения электропроводности на больших глубинах, охватывающих нижнюю часть земной коры и верхнюю мантию в зоне современного вулканизма. Эти данные, с учётом уже имеющихся результатов МТЗ, полученных ранее вдоль регионального профиля [17], послужат опорной информацией при процедуре 3D-моделирования. Планируемая протяженность профиля ~ 20 км, шаг наблюдений 2–3 км. Предусматривается регистрация 5-и компонент МТ-поля — E_x , E_y , H_x , H_y , H_z . Диапазон периодов регистрируемого МТ-поля, предположительно, составит от 0,0025 до 10000 с.

Гравиметрическая съемка вдоль отдельных профилей:

По имеющимся данным зона периферического очага характеризуется повышенной плотностью — по одним сведениям она составляет $2,75 \text{ г/см}^3$ [34], по другим — $2,88 \text{ г/см}^3$ [11], что близко к показателям плотности пород среднего-основного состава. Фоновое значение окружающего пространства составляет $2,45\text{--}2,6 \text{ г/см}^3$ [34]. Такое соотношение плотностей способствует проведению гравиразведки с целью уточнения положения периферического очага и его возможных апофизов.

На исследуемой площади рекомендуется реализовать гравиразведку по нескольким профилям общей протяженностью порядка 50 км (рис. 10) с шагом наблюдений 200 м.

Рассчитанные вдоль каждого профиля плотностные двумерные модели будут основой для создания трехмерной геоплотностной модели (3D-модели). Для фоновых значений ПСТ, для ближних и дальних флангов исследуемого участка, планируется использовать материалы гравиметрических съемок масштабов 1:50000 и 1:200000. Ожидается, что конечным результатом гравиметрических работ будет создание 3D-геоплотностной модели Авачинского вулкана, где будут выделены плотностные неоднородности, в том числе, уточнено положение периферического очага.

5. Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных. Ожидаемые результаты

На основе новых данных предусматривается комплексная интерпретация всей совокупности геолого-геофизических материалов, включая материалов предшественников, подчерпнутых из производственных отчетов, научных публикаций, монографий. Результаты отдельных геофизических методов взаимно дополняют друг друга, а само комплексирование резко сужает свойственную каждому методу неоднозначность геологического истолкования.

При построении схем и моделей строения Авачинского вулкана планируется широко использовать результаты гравиметрической съемки для изучения его плотностных неоднородностей. Данные электроразведки МТЗ будут использованы при выделении высокоомных объектов, отождествляемых с интрузивными телами, а аномально низкоомных – с зонами плавления (частичного плавления?) и участками насыщенных высокотемпературными флюидами.

Предполагается, что основными результатами работ будут:

- уточненное положение периферического очага и морфологии его кровли;
- выделение потенциально возможных зон взаимодействия высокотемпературной периферии очага с метеорными водами;
- выбор оптимального места под заложение первой глубокой параметрической скважины с определением ее наклона, азимута и глубины проходки.

В настоящее время Научно-исследовательским геотехнологическим центром (НИГЦ ДВО РАН) организован термометри-

ческий мониторинг в юго-западной части подножия Авачинского вулкана. Мониторинг осуществляется с использованием аппаратуры, установленной в 25 неглубоких скважинах (20 м), обсаженных полиэтиленовыми трубами. По результатам мониторинга планируется разработка 3D-термогидродинамической и 3D-термофлюидодинамической моделей. Ожидается, что данные модели будут способствовать геологическому истолкованию геофизических материалов и более точной оценке тепловых ресурсов наблюдаемой системы. Кроме этого, полученные модели будут использоваться при разработке обобщенной трехмерной геолого-геофизической модели исследуемой территории.

К изложенному следует добавить, что результаты анализа комплекса геолого-геофизических данных и результатов моделирования кондуктивного теплового потока [24] говорят о высокой степени перспективности освоения тепловых ресурсов магматического очага. Выполненная технико-экономическая оценка проекта освоения тепловых ресурсов Авачинской магматогенной геотермальной системы [24] показывает его экономическую целесообразность.

Зарубежный опыт эксплуатации глубинного тепла Земли в зоне активного вулканизма в Исландии, Никарагуа, и в ряде других стран, дает основание надеяться, что аналогичные технологии, наконец то, будут применены и на территории Камчатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.
2. Апрельков С.Е. Древняя долина реки Авача на Камчатке // Геологические и геофизические исследования в вулканических поясах / Отв. ред. Рудич К.Н. М.: Изд. АН СССР, 1963. С. 88–92.
3. Апрельков С.Е., Ольшанская О.Н. Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 1. С. 53–65.
4. Апрельков С.Е., Святловский А.Е. Происхождение Авачинской бухты на Камчатке // Тихоокеанская геология. 1989. № 4. С. 108–111.
5. Аширов Н.Г., Бердичевский М.Н., Дубровский В.Г. и др. Новые данные по глубинному геоэлектрическому разрезу Восточно-Туркменской синеклизы // Физика Земли. 1989. № 4. С. 96.

6. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И. Сейсмическая модель земной коры Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 83–90.
7. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцева А.А. и др. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43–53.
8. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 256 с.
9. Ваньян Л.Л., Бутковская А.И. Магнитотеллурическое зондирование слоистых сред. М.: Недра, 1980. 228 с.
10. Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич С.А., Пийп В.Б. Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным МПВ-ГСЗ // Физика Земли. 1990. № 3. С. 73–82.
11. Зубин М.И., Козырев А.И. Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81–94.
12. Кирюхин А.В., Манухин Ю.Ф., Федотов С.А. и др. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. М.: Наука, 2015. № 5. С. 400–414
13. Масуренков Ю.П. Термогенные структуры и критерии поисков скрытых гидротермальных систем в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 68–82.
14. Мишин В.В. Глубинное строение и типы земной коры юга Камчатки // Тихоокеанская геология. 1996. № 1. С. 110–119.
15. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лошинская Г.А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 127–138.
16. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 77–84.
17. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А. Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58–66.
18. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10.
19. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трёхмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–73.
20. Нурмухамедов А.Г., Смирнов В.С. Результаты глубинных электромагнитных исследований на Южной Камчатке // Геология и полезные ископаемые Корякско-Камчатской складчатой области (материалы V Камчатской геологической конференции). Петропавловск-Камчатский. 1985. С. 69 – 82.
21. Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И., Алексеев Д.А., Яковлев А.Г. Трёхмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм // Физика Земли. 2010. № 9. С. 15–26.

22. Нурмухамедов А.Г., Неядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. № 29. С. 35–52.
23. Окулесский Б.А., Порай-Кошиц А.М., Смирнов В.С., Нурмухамедов А.Г. Глубинное геоэлектрическое строение юга Камчатки // Астеносфера по комплексу геофизических методов / Отв. ред. Ваньян Л.П. Киев: Наукова думка, 1988. С. 72–83.
24. Пашкевич Р.И., Трухин Ю.П. Перспективы промышленного освоения ресурсов близповерхностных магматических очагов Камчатки и Курильских островов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Камчатка. М.: Горная книга, 2014. Отдельный выпуск 2. С. 7–21.
25. Пашкевич Р.И., Песоцкий Д.Г., Балыков А.А., Мамаев Д.В. Магнитотеллурические исследования в южном секторе Авачинской геотермальной системы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Камчатка. М.: Горная книга, 2014. Отдельный выпуск 2. С. 47–53.
26. Попов А.А., Аносов Г.И., Аргентов В.В. и др. Строение земной коры по сейсмическим данным // Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Ред. Сергеев К.Ф., Красный М.Л. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. Лист 18.
27. Попруженко С.В., Апрельков С.Е. Строение фундамента Авачинской депрессии // Вулканология и сейсмология. 1997. № 6. С. 15–24.
28. Рокитянский И.И., Курносов А.Л. Магнитовариационное профилирование по модульным измерениям на Камчатке // Геомагнетизм и аэронаука. 1983. Т. 23. № 6. С. 1029–1032.
29. Рокитянский И.И., Киликян В.А., Варданыц И.Л. и др. Авачинская аномалия электропроводности // Геофизический журнал. 1984. Т. 6. № 5. С. 65–72.
30. Ротман В.К. Металлогения СССР. Металлогеническая карта Камчатки, Сахалина и Курильских островов масштаба 1:1 500 000. Объяснительная записка. Л.: ВСЕГЕИ, 1984.
31. Федотов С.А., Балеста С.Т., Дроздин В.А. и др. О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана // Бюллетень вулканологических станций. 1977. № 53. С. 27–37.
32. Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 32–46.
33. Штейнберг Г.С., Зубин М.И. О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом // Докл. АН СССР. 1963. Т. 152. № 4. С. 968–971.
34. Шеймович В.С., Сидоров М.Д. Строение фундамента вулканического пояса // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 68–75.
35. Юдин М.Н., Казанцев В.В. Программа расчета магнитотеллурического поля в двумерных слоистых средах, содержащих локальные

неоднородности (Е- и Н-поляризация) // Библиотека программ для обработки геофизических данных на ЭВМ. Электроразведка. М.: ВНИИГеофизика, 1977. С. 36.

36. Baumgartner J., Jung R., Gerard A. et al. The European HDR Project at Soult-sous-Forets; Stimulation of the second deep well and first circulation experiments. In: 21 st Workshop on Geothermal reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California. 1996. P.

37. Wannamaker P.E., Stadt J.A., Rejol A. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1987. V. 88. P. 277–296. **ИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Нурмухамедов Александр Гарифович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, nurmuxamedov1949@mail.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 551.21+550.831(837)

THE STUDY OF GEOTHERMAL RESOURCES OF THE AVACHA GROUP OF VOLCANOES AND ITS FLANKS

Nurmukhamedov Alexander Gariphovich – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, nurmuxamedov1949@mail.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

The article is based on the results of the geologic-geophysical researches carried out during different years around the Avacha volcanoes group and its flanks. More attention was paid to the results of electric exploration by the method of magnetotelluric sounding and gravimeter survey of 1:50 000 scale. Works results in the context of heat and power territory potential utilization were given. The complex of geophysical methods to study morphology of the peripheral chamber under Avacha volcano and search of potentially possible zones of chamber interaction with meteoric waters was recommended.

Key words: Avacha volcano, peripheral chamber, geoelectric survey by MTS, gravimetric survey, thermometrical monitoring investigations.

REFERENCES

1. Anosov G.I., Bikkenina S.K., Popov A.A. i dr. *Glubinnoe sejsmicheskoe zondirovanie Kamchatki* (Deep seismic sounding of Kamchatka). Moscow: Nauka, 1978. 130 p.
2. Aprel'kov S.E. *Drevnjaja dolina reki Avacha na Kamchatke* (Ancient valley of the river Avacha in Kamchatka) // *Geologicheskie i geofizicheskie issledovanija v vulkanicheskikh pojasah* / Otv. red. Rudich K.N. Moscow: Izd. AN SSSR, 1963. pp. 88–92.
3. Aprel'kov S.E., Ol'shanskaja O.N. *Tektonicheskoe rajonirovanie Central'noj i Juzhnoj Kamchatki po geologicheskim i geofizicheskim dannym* (Tectonic zoning of the Central and southern Kamchatka geological and geophysical data, tikhookean) // *Tihookeanskaja geologija*. 1989. No 1. pp. 53–65.
4. Aprel'kov S.E., Svatlovskij A.E. *Proishozhdenie Avachinskoj buhty na Kamchatke* (Origin of the Avacha Bay in Kamchatka, tikhookean) // *Tihookeanskaja geologija*. 1989. No 4. pp. 108–111.
5. Ashirov N.G., Berdichevskij M.N., Dubrovskij V.G. i dr. *Novye dannye po glubinomu geoelektricheskomu razrezu Vostochno-Turkmenskoj sineklizy* (New data on the deep geoelectric section of the Eastern Turkmen syncline) // *Fizika Zemli*. 1989. No 4. 96 p.
6. Balesta S.T., Gontovaja L.I. *Sejsmicheskaja model' zemnoj kory Aziatsko-Tihookeanskoj zony perehoda v rajone Kamchatki* (Seismic model of the crust of the Asia-Pacific transition zone in the area of Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1985. No 4. pp. 83–90.
7. Balesta S.T., Gontovaja L.I., Kargopol'ceva A.A. i dr. *Sejsmicheskaja model' Avachinskogo vulkana (po dannym KMPV-GSZ)* (Seismic model of the Avachinsky volcano (according to kmpv-PES)) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1988. No 2. pp. 43–53.
8. Berdichevskij M.N. *Jelektricheskaja razvedka metodom magnitotelluricheskogo profilirovanija* (Electrical exploration by the method of magnetotelluric profiling). Moscow: Nedra, 1968. 256 p.
9. Van'jan L.L., Butkovskaja A.I. *Magnitotelluricheskoe zondirovanie sloistyh sred* (Magnetotelluric sounding of layered media). Moscow: Nedra, 1980. 228 p.
10. Gontovaja L.I., Efimova E.A., Kostjuevich S.A., Pijp V.B. *Sejsmicheskij razrez vulkana Avachinskij po dannym MPV-GSZ* (Seismic section of the volcano Avacha according to the MSP-SPSS) // *Fizika Zemli*. 1990. No 3. pp. 73–82.
11. Zubin M.I., Kozyrev A.I. *Gravitacionnaja model' stroenija Avachinskogo vulkana (Kamchatka)* (Gravitational model of the structure of Avacha volcano (Kamchatka)) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1989. No 1. pp. 81–94.
12. Kirjuhina A.V., Manuhina Ju.F., Fedotov S.A. i dr. *Geofluidy Avachinsko-Korjaksckogo vulkanogennogo bassejna, Kamchatka* (Geofluid of the Avachinsky-Koryaksky volcanogenic basin, Kamchatka) // *Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija*. Moscow: Nauka, 2015. No 5. pp. 400–414.
13. Masurenkov Ju.P. *Termogennye struktury i kriterii poiskov skrytyh gidrotermal'nyh sistem v okrestnostjah g. Petropavlovsk-Kamchatskogo* (Thermogenic structure and criteria of searching for hidden hydrothermal systems in the vicinity of Petropavlovsk-Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1985. No 4. pp. 68–82.
14. Mishin V.V. *Glubinnoe stroenie i tipy zemnoj kory juga Kamchatki* (Deep structure and the types of crust of South Kamchatka). Tihookeanskaja geologija. 1996. No 1. pp. 110–119.
15. Moroz Ju.F., Nurmuhamedov A.G., Loshhinskaja G.A. *Magnitotelluricheskoe zondirovanie zemnoj kory Juzhnoj Kamchatki* (Magnetotelluric sounding of the crust in southern Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1995. No 4–5. pp. 127–138.
16. Moroz Ju.F., Nurmuhamedov A.G. *Magnitotelluricheskoe zondirovanie Petropavlovskogo geodinamicheskogo poligona na Kamchatke* (Magnetotelluric sounding in the Petropavlovsk geodynamic polygon, Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1998. No 2. pp. 77–84.

17. Moroz Ju.F., Nurmuhamedov A.G., Moroz T.A. *Glubinnaja geoelektricheskaia model' Petropavlovskogo geodinamicheskogo poligona na Kamchatke* (Deep geoelectric model of the Petropavlovsk geodynamic test site on Kamchatka) // *Fizika Zemli*. 2001. No 6. pp. 58–66.
18. Moroz Ju.F., Gontovaja L.I. *Glubinnoe stroenie rajona Avachinsko-Korjaskoj grupy vulkanov na Kamchatke* (Deep structure of the area of the Avachinsky-Koryaksky group of volcanoes in Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 2003. No 4. pp. 3–10.
19. Moroz Ju.F., Moroz T.A. *Chislennoe trjohmernoe modelirovanie magnitotelluricheskogo polja Kamchatki* (Numerical three-dimensional modeling of magnetotelluric field in Kamchatka) // *Fizika Zemli*. 2011. No 2. pp. 64–73.
20. Nurmuhamedov A.G., Smirnov V.S. *Rezultaty glubinyh jelemektricheskikh issledovanij na Juzhnoj Kamchatke* (Results of deep electromagnetic investigations at the South Kamchatka) // *Geologija i poleznye iskopaemye Korjasko-Kamchatskoj skladchatoj oblasti (materialy V Kamchatskoj geologicheskoi konferencii)*. Petropavlovsk-Kamchatskij. 1985. pp. 69–82.
21. Nurmuhamedov A.G., Cherev I.I., Alekseev D.A., Jakovlev A.G. *Trjohmernaja geoelektricheskaia model' Mutnovskogo mestorozhdenija parogidrotrem* (Three-Dimensional geoelectrical model of Mutnovsky field providerarg) // *Fizika Zemli*. 2010. No 9. pp. 15–26.
22. Nurmuhamedov A.G., Nedjad'ko V.V., Rakitov V.A., Lipat'ev M.S. *Granicy litosfery na Kamchatke po dannym metoda obmennykh voln zemletrjasenij* (Lipatiev the boundaries of lithosphere of Kamchatka according to the method of exchange waves of earthquakes) // *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2016. No 1. Vyp. No 29. pp. 35–52.
23. Okuleskij B.A., Poraj-Koshic A.M., Smirnov V.S., Nurmuhamedov A.G. *Glubinnoe geoelektricheskoe stroenie juga Kamchatki* (Deep geoelectric structure of southern Kamchatka) // *Astenosfera po kompleksu geofizicheskikh metodov* / *Otv. red. Van'jan L.L.* Kiev: Naukova dumka, 1988. pp. 72–83.
24. Pashkevich R.I., Truhin Ju.P. *Perspektivy promyshlennogo osvoenija resursov blizpoverhnostnykh magmaticheskikh ochagov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov* (Prospects of industrial development of the resources of the subsurface magma chambers of Kamchatka and Kuril Islands) // *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. Kamchatka. M.: Gornaja kniga, 2014. Otdel'nyj vypusk 2. pp. 7–21.
25. Pashkevich R.I., Pesockij D.G., Balykov A.A., Mamaev D.V. *Magnitotelluricheskie issledovanija v juzhnom sektore Avachinskoj geotermal'noj sistemy* (Magnetotelluric studies in the southern sector of the Avachinsky geothermal system) // *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. Kamchatka. Moscow: Gornaja kniga, 2014. Otdel'nyj vypusk 2. pp. 47–53.
26. Popov A.A., Anosov G.I., Argentov V.V. i dr. *Stroenie zemnoj kory po sejsmicheskim dannym* (Crustal Structure from seismic data) // *Geologo-geofizicheskij atlas Kurilo-Kamchatskoj ostrovnnoj sistemy* / *Red. Sergeev K.F., Krasnyj M.L.* Leningrad: VSEGEI, 1987. List 18.
27. Popruzenko S.V., Aprel'kov S.E. *Stroenie fundamenta Avachinskoj depressii* (Aprel'kov structure of the basement of the Avacha depression) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1997. No 6. pp. 15–24.
28. Rokitjanskij I.I., Kurnosov A.L. *Magnitovariacionnoe profilirovanie po modul'nym izmerenijam na Kamchatke* (Magnetovariational profiling in a modular measurement at Kamchatka) // *Geomagnetizm i ajeronomija*. 1983. T. 23. No 6. pp. 1029–1032.
29. Rokitjanskij I.I., Kilikjan V.A., Vardanjan I.L. i dr. *Avachinskaja anomalija jelektroprovodnosti* (Avachinsky anomaly of electrical conductivity) // *Geofizicheskij zhurnal*. 1984. T. 6. No 5. pp. 65–72.
30. Rotman V.K. *Metallogenija SSSR. Metallogenicheskaja karta Kamchatki, Sahalina i Kuril'skikh ostrovov masshtaba 1:1 500 000* (Metallogeny of the USSR. Metallogenic map of Kamchatka, Sakhalin and the Kuril Islands scale 1:1 500 000). Objasnitel'naja zapiska. Leningrad: VSEGEI, 1984.

31. Fedotov S.A., Balesta S.T., Droznin V.A. i dr. *O vozmozhnosti ispol'zovanija tepla magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana* (About the possibility of using the heat of the magma chamber of the Avachinsky volcano) // *Bjulleten' vulkanologicheskikh stancij*. 1977. No 53. pp. 27–37.

32. Fedotov S.A., Sugrobov V.M., Utkin I.S., Utkina L.I. *Vozmozhnosti ispol'zovanija tepla magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana i okruzhajushhih ego porod dlja teplo- i jelektronnabzhenija* (Possibilities of using heat of the magma chamber of the Avachinsky volcano and the surrounding rock for heat and power) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 2007. No 1. pp. 32–46.

33. Shtejnberg G.S., Zubin M.I. *O glubine zaleganija magmaticheskogo ochaga pod Avachinskim vulkanom* (About the depth of a magmatic chamber under Avacha volcano) // *Dokl. AN SSSR*. 1963. T. 152. No 4. pp. 968–971.

34. Shejmovich V.S., Sidorov M.D. *Stroenie fundamenta vulkanicheskogo pojasa* (Structure of the basement volcanic belt) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 2000. No 5. pp. 68–75.

35. Judin M.N., Kazancev V.V. *Programma rascheta magnitotelluricheskogo polja v dvumernyh sloistyh sredah, sodержashhih lokal'nye neodnorodnosti (E- i N-poljarizacija)* (Program for calculating magnetotelluric fields in two-dimensional layered media, containing the local inhomogeneity (E - and H-polarization)) // *Biblioteka programm dlja obrabotki geofizicheskikh dannyh na JeVM. Jelektrorazvedka*. Moscow: VNII Geofizika, 1977. pp. 36.