

К. М. Антащук, А. К. Сараев, О. М. Прокофьев

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АМТ-ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА П-ОВЕ КАМЧАТКА

Введение

Теплоснабжение п-ова Камчатка связано с высокой стоимостью поставок топлива в этот регион. Привлечение новых источников энергии, в том числе геотермальных, может способствовать решению данной проблемы. Камчатский п-ов является центром современной вулканической активности и на его территории уже обнаружено несколько геотермальных месторождений. Поэтому проведение поисковых работ имеет хорошие перспективы на обнаружение здесь новых геотермальных источников.

К настоящему времени накоплен значительный мировой опыт применения методов магнитотеллурических (МТ) и аудиомангнитотеллурических (АМТ) зондирований для поисков геотермальных месторождений [1, 2]. Эти методы в настоящее время являются стандартными и применяются повсеместно для решения поисковых задач. Ранее на территории п-ова Камчатка были выполнены успешные исследования методами МТ- и АМТ-зондирований в районе Мутновского месторождения парогидротерм [3]. Большинство выявленных на Камчатке месторождений и проявлений термальных вод приурочено к районам молодого плиоцен-четвертичного вулканизма. В результате изучения такого рода объектов была установлена связь геотермальных систем с молодыми интрузивными телами, а основных зон разгрузки — с системами молодых разломов и трещинных зон.

Применение МТ- и АМТ-зондирований для поисков геотермальных источников в каждом районе имеет свою специфику, и целесообразно анализировать результаты работ для более эффективного применения этих методов на новых территориях. В статье приводятся результаты АМТ-зондирований при поисках геотермальных месторождений в районе поселков Палана и Ключи (Паланская и Ключевская площади), расположенных соответственно в северо-западной и центральной частях полуострова (рис. 1). Работы были нацелены на поиски относительно малоглубинных (до 2 км) низко- и среднетемпературных (до 100–150°C) геотермальных источников. При этом зондирования выполнялись АМТ-методом с частичным перекрытием МТ-диапазона на частотах 0.3–800 Гц.

Аппаратура и программное обеспечение АМТ-зондирований

Метод АМТ-зондирований основан на использовании естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне частот от единиц до первых тысяч герц [4, 5]. По данным измерений горизонтальных и взаимно ортогональных составляющих электрического и магнитного полей определяются амплитуда поверхностного импеданса (или кажущееся сопротивление ρ_k) и фаза импеданса φ_z . Полученные кривые ρ_k и φ_z используются

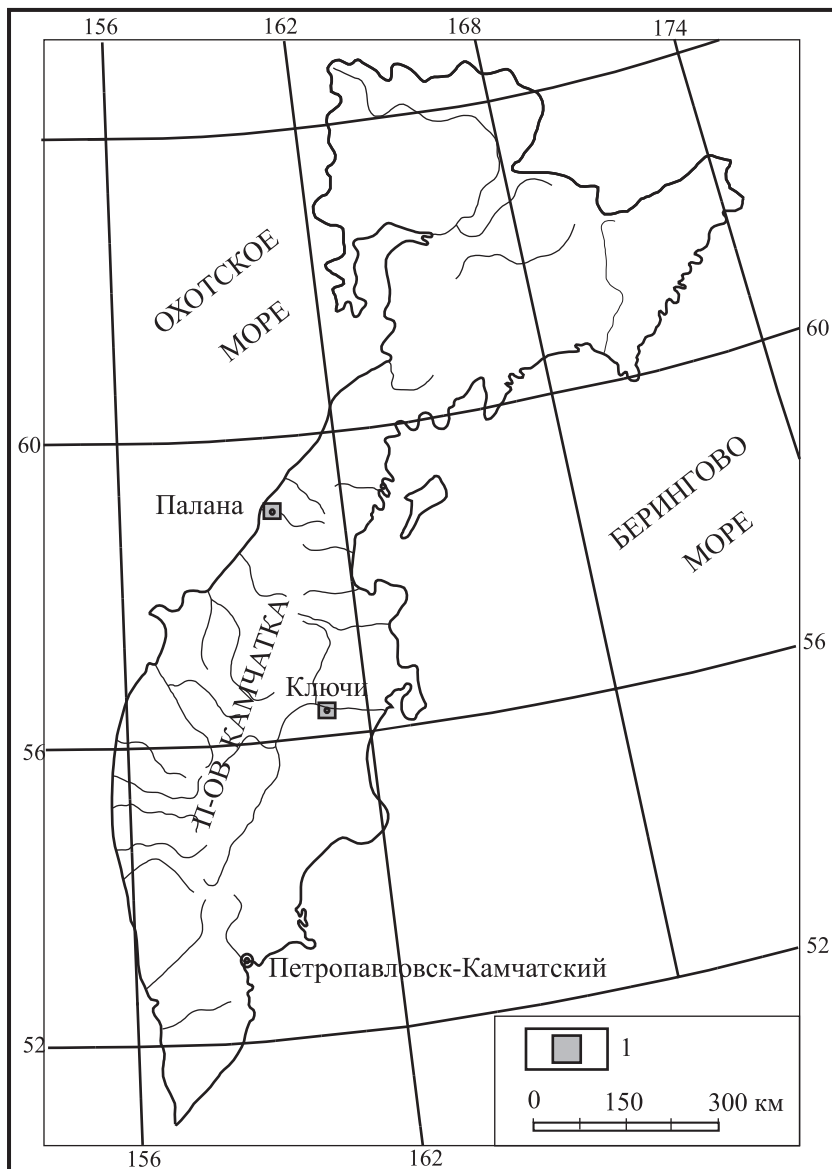


Рис. 1. Обзорная схема положения участков работ методом АМТ-зондирований на п-ове Камчатка.
1 — участки работ

для инверсии, по результатам которой строится геоэлектрический разрез. При инверсии данных АМТ-зондирований используется модель первичного поля в виде плоской вертикально падающей волны.

При проведении полевых работ использовалась аппаратура АКФ-4М, разработанная Санкт-Петербургским государственным университетом и ООО «МикроКОР» [6].

Аппаратура включает цифровой регистратор с четырьмя каналами синхронных измерений и 24-разрядными АЦП в каждом канале для измерения горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей, предварительный усилитель электрических каналов, две симметричные приемные электрические линии и две магнитные антенны. Частотный диапазон аппаратуры 0.1–800 Гц, частоты дискретизации входных сигналов 160, 1600 и 3200 Гц. Работы проводились с использованием GPS-приемника, который обеспечивал синхронизацию по времени и координатам. Для повышения качества получаемых данных применялась технология работ с удаленной базовой точкой.

Программное обеспечение аппаратуры включает программу управления процессом измерений и первичной обработки данных SM27. Для обработки данных, полученных в сложных условиях (неблагоприятная помеховая обстановка, низкий уровень и нестабильность естественного электромагнитного поля), используется программа SM+. В данной программе применяются различные виды робастных процедур и реализована обработка данных АМТ-зондирований, полученных по методике работ с удаленной базовой точкой. Для визуализации исходных данных и результатов интерпретации используется программа Geoinf. Программа предназначена для просмотра и анализа данных АМТ-зондирований по отдельным точкам зондирования, по профилям и площади. При 2D-инверсии применяется программа Shell2D, в которой реализована инверсия Окама по алгоритму REBOCC [7].

Результаты работ на Паланской площади

Схема геологического строения Паланской площади показана на рис. 2, а. Район расположен в пределах Западно-Камчатской структурно-фациальной зоны. В геологическом строении района выделяется два структурных яруса. Нижний ярус представлен вулканогенными (базальты, андезиты), вулканогенно-осадочными (туфы, туфопесчаники, диабазы, порфириды) и осадочными (песчаники, аргиллиты и алевролиты) породами мелового возраста. Эти породы в той или иной степени метаморфизованы и прорваны интрузиями позднемелового возраста. Верхний ярус мощностью до 2500 м объединяет толщи вулканогенных (базальты, андезито-базальты, андезиты) и осадочных (песчаники, конгломераты, алевролиты, аргиллиты) пород палеогена и вулканогенно-осадочных (туфопесчаники) отложений неогена.

Строение района осложнено многочисленными разрывными нарушениями. Наиболее крупные разломы северо-восточного простирания с вертикальными смещениями, достигающими 500–1000 м, ограничивают горсты верхнемеловых пород. В меловых отложениях также наблюдаются многочисленные нарушения северо-западного и субширотного простирания с вертикальными амплитудами от десятков до первых сотен метров, в особенности на контактах осадочных пород с вулканогенно-осадочными образованиями.

По сравнению с породами нижнего структурного яруса дислоцированность пород верхнего яруса меньше, но остается довольно значительной, особенно вблизи разломов. Ряд довольно крупных нарушений северо-восточного и северо-западного простирания установлен в поле развития эффузивных образований палеогена и на их контактах с осадочными отложениями палеогена и неогена.

В районе работ выделяется и прослеживается с юга вдоль побережья Охотского моря в север-северо-восточном направлении Тигильско-Кинкильский антиклинно-

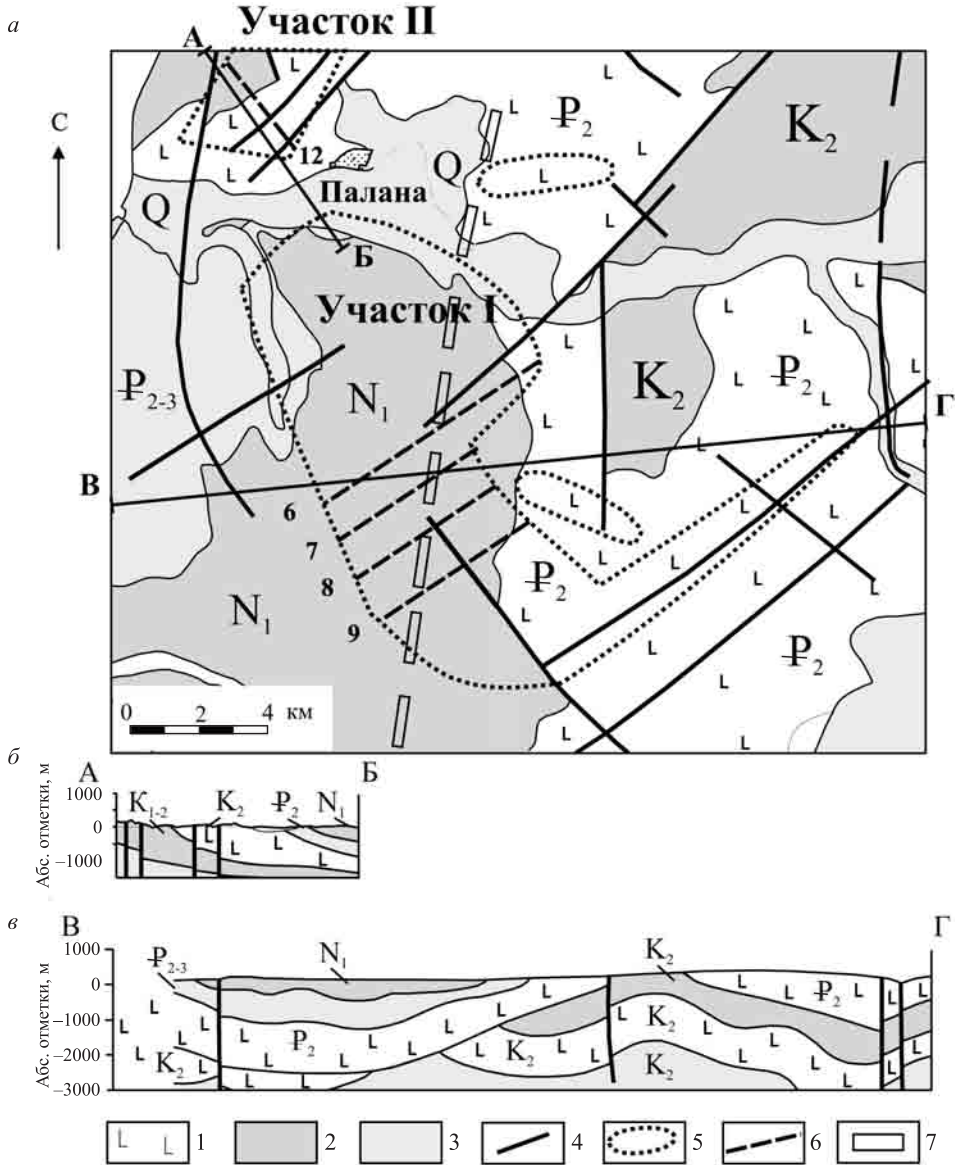


Рис. 2. Схема геологического строения Паланской площади (а), геологические разрезы по линии АБ (б) и ВГ (в)

1 — вулканогенные породы; 2 — вулканогенно-осадочные породы; 3 — осадочные породы; 4 — разрывные нарушения; 5 — участки работ методом АМТ-зондирований; 6 — положение профилей АМТ-зондирований; 7 — ось Таманваемской синклинали

рий. Его наиболее приподнятая часть расположена на правом берегу р. Паланы. Здесь по многочисленным нарушениям, главным образом взбросового характера, на дневную поверхность выведены отложения нижнего структурного яруса мелового возраста

та. В районе работ антиклинорий разобщен Таманваямской синклиналию, протягивающейся в север-северо-восточном направлении. Ось синклиналиной зоны, около которой мощность отложений верхнего яруса достигает максимальных значений, показана на рис. 2, а.

Работы методом АМТ-зондирований на Паланской площади выполнялись в два этапа — предварительном и детализационном. На первом этапе были проведены исследования на территории общей площадью 36 км² (рис. 2, а). Расстояние между профилями при площадных исследованиях составляло 1000–1500 м, между точками зондирования 250–500 м.

Анализ первичных данных АМТ-зондирований на участке I (псевдоразрезов ρ_k и φ_z , амплитудных полярных диаграмм — АПД основных и дополнительных компонент тензора импеданса, параметров неоднородности среды) показал, что геоэлектрическое строение большей части данного участка близко к одномерному. В то же время использование 2D-инверсии позволило уменьшить влияние статических искажений кривых АМТ-зондирований. Для 2D-бимодальной инверсии были использованы кривые ρ_k и φ_z по азимутам 45° (ТМ-мода) и 135° (ТЕ-мода). Применение бимодальной инверсии дает возможность получать по соседним профилям геоэлектрические разрезы, более увязанные между собою, чем разрезы, полученные в результате 2D-инверсии только по кривым ТМ-моды. В результате геоэлектрическое строение участка I было изучено до глубины 1500 м. Разрезы для нескольких профилей данного участка показаны на рис. 3 (схема расположения этих профилей приведена на рис. 2, а).

Полученные геоэлектрические разрезы являются трехслойными. Их геологическая интерпретация проводилась в соответствии с имеющимися данными о строении участка работ (рис. 2, в). В целом по участку I первый (верхний) высокоомный слой (значения удельного сопротивления — ρ составляют первые сотни ом-метров) мощностью около 500 м соответствует вулканогенно-осадочным породам неогена. Второй слой мощностью около 500 м характеризуется пониженными значениями $\rho = 30 - 50$ ом·м и отвечает осадочным породам палеогенового возраста. Третий высокоомный слой (ρ составляет первые сотни Ом-метров) соответствует вулканогенным образованиям палеогена.

Нарушение характера геоэлектрического разреза наблюдается в юго-западной части профилей 7, 8 и 9, где выделяется локальная проводящая аномалия шириной около 1500 м. Значения удельного сопротивления пород в аномальной зоне достигают единиц ом-метров, при этом наиболее проводящая часть аномалии расположена на глубинах около 700–1000 м. Выделенная по данным АМТ-зондирований проводящая аномальная зона является перспективной для обнаружения геотермального источника, однако данный участок находится на большом удалении от пос. Палана (около 10 км), и дальнейшее использование геотермального месторождения, в случае его обнаружения, затруднительно.

Основываясь на полученных результатах АМТ-зондирований и с учетом экономических факторов, для проведения второго этапа детальных исследований был выбран участок вблизи пос. Палана (участок II, рис. 2, а). На участке II на первом этапе работ выполнен небольшой объем зондирований по одному профилю, по результатам которого установлена перспективность его дальнейшего изучения.

При проведении работ методом АМТ-зондирований на втором этапе детализационных работ на участке II расстояние между профилями и точками зондирований составляло 250 м, использовалась технология работ с удаленной базовой точкой. Всего

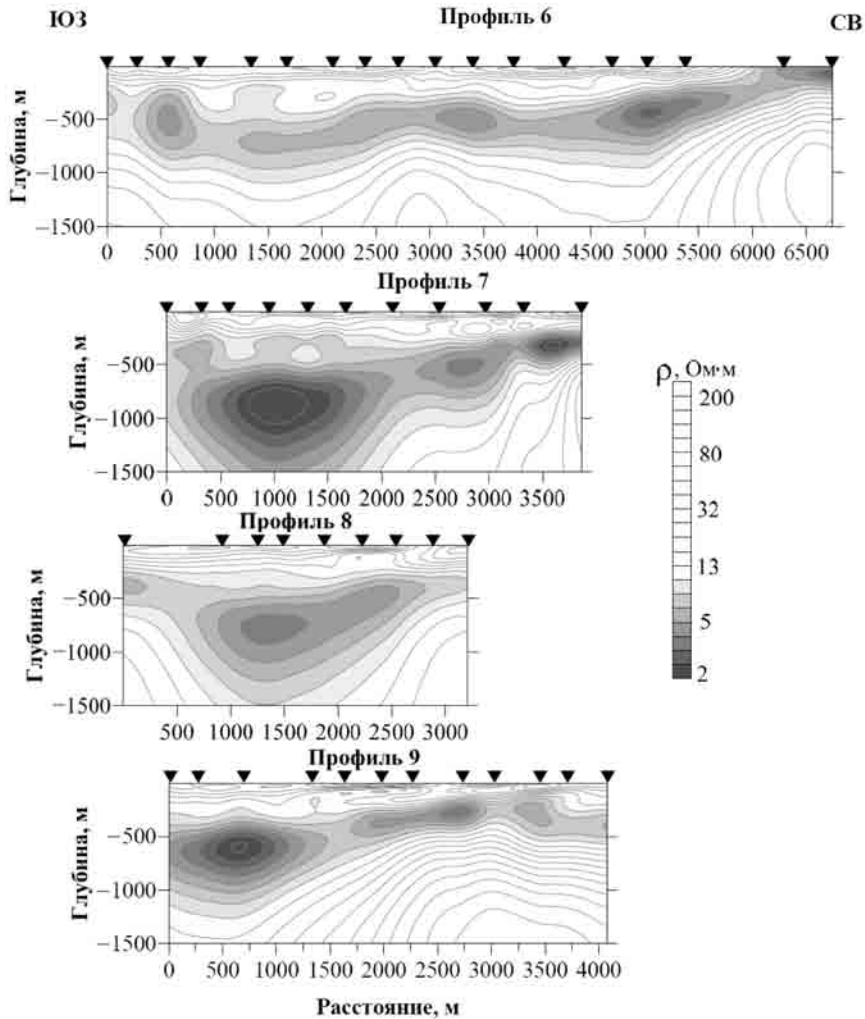


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D-инверсии данных АМТ-зондирований по нескольким профилям участка I Паланской площади
1 — геологические границы, 2 — положение точек АМТ-зондирований

было выполнено 133 зондирования, которые использованы для инверсии и построения разрезов по 10 профилям.

Требуемая относительно небольшая глубина исследований (2000 м) позволила оптимизировать методику работ, увеличить в рамках планируемых затрат число точек зондирований и выполнить площадные работы по достаточно густой сети наблюдений. По результатам анализа первичных данных АМТ-зондирований с учетом имеющейся геологической информации было установлено, что строение геоэлектрического разреза участка II до глубин около 2000 м является двумерным. АПД основных и дополнительных компонент тензора импеданса для большей части участка имеют вид, характерный

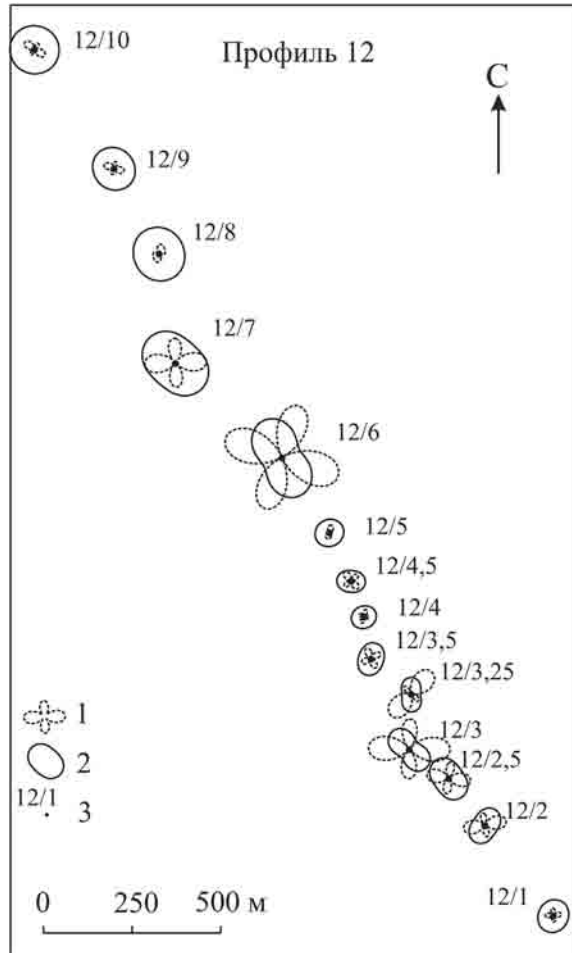


Рис. 4. Пример АПД основных и дополнительных компонент тензора импеданса для профиля 12 участка II Паланской площади на частоте 20 Гц
1 — АПД дополнительных компонент, 2 — АПД основных компонент, 3 — точки АМТ-зондирований и их номера. Соотношение масштабов основных и дополнительных компонент АПД составляет 1:4

для двумерных сред. Пример амплитудных полярных диаграмм для профиля 12 (положение профиля приведено на рис. 2, а) показан на рис. 4. На этом участке кривые ρ_k и φ_z для азимута 150° соответствуют ТМ-моду, для азимута 60° — ТЕ-моду.

На рис. 5 приведены планы изолиний ρ_k и φ_z на частоте 80 Гц. Ориентировка линейных проводящих аномалий в северо-восточном направлении, как для ТМ-моды, так и ТЕ-моды, показывает, что определяющими на участке являются двумерные структуры.

В последнее время для интерпретации кривых АМТ-зондирований при поисках геотермальных источников и определения мест заложения проверочных скважин, учиты-

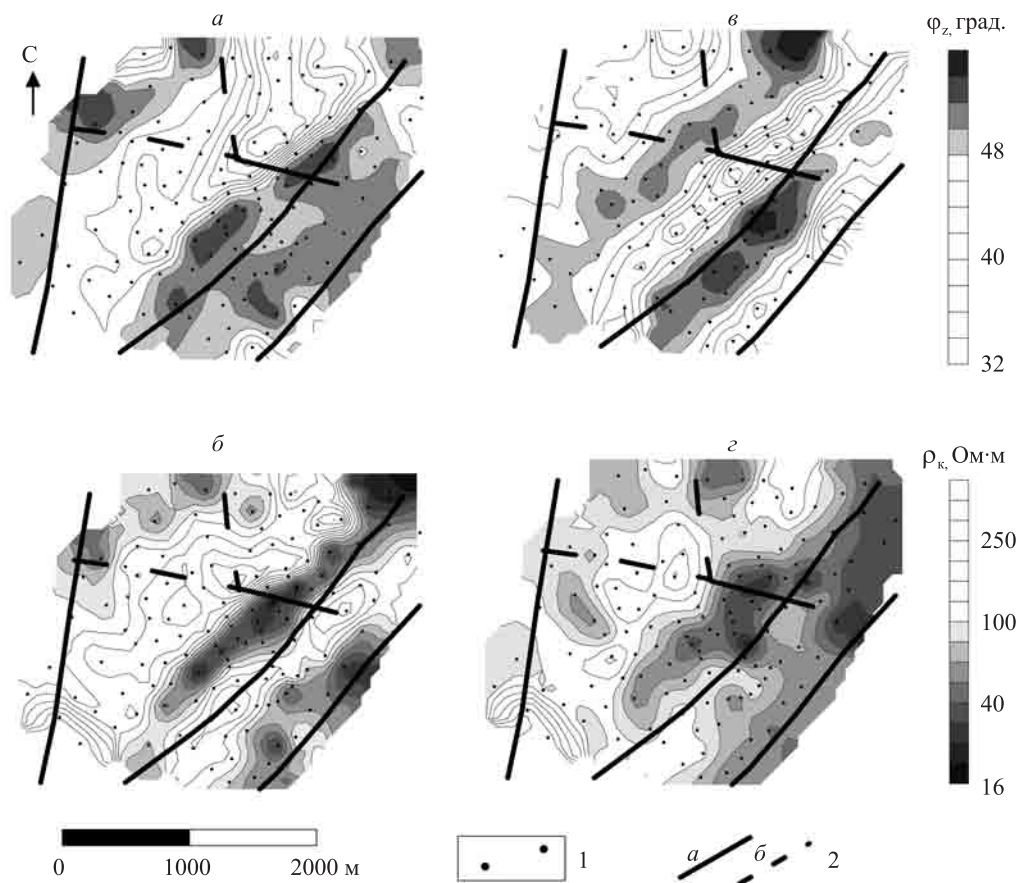


Рис. 5. Планы изолиний фазы импеданса (*a*, *б*) и кажущегося сопротивления (*б*, *г*) на частоте 80 Гц для ТМ-моды (*a*, *б*) и ТЕ-моды (*в*, *г*) для участка II Паланской площади 1 — точки АМТ-зондирований; 2 — разломы по данным предшествующих работ, надежно установленные (*a*) и предполагаемые (*б*)

вая часто встречающиеся на поисковых участках трехмерные объекты, применяется 3D-инверсия [8, 9]. Вместе с тем при уверенно установленной двумерной структуре участка поисков более устойчивые и достоверные данные дает 2D-инверсия кривых АМТ-зондирований. Кроме того, как отмечается в работе [8], по данным 2D-инверсии, когда ее применение оправдано и подтверждено анализом размерности среды, получаются более детальные геоэлектрические разрезы, чем по данным 3D-инверсии. Вынужденное использование робастных стабилизирующих функций при многопараметровой зависимости результатов 3D-инверсии приводит в этом случае к чрезмерно сглаженным геоэлектрическим разрезам.

Для проведения 2D-инверсии на участке II были выбраны профили, ориентированные вкрест простирания основных структур участка. По результатам 2D-бимодальной инверсии были получены геоэлектрические разрезы по профилям. Устойчивость реше-

ния обратной задачи и достоверность отражения геоэлектрического строения участка в результатах АМТ-зондирований подтверждается похожим характером разрезов по участку работ. В качестве примера на рис. 6 показаны геоэлектрические разрезы до глубины 3000 м по профилям 10, 10.5, 11, 11.5, 12. Использование 2D-инверсии также позволило уменьшить влияние статических искажений на кривые АМТ-зондирований.

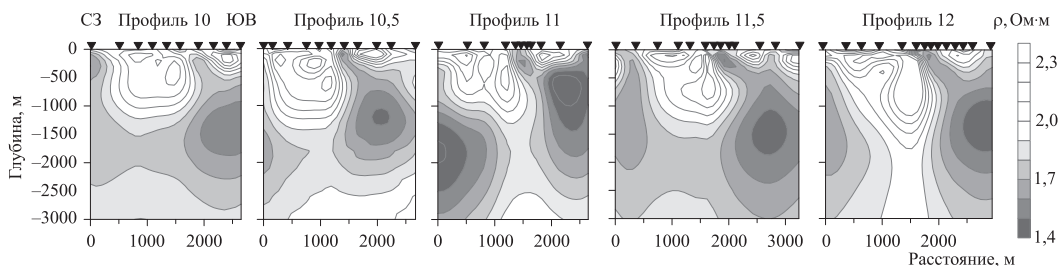


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по профилям 10, 10.5, 11, 11.5, 12 участка II Паланской площади

Полученные геоэлектрические разрезы для профилей в ненарушенной части участка имеют три слоя. Первый (верхний) высокоомный слой (ρ составляет первые сотни ом-метров) связан с толщиной вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород мелового возраста. Его мощность достигает 1500 м. Второй, более проводящий слой, характеризуется пониженными значениями $\rho = 30\text{--}50$ Ом·м и мощностью около 500 м. Он сложен осадочными породами мелового возраста. Значения ρ третьего слоя, представленного вулканогенными породами мелового возраста, составляют десятки-первые сотни ом-метров.

Нарушение горизонтально-слоистого характера геоэлектрических разрезов наблюдается в северо-западной и юго-восточной частях профилей. На рис. 7 геоэлектрические разрезы по профилям 10.5 и 11.5 приведены в более детальном масштабе до глубины 2500 м. Характерной особенностью разрезов является наличие в их юго-восточных частях глубинных зон низких значений удельного сопротивления изометрического сечения и наклонных проводящих каналов от глубинных зон до дневной поверхности, которые могут рассматриваться как зоны разгрузки возможного геотермального источника. Положение проводящих глубинных зон совпадает с двумя разломами, выделенными по данным предшествующих геолого-геофизических работ (см. рис. 5). На рис. 7 один из этих разломов показан сплошной вертикальной линией, второй разлом находится за пределами профиля. Кроме того, на геоэлектрических разрезах в северо-западных частях профилей выделяются проводящие зоны, вероятно, связанные с разломом, который не был выявлен на предшествующей стадии работ (показан на рис. 7 вертикальными пунктирными линиями).

На рис. 8 приведены планы изолиний ρ для глубин 250, 1000 и 2000 м, построенные по результатам 2D-инверсии. На планах изолиний глубинные зоны в юго-восточной и северо-западной частях профилей объединяются в единые проводящие зоны северо-восточного простирания. Наиболее контрастной является юго-восточная проводящая аномальная зона. На глубине 250 м она разделена на две подзоны северо-восточного простирания шириной около 500 м, юго-восточные края которых совпадают с линиями ранее установленных разломов. На глубинах более 500 м аномалия проявлена в виде единой проводящей зоны (шириной около 1000 м) северо-восточного простирания.

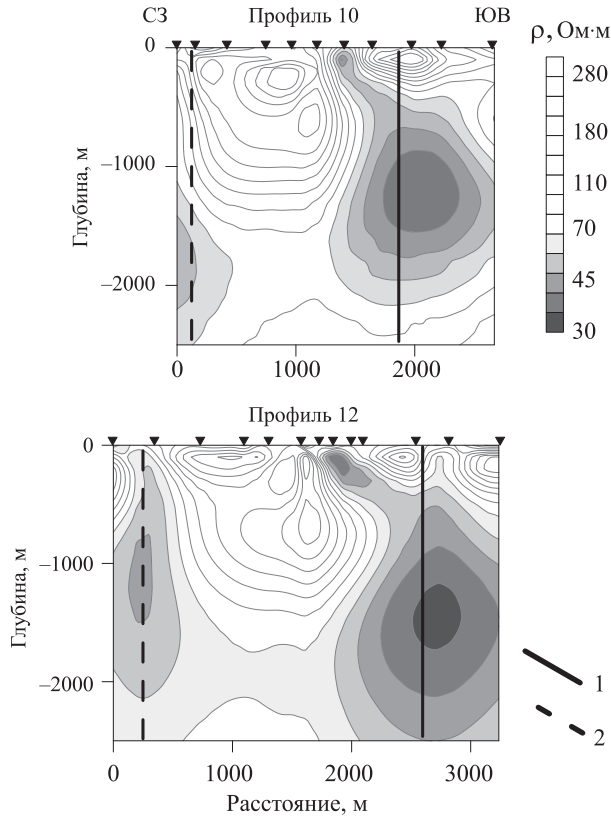


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы по профилям 10 и 12 участка II Паланской площади
1–2 — разломы: надежно установленные (1) и предполагаемые (2)

ния, расположенной между двумя разломами. Смещение аномальной зоны с глубиной в юго-восточном направлении свидетельствует о наклонном залегании разрывных нарушений, что подтверждается характером аномалий на геоэлектрических разрезах (см. рис. 6, 7). Наиболее проводящая часть аномальной зоны расположена на глубинах около 1000–1500 м и характеризуется значениями ρ около 20 Ом·м.

На глубинах более 2000 м, при сохранении основных структурных элементов участка — наличия тектонических зон северо-восточного простирания и его двухмерного характера, выделяются две слабо проявленные проводящие аномальные зоны северо-западного простирания, связанные с более глубинными разломами. Таким образом, по данным АМТ-зондирований в пределах участка II выделяются две системы разрывных нарушений — менее глубинных северо-восточного простирания и более глубинных северо-западного простирания.

Результаты АМТ-зондирований были использованы при выборе участка, наиболее перспективного для выявления геотермального источника. Выделенная по данным АМТ-зондирований проводящая аномалия в юго-восточной части участка II между профилями 10.5 и 11.5 в зоне пересечения разнонаправленных разломов является пер-

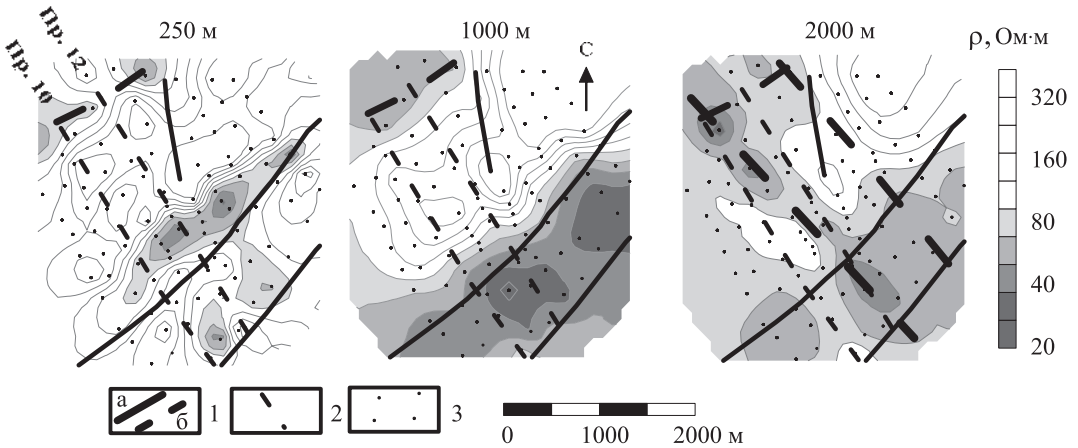


Рис. 8. Планы изолиний удельного сопротивления на глубинах 250, 1000 и 2000 м по участку II Паланской площади

1 — разломы, установленные по данным предшествующих работ (а) и по данным АМТ-зондирований (б); 2 — профили 10 и 12 АМТ-зондирований; 3 — точки АМТ-зондирований

спективной для дальнейшего доизучения и последующей проверки бурением. Она расположена поблизости от предполагаемого по данным ООО «Аква» глубинного интрузивного тела в юго-восточной части участка работ [10]. Эта аномальная зона расположена на небольшом удалении от пос. Палана, и дальнейшее использование геотермального месторождения, в случае его обнаружения, будет экономически целесообразно.

Результаты работ на Ключевской площади

Схема геологического строения Ключевской площади показана на рис. 9. Район работ находится в северо-восточной части Центрально-Камчатской рифтовой зоны на стыке таких крупных структур, как Хавывенское поднятие, погребенное поднятие мезозойского фундамента и Хапицкая впадина, осложненных восточной ветвью Центрально-Камчатского глубинного разлома (ЦК-2), к которой приурочены действующие вулканы Ключевской и Шивелучской групп, а также субширотным Крестовским (КРТ) и северо-западным (СЗ) разломами. Зона глубинного нарушения северо-восточного направления ЦК-2 относится к линейным структурам 1-го порядка. Наличие вдоль нее серии активно действующих вулканов указывает на хорошую проницаемость данной линейной зоны, разделяющей Хавывенское поднятие и Хапицкую впадину, заполненной осадочно-вулканогенными отложениями неоген-четвертичного возраста.

Разломы субширотного и северо-западного направлений относятся к линейным структурам следующих порядков. В целом структурно-геологическое строение района и участка сложноблоковое, с тектоническими межблоковыми границами различного порядка.

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие породы различного возраста: от мелового до современного. Фундамент мел-палеогенового возраста

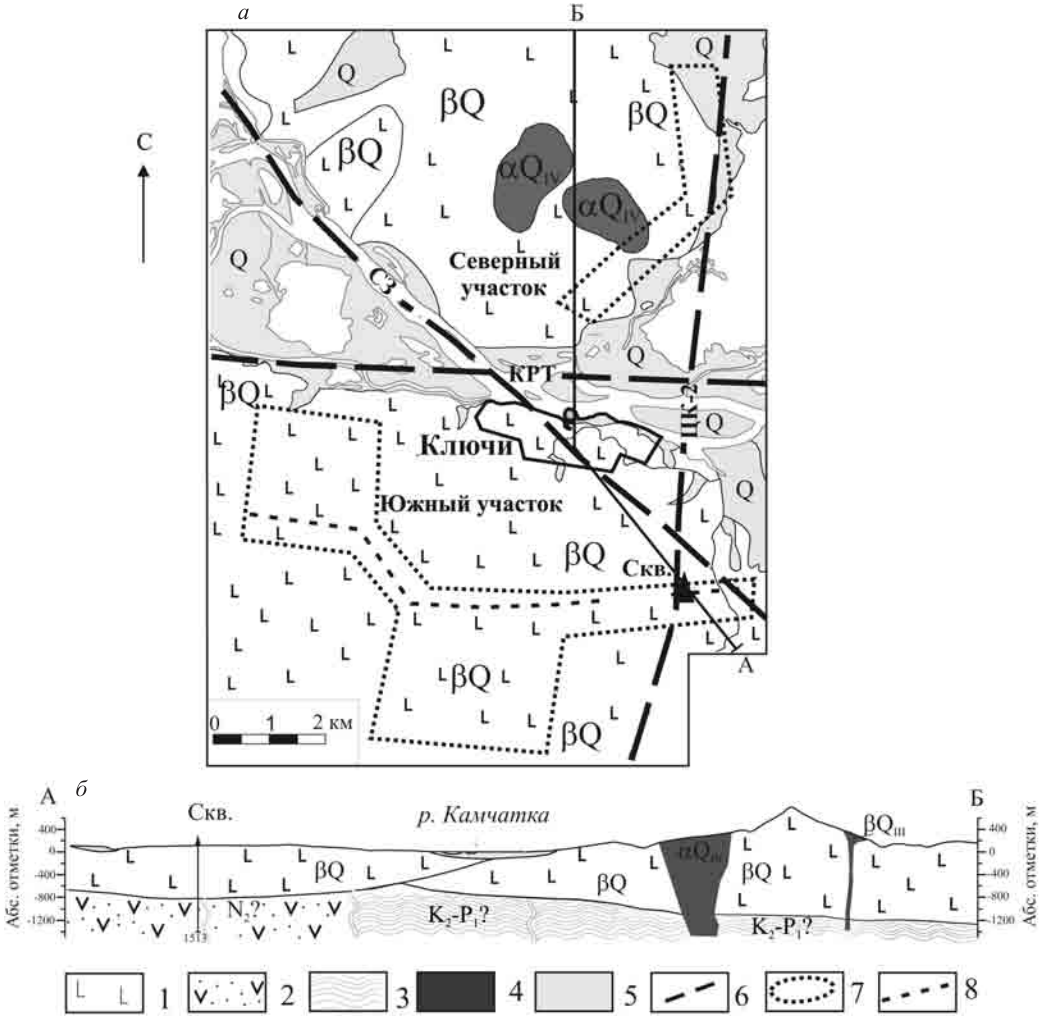


Рис. 9. Схема геологического строения Ключевской площади (а) и геологический разрез по линии АБ (б)
 1 — вулканогенные породы; 2 — вулканогенно-осадочные породы; 3 — метаморфизованные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы фундамента; 4 — интрузивные тела; 5 — осадочные породы; 6 — разрывные нарушения; 7 — участки работ методом АМТ-зондирования; 8 — субширотный профиль через южный участок

та, представленный метаморфизованными вулканогенно-осадочными породами мелового возраста и вулканогенно-осадочными породами палеогена, залегает на глубинах от 1000 до 3500 м. Выше залегает толща вулканогенно-осадочных пород предположительно плиоценового возраста мощностью до 600 м. С угловым несогласием она перекрыта толщей вулканогенных пород основного состава четвертичного возраста. Мощность толщи достигает 1000 м. В пределах северного участка работ зафиксированы выходы магматических образований, представленных интрузиями андезитов.

В районе пос. Ключи работы выполнялись на двух участках: южном и северном, выбранных по комплексу геолого-геофизических данных в качестве перспективных на обнаружение геотермальных источников. Расстояние между профилями и точками зондирования составляло 500 м. Всего были проведены исследования на территории общей площадью 18 км².

Анализ первичных данных АМТ-зондирований по южному участку показал, что строение среды здесь близко к одномерному. Вместе с тем для уменьшения влияния статических искажений была выполнена 2D-инверсия данных. При этом была использована программа Shell2D и данные АМТ-зондирований для азимутов 0 и 90 град., условно отнесенные к кривым ТМ- и ТЕ-мод соответственно.

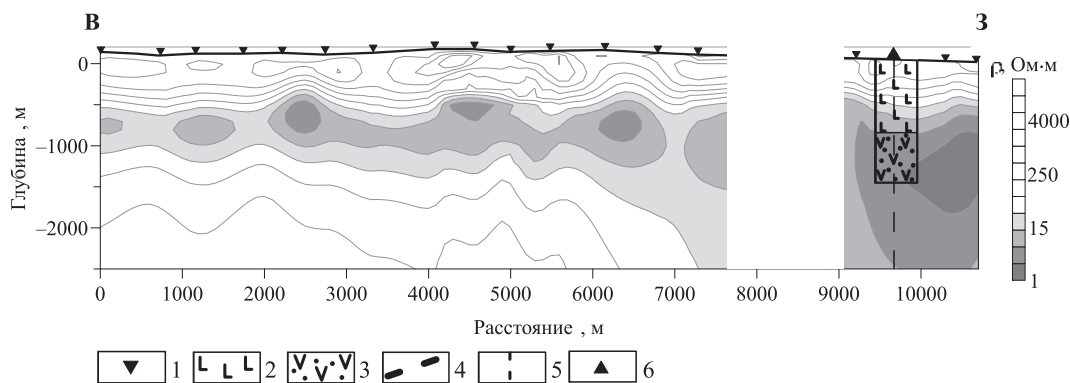


Рис. 10. Геоэлектрический разрез по субширотному профилю через южный участок Ключевской площади по результатам 2D-инверсии данных АМТ-зондирований
1 — точки АМТ-зондирований; 2 — вулканогенные породы; 3 — вулканогенно-осадочные породы; 4 — геологические границы; 5 — разрывные нарушения; 6 — скважины

На рис. 10 показан геоэлектрический разрез для субширотного профиля через южный участок (положение профиля показано пунктиром на рис. 9, а), полученный по результатам 2D-бимодальной инверсии данных АМТ-зондирований. Разрез является трехслойным. Геологическая интерпретация полученных данных проводилась с учетом имеющейся геологической информации, в том числе с учетом данных по скважине в восточной части профиля (рис. 9, б). Как видно из рисунка, наблюдается достаточно уверенная корреляция между геоэлектрическим разрезом и данными бурения.

Верхний (первый) слой характеризуется повышенными значениями удельного сопротивления: от 1000 Ом·м в нижней части и до 6000 Ом·м в верхней части слоя. Слой соответствует толще вулканогенных базальтовых образований средне-верхнеплейстоценового и верхнеплейстоценового возраста, его мощность от 650 до 900 м. Второй слой геоэлектрического разреза характеризуется пониженными значениями удельного сопротивления — от 3 до 25 Ом·м и соответствует толще туфов плиоценового возраста и вулканогенно-осадочным породам палеогена. В западной части профиля мощность второго слоя около 600 м, в центральной части — около 1000 м, в восточной части (в районе скважины) — более 1500 м. В целом мощность перекрывающих отложений в районе Центрально-Камчатского разлома достигает 2500 м.

В восточной части участка рассматриваемый профиль пересекается Центрально-Камчатским разломом (см. рис. 9), что проявляется на данных АМТ-зондирований в виде проводящей аномальной зоны в восточной части профиля. Значения удельного сопротивления в этой зоне составляют первые единицы ом-метров.

В целом данные АМТ-зондирований по южному участку, показывающие небольшие размеры проводящей зоны в его восточной части, не позволяют высоко оценивать перспективы участка на обнаружение геотермального месторождения.

На северном участке АМТ-зондирования были выполнены на двух параллельных профилях. Анализ первичных данных показал, что строение участка работ близко к двумерному. При этом кривые АМТ-зондирований для азимута 45 град. соответствуют ТМ-поляризованному, а 135 град. — ТЕ-поляризованному полю.

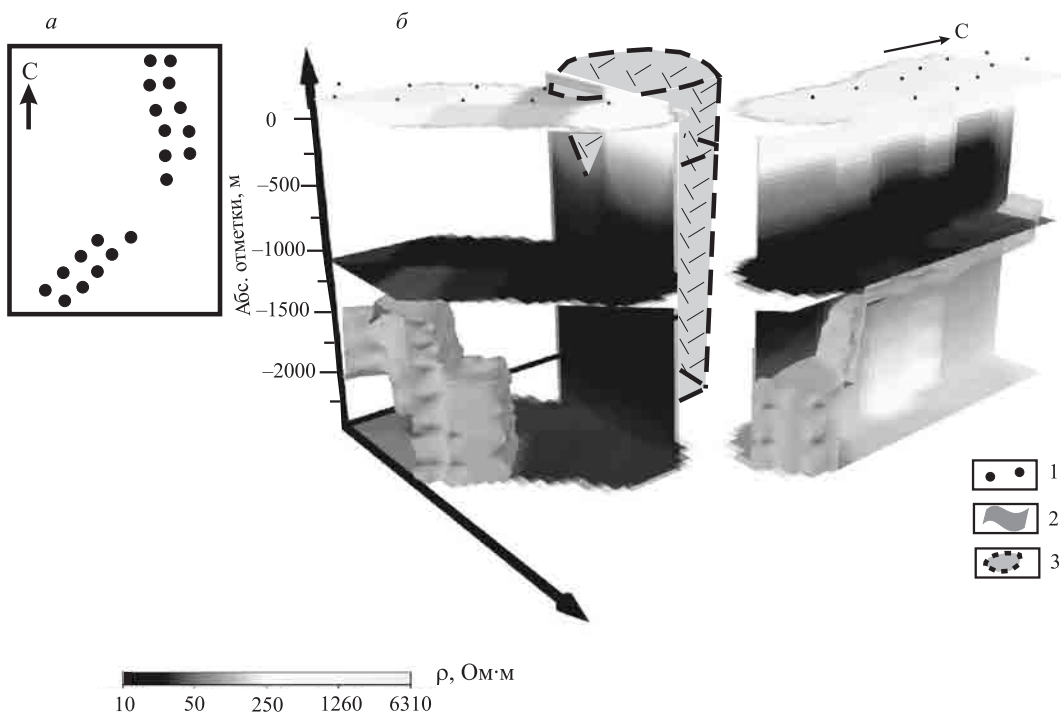


Рис. 11. Объемная блок-диаграмма распределения удельного сопротивления до глубины 2500 м для северного участка Ключевской площади (а) и схема расположения точек АМТ-зондирований (б) 1 — точки АМТ-зондирований; 2 — изоповерхность значений удельного сопротивления 30 Ом·м; 3 — интрузивное тело

По результатам 2D-бимодальной инверсии данных АМТ-зондирований были получены геоэлектрические разрезы до глубины 2500 м. На рис. 11 показана объемная блок-диаграмма распределения удельного сопротивления, а также приведено положение интрузивного тела, пересекаемого профилями. Геоэлектрический разрез является трехслойным. Для первого (верхнего) слоя характерны повышенные значения удельного сопротивления от 2000 до 10000 Ом·м. Значения мощности слоя достигают 600 м.

Второй слой характеризуется значениями удельного сопротивления от 6 до 30 Ом·м и мощностью около 1050 м. Значения удельного сопротивления третьего (нижнего) слоя находятся в диапазоне от 30 до 200 Ом·м.

Нарушение характера геоэлектрических разрезов отмечается в центральной части северного участка. Здесь наблюдается субвертикальная проводящая аномалия, характеризующаяся падением в северо-восточном направлении. Изоповерхность значений удельного сопротивления на блок-диаграмме соответствует значению 30 Ом·м и отражает кровлю третьего слоя. Как видно, в центральной части участка данная граница прерывается.

По геологическим данным разрез в районе северного участка является двухслойным (см. рис. 9, б). В нижней части разреза залегает мел-палеогеновый фундамент, представленный метаморфизованными вулканогенно-осадочными породами, который несогласно перекрывают базальты и андезибазальты среднего звена четвертичной системы. Эти породы прорываются интрузией среднего состава в центральной части участка.

Полученный по результатам АМТ-зондирований геоэлектрический разрез позволяет уточнить геологическое строение участка работ. Первый высокоомный слой связан с базальтами и андезибазальтами среднего звена четвертичной системы. Второй проводящий слой, уверенно трассирующийся на всех геоэлектрических разрезах, по аналогии с участками 1 и 2, может быть связан с неогеновыми отложениями туфов и вулканогенно-осадочными породами палеогена. Третий слой, характеризующийся повышенными значениями удельного сопротивления, соответствует метаморфизованным вулканогенно-осадочным породам мел-палеогенового фундамента. Наблюдается погружение кровли этого слоя вблизи интрузивного тела в центральной части участка.

Молодое интрузивное тело в центральной части участка потенциально может являться источником тепла для образования термальных вод. Наличие в приконтактовой зоне интрузивного тела наклонной проводящей аномалии по данным АМТ-зондирований свидетельствует о высокой трещиноватости пород, что может способствовать циркуляции подогретых вод от интрузивного тела к поверхности. Таким образом, центральная часть северного участка может быть выделена как перспективная для обнаружения геотермального источника.

Заключение

В статье рассмотрены результаты работ методом АМТ-зондирований, выполненных для поисков малоуглубинных (до 2 км), низко- и среднетемпературных (до 100–150°C) геотермальных источников в северо-западной и центральной частях п-ова Камчатка.

На Паланской площади, расположенной в северо-западной части полуострова, работы были проведены в два этапа: предварительном и детализационном. На предварительном этапе были оценены перспективы нескольких заранее выбранных участков района. На следующем этапе детально исследован наиболее перспективный участок около пос. Палана. Требуемая относительно небольшая глубина исследований позволила оптимизировать методику работ, увеличить в рамках планируемых затрат число точек зондирований и выполнить площадные работы на перспективном участке по густой сети наблюдений. В результате была надежно установлена двумерная структура участка и с использованием 2D-инверсии получены геоэлектрические разрезы до глу-

бины 2.5–3 км. В юго-восточной части участка в зоне пересечения разнонаправленных разломов выделена проводящая аномалия, которая является перспективной для дальнейшего доизучения и последующей проверки бурением.

На Ключевской площади, расположенной в центральной части полуострова, работы были выполнены на южном и северном участках. Для южного участка надежно установлено погружение мел-палеогенового фундамента в восточном направлении и увеличение мощности перекрывающих отложений до 2500 м в районе Центрально-Камчатского разлома. На северном участке проведение работ методом АМТ-зондирований позволило уточнить его геологическое строение и установить трехслойный характер геоэлектрического разреза, что связано с присутствием толщи вулканогенно-осадочных пород в интервале глубин 600–1000 м. В центральной части северного участка было установлено наличие проводящей аномалии в районе контакта интрузивного тела и вмещающих пород. Данный участок выделен как перспективный для обнаружения возможного геотермального месторождения.

Работа выполнена при поддержке исследовательского гранта Санкт-Петербургского государственного университета и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № П999. Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО «Аква» и ООО «ГФЭ» за помощь в организации и проведении работ.

Указатель литературы

1. *Harinarayana T., Abdul Azeez K. K., Naganjaneyulu K. et al.* Magnetotelluric studies in Puga valley geothermal field, NW Himalay, Jammu and Kashmir, India // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. Vol. 138. P. 405–424.
2. *Yu G., Strack K.-M., Allegar N. et al.* Characterising a geothermal reservoirs using broadband 2-D MT survey in Theistareykir, Iceland: The extended abstracts of the 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, China, 2008. P. 385–388.
3. *Нурмухамедов А. Г., Чернев И. И., Алексеев Д. А., Яковлев А. Г.* Трехмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм // *Физика Земли*. 2010. №9. С. 15–26.
4. *Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
5. *Simpson F., Bahr K.* Practical magnetotellurics. Cambridge university press, 2005. 254 p.
6. *Сараев А., Головенко В., Ларионов К., Смирнова Т.* Аппаратура аудиоманнитотеллурических зондирований АКФ-4М // *Индустрия*. 2003. №3. С. 110.
7. *Siripunvaraporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // *Geophysics*. 2000. Vol. 65, N 3. P. 791–803.
8. *Cumming W., Mackie R.* Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D and 3D inversion and TDEM static shift correction illustrated by a Glass Mountain case history: *Proceedings world geothermal congress 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April, 2010*.
9. Сайт компании «KMS Technologies»: http://www.kmstechnologies.com/Files/MT_for_Geothermal_Exploration_2008_FINAL_10.17.08.pdf.
10. *Antaschuk K., Saraev A., Kandinskaya S. et al.* Application of MT-AMT soundings for geothermal exploration on the Kamchatka Peninsula // *Extended abstracts of the 73rd EAGE Conference and Exhibition 2011, Vienna, Austria, 23–26 May, 2011*. P. 324.