

РАБОТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

УДК 550.37

Научная статья

Геоэлектрический разрез Паужетской гидротермальной системы (южная Камчатка) по данным магнитотеллурического зондирования

М. А. Клементьев^{1,2}, В. А. Логинов²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 6, Россия

E-mail: boltozavar@gmail.com

Проведены геофизические исследования методом магнитотеллурического зондирования на территории Паужесткой гидротермальной системы с целью изучения ее строения. Выполнено численное двумерное моделирование. Выделен проводящий горизонт с низким удельным электрическим сопротивлением.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, Паужетская гидротермальная система, проводящий горизонт, электрическое сопротивление

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-205-214

Поступила в редакцию: 15.04.2020

В окончательном варианте: 13.05.2020

Для цитирования. Клементьев М. А., Логинов В. А. Геоэлектрический разрез Паужетской гидротермальной системы (южная Камчатка) по данным магнитотеллурического зондирования // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2020. Т. 31. № 2. С. 205-214. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-205-214

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Клементьев М. А., Логинов В. А., 2020

Введение

Паужетская гидротермальная система представляет интерес не только с научной точки зрения, но и с экономической. В данном районе построена первая в СССР геотермальная электростанция, снабжающая электричеством ближайшие населенные пункты и предприятия. Не смотря на проведенную 2011 году модернизацию оборудования и подъем мощности до 12 МВт, она производит не более 5-7 МВт электроэнергии, что на данный момент недостаточно [5,6]. В связи с этим необходимо провести новые исследования, которые позволят дополнить имеющиеся представления о строении этой гидротермальной системы. В дальнейшем эти данные помогут выяснить причины такой низкой выработки электроэнергии и, возможно, решить этот вопрос.

Финансирование. Исследование выполнялось без финансирования

Заключение

В результате проведенной работы был получен геоэлектрический разрез Паужетской гидротермальной системы. Глубина разреза до 15 км. Выделено 6 основных горизонтов. Верхняя часть разреза хорошо согласуется с результатами бурения и других геофизических исследований. Наиболее важным результатом является выделение корового проводящего слоя с пониженным электрическим сопротивлением и мощностью 4 км. Предположительно, этот горизонт играет ключевую роль в тепловом питании Паужетской гидротермальной системы.

Полученные данные послужат основой для дальнейшего развития уже имеющихся представлений о строении гидротермальной системы.

Метод магнитотеллурического зондирования был выбран из-за необходимости получения информации о геологическом разрезе на больших глубинах (скин-эффект), а также его эффективности при изучении гидротермальных систем [1,7].

Целью данной работы было построение геоэлектрического разреза. Для достижение данной цели был выполнен ряд задач: проведение полевых работ; обработка и анализ данных; численное двумерное моделирование; построение разреза.

Геологическое строения района Паужетской гидротермальной системы

Паужетский геотермальный район ограничен на севере бассейном р. Голыгиной, на западе побережьем Охотского моря, на юге депрессией р. Камбальной и на востоке Береговым хребтом, и расположен на территории Паужетской тектономагматической субколыцевой структуры. В настоящее время структура представлена в виде пологого аккумулятивно-тектонического свода. В центре свода расположена вулканотектоническая депрессия (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения пунктов зондирования (Фрагмент государственной геологической карты М: 1:200000)

Размеры депрессии 25x25 км, площадь составляет 450 км, а глубина более 500 м [2]. На западе депрессия граничит с г. Ключевской

В разрезе выделяются субвертикальные тектонические блоки (рис.2). Амплитуда поднятия не менее 1000 м.

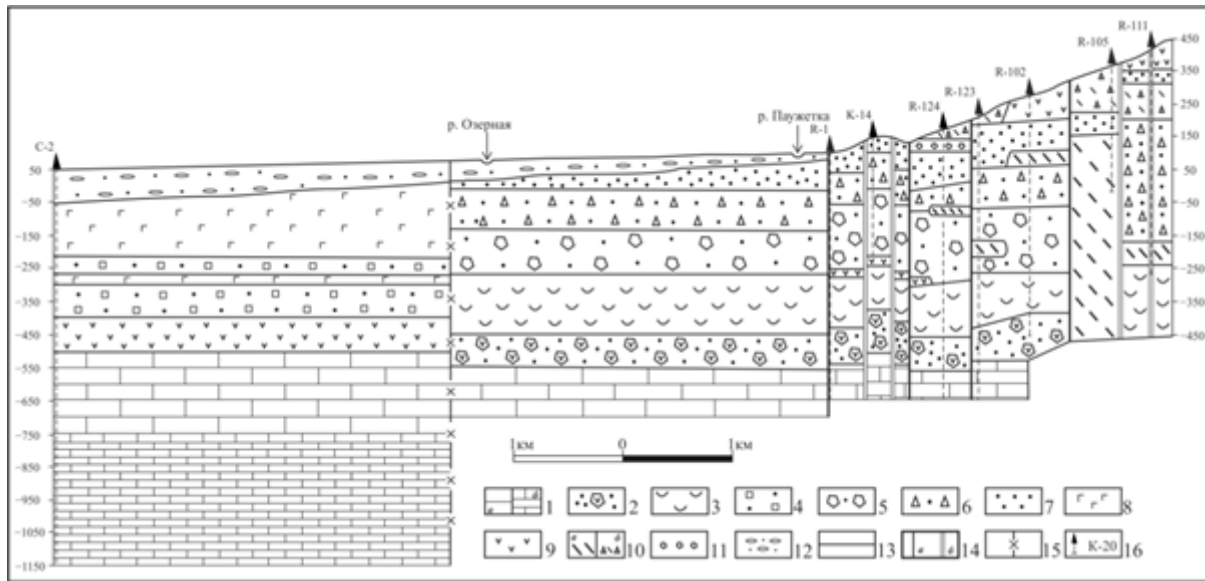


Рис. 2. Геологический разрез района Паужетской гидротермальной системы. Составлен С. Н. Рычаговым на основании поисково-разведочных работ и исследований. 1 – вулканические песчаники и туфопесчаники анавайской серии: а – с прослоями гравелитовой размерности, б – мелко-тонкообломочные отложения основания разреза; 2 – англомератовые туфы андезибазальтового состава (алнейская серия); 3 – риолитовые кристаллолитовитрокластические псефитовые туфы (голыгинская серия); 4 – нерасчлененные туфы и туффиты паужетской свиты; 5 – грубообломочные литовитрокластические туфы адезидацитового состава (нижнепаужетская подсвита); 6 – псефитовые туфы андезидацитового состава (среднепаужетская подсвита); 7 – туфогенноосадочные отложения дацитового и андезидацитового состава (верхнепаужетская подсвита); 8 – базальты магматического комплекса г. Ключевской (предположительно среднечетвертичного возраста); 9 – андезибазальты (предположительно алнейской серии), 10 – средне-верхнечетвертичные экструзии (а) и лавы (б) дацитов; 11 – лавобрекчии оснований потоков лав и краевых частей экструзивных тел; 12 – аллювиальные валунно-галечные отложения; 13 – литологические и интрузивные границы; 14 – тектонические нарушения: а – разломы, б – зоны повышенной трещиноватости пород; 15 – условная граница Ключевского магматического комплекса (левая часть разреза) и литологического комплекса Паужетской вулcano-тектонической депрессии; 16 – поисковые и разведочные скважины

Тип гидротермальной системы – вододоминирующий гидродинамический. В геологическом строении системы выделяют два водовмещающих комплекса: верхний и нижний. Верхний представлен литовитрокластическими туфами и псефитовыми туфами андезитового состава. Нижний представлен англомератовыми туфами алнейской серии.

В результате сопоставления разреза на основе одномерной модели и разреза гидротермальной системы по данным бурения и др. получилось выделить ряд слоев (сверху вниз). Первый слой мощностью 10 – 100 м имеет сопротивление до 100

Ом•м. На поверхности по всему профилю залегают верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные отложениями (пески, алевролиты) и обвально-оползневые образования. В долине реки (пункты наблюдения (далее п.н.) 1-6) их подстилают пепловидные пемзы направленного взрыва. Далее залегает слой пемзовых лапилли, который образовались в спокойной мелководной обстановке. Затем идет толща голоценовых вулканогенно-осадочных пород, состоящих из песчаников в верхней части и глин в нижней части. Их подстилают флювиогляциальные отложения плейстоценового времени. На территории Камбального поднятия (п. н. 10-18) под аллювиальными отложениями располагаются андезито-базальты и дациты. Под ними залегают потоки мелкокристаллических андезито-базальтов черного цвета.

Глубже залегает второй слой с пониженными сопротивлениями 2 – 20 Ом•м и мощностью до 600 м. Имеет выход на поверхность на территории Верхне-Паужетского термального поля (п. н. 7-9). В районе п. н. 16-17 прерывается, возобновляясь в п. н. 18. Данный слой представляет собой паужетскую свиту, голыгинскую свиту и алнейскую серию. Верхнепаужетская подсвита сложена песчано-пепловыми и пемзо-пепловыми, алевролитовыми туфами кислого состава. Туфы несут признаки отложения в мелком бассейне. Возраст верхнепаужетской подсвиты – конец среднего плейстоцена – начало позднего плейстоцена. Среднепаужетская свита состоит из 5 горизонтов (сверху-вниз): 1) зелено-серые туфы дацитового и андезито-дацитового состава, 2) псефитовые и псефосаммитовые туфы андезито-дацитового состава, 3) туфобрекчии, состоящие из обломков андезитов, андезито-дацитов, реже базальтов, 4) псефосаммитовые, псефитовые литовритокластические туфы андезито-дацитового состава, 5) литовритокластические туфы зеленовато-серого цвета андезито-дацитового состава с вулканомиктовыми песчаниками и алевролитами серого цвета. В целом среднепаужетская подсвита сложена псефитовыми туфами андезито-дацитового состава с большим количеством обломков пемз. Нижнепаужетская свита состоит из туфоконгломератов, туфобрекчий и туфопесчаников, а также лавовых потоков основного состава. Голыгинский горизонт представлен ингимбритами и спекшимися туфами. Туфы содержат обломки лав базальтов и кристаллов кварца. По данным датировки, образование голыгинской свиты произошло в среднем плейстоцене. Алнейская серия состоит из туфобрекчии основного состава с прослоями туфов, а также потоков лав андезито-базальтов и андезитов. Ее возраст верхнемиоценовый-нижнеплиоценовый.

Третий слой с сопротивлением 50 Ом•м представлен вулканомиктовыми песчаниками и алевро-песчаниками. Цвет песчаников зеленовато-серый. Имеют морское происхождение. Возраст толщи по данным абсолютной датировки – раннемиоценовый [2].

Методика исследований

Исследования выполнены методами магнитотеллурического (МТЗ) и аудиоманнитотеллурического (АМТЗ) зондирования. Комплект оборудования представлен двумя пятиканальными станциями MTU-5A канадского производства компании Phoenix Geophysics. Данные станции регистрируют магнитные (H_x , H_y , H_z) и электрические (E_x , E_y) компоненты естественного переменного электромагнитного поля Земли. Диапазон регистрируемых периодов варьируется от 0,0001 до 1000 с и более. Электрическое поле регистрировалось четырехэлектродной крестообразной установ-

кой, заземленной слабополяризуемым электродами. Длина измерительных линий для МТЗ – 90 м, для АМТЗ – 50 м. Азимуты приемных линий – 0° и 90°. Измерения проводились в 18 пунктах наблюдений: 18 методом АМТЗ, 5 методом МТЗ (рис. 1). Шаг по профилю менялся от 200 до 700 м. Подавление антропогенных и ветровых помех осуществлялось при помощи синхронной записи с удаленной базовой станцией. В результате были получены тензоры импеданса, кривые импеданса и фазы импеданса [1]. Точность определения тензора импеданса – первые проценты, фаз – первые градусы.

Анализ кривых МТЗ

После обработки МТ-данных были получены продольные и поперечные кривые кажущегося электрического сопротивления, а также фазовые кривые. Качественный анализ кривых показывает, что они подвержены ρ -эффекту (рис. 3).

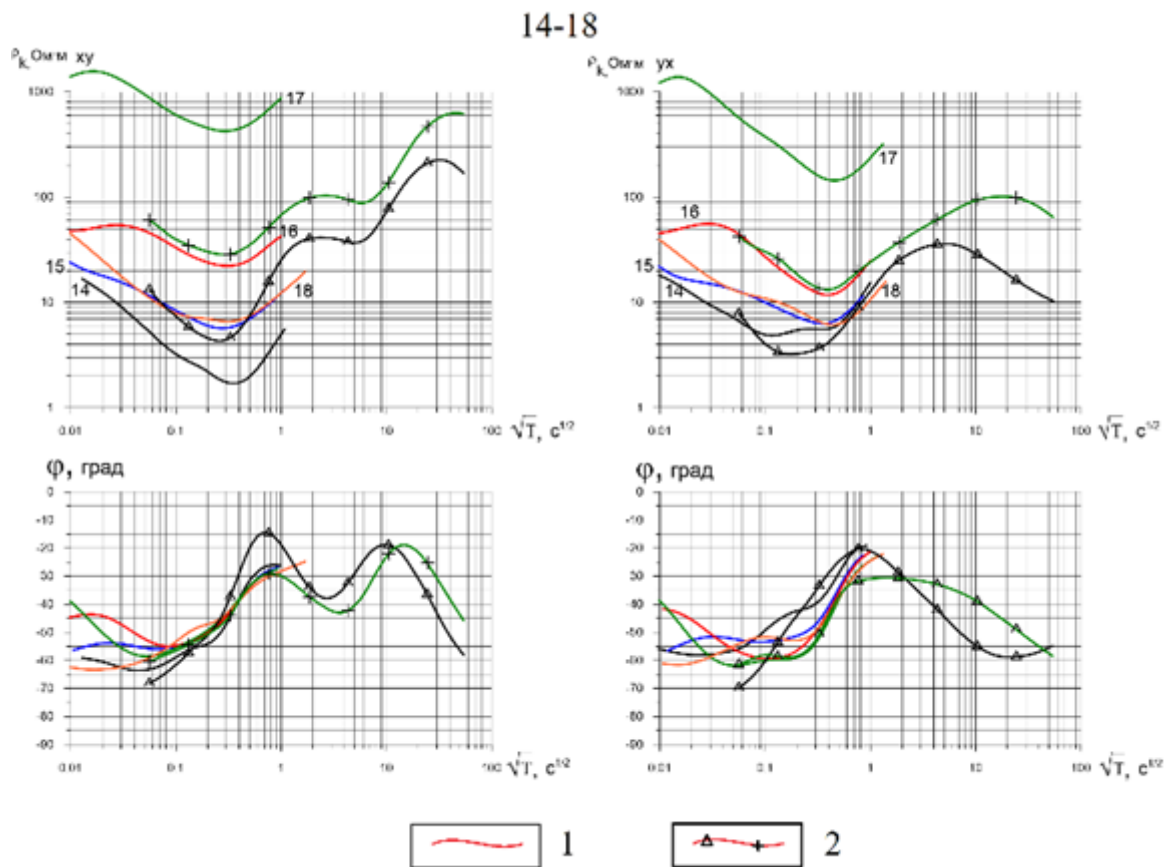


Рис. 3. Кривые МТЗ и АМТЗ в пунктах наблюдений 14-18: 1 – кривые АМТЗ, 2 – МТЗ

Данный эффект выражен в смещении кривых кажущегося сопротивления по оси ω , при этом форма кривой не меняется, а фазовые кривые этому эффекту не подвержены. Пакет программ для обработки данных имеет набор функций, позволяющий подавить данный эффект. В результате были получены кривые, минимально подверженные данному эффекту (рис. 4).

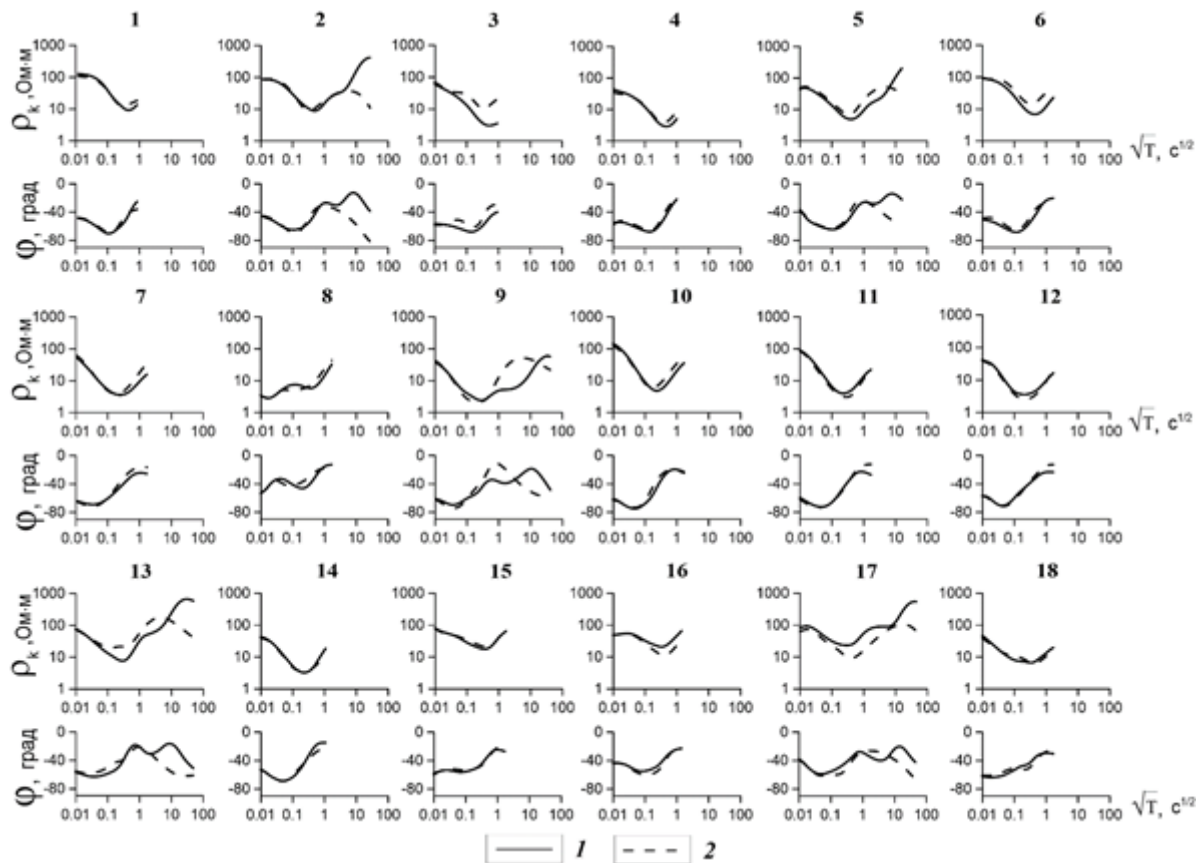


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления и фазовые кривые Номера на схеме – пункты наблюдений. 1 – продольные кривые, 2 – поперечные.

Далее более подробно рассмотрим кривые кажущегося сопротивления. Продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления (ρ) начинаются с максимума (диапазон \sqrt{T} от 0.01 до 0.1 $\text{с}^{0.5}$), на данном периоде $\rho=100$ Ом·м. Данный максимум характеризует аллювиально-деллювиальные отложения. Затем следует минимум (диапазон \sqrt{T} от 0.5 до 0.8 $\text{с}^{0.5}$). Он обусловлен наличием толщи вулканогенно-осадочных пород с ρ от 2 до 20 Ом·м. Данная толща, в основном, представлена туфами паужетской свиты.

Далее формы продольных и поперечных кривых имеют различия, что говорит о неоднородности геологической среды в различных направлениях. Продолжим с продольных кривых, затем вернемся к поперечным. В высокочастотной области выделяется максимум (диапазон \sqrt{T} от 1 до 1.5 $\text{с}^{0.5}$). Данная часть кривой отражает горизонт анавгайских песчаников с ρ от 20 до 50 Ом·м, который переходит в меловой фундамент. В низкочастотной области наблюдается минимум (диапазон \sqrt{T} от 8 до 10 $\text{с}^{0.5}$). Этот участок кривой характеризует зону пониженных сопротивлений – коровый проводящий слой. Далее кривая возрастает, а на фазовой кривой выделяется максимум (диапазон \sqrt{T} от 30 до 40 $\text{с}^{0.5}$) с ρ от 100 до 500 Ом·м, характеризующий кристаллический фундамент. На поперечных же кривых выделяется лишь один максимум (диапазон \sqrt{T} от 5 до 15 $\text{с}^{0.5}$). Он отражает меловой фундамент.

На пункте наблюдения №8, форма кривых отличается от остальных. Кривые начинаются с минимума, но продолжают восходящими ветвями, как и на других пунктах наблюдений. Данный пункт наблюдения расположен непосредственно

на территории Верхне-Паужетского термального поля. Аномалия кривых, вероятно, обусловлена выходом парогидротерм.

Геоэлектрический разрез

Продольные кривые лучше отражают глубинные проводящие зоны, поперечные кривые, в свою очередь, лучше отражают приповерхностную часть разреза. Поэтому было проведено численное моделирование по поперечным и продольным кривым в программе Mascie [4].

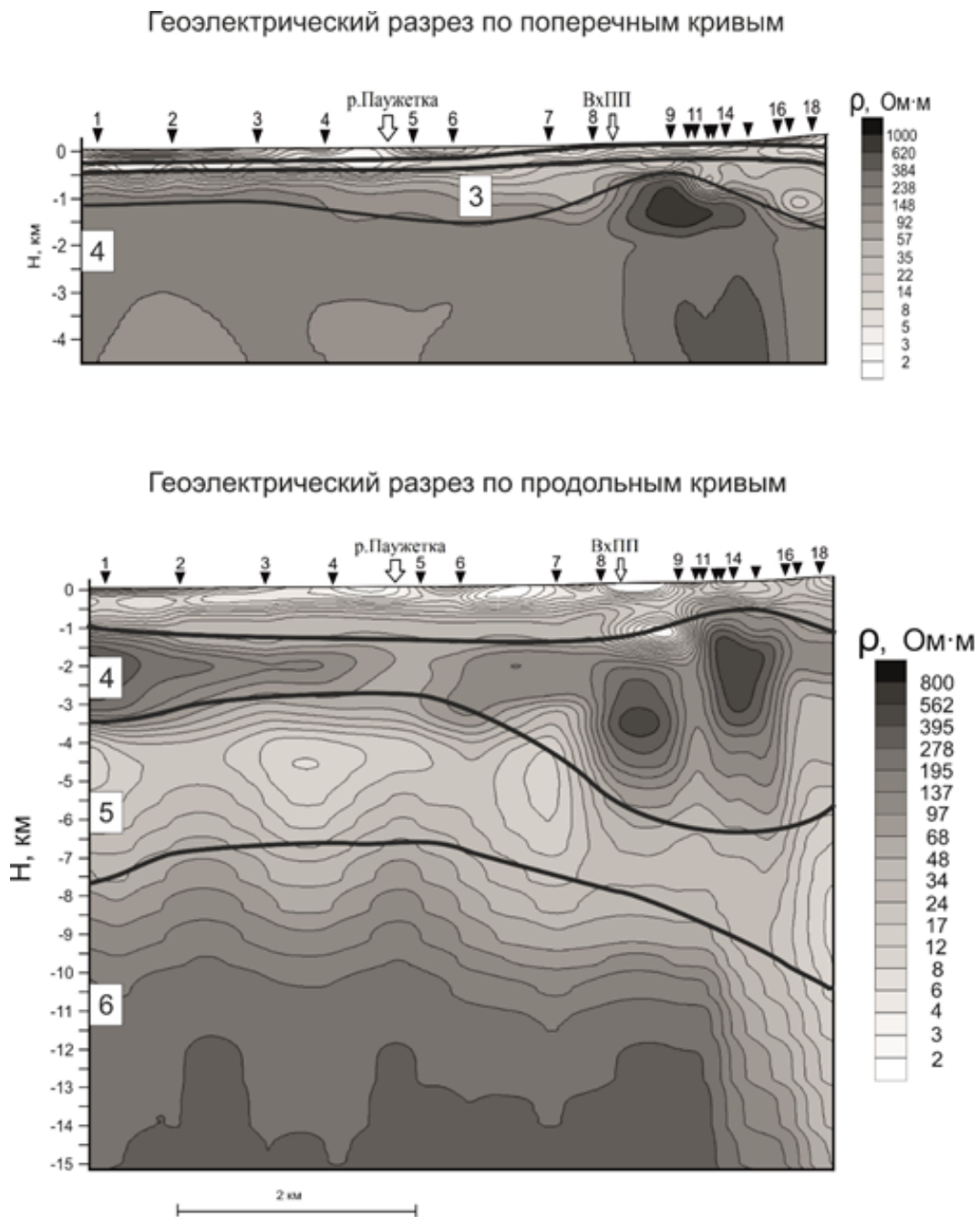


Рис. 5. Геоэлектрический разрез Паужетской гидротермальной системы

В результате был получен геоэлектрический разрез до 15 км (рис. 5), в котором было выделено 6 горизонтов:

- 1) аллювиально-деллювиальные отложения;
- 2) туфы и туфогенно-осадочные породы паужетской свиты, туфы алнейской серии;
- 3) вулканомиктовые песчаники-гравелиты анавгайской серии;
- 4) меловой фундамент, состоящий из метаморфизованных песчаников и вулканогенных пород;
- 5) предположительно разуплотненные породы мелового и более древнего возраста,
- 6) породы кристаллического фундамента.

Участки повышенного электрического сопротивления в 4 слое в западной части разреза, вероятно, представлены магматическим комплексом горы Ключевской. В восточной части разреза, возможно, представлены интрузивными телами.

Наибольший же интерес представляет коровый проводящий слой. Ранее было высказано предположение о его существовании на глубине 10 км [1]. Данный слой выделяется во многих районах Камчатки. Для геотермальных районов глубина залегания не более 10-15 км, в нашем случае 3.5-7.5 км. В других районах Камчатки глубина залегания варьируется от 15 до 30 км [2]. В восточной части разреза коровый проводящий слой погружается под структуру Камбального вулканического хребта.

Заключение

В результате проведенной работы был получен геоэлектрический разрез Паужетской гидротермальной системы. Глубина разреза до 15 км. Выделено 6 основных горизонтов. Верхняя часть разреза хорошо согласуется с результатами бурения и других геофизических исследований. Наиболее важным результатом является выделение корового проводящего слоя с пониженным электрическим сопротивлением и мощностью 4 км. Предположительно, этот горизонт играет ключевую роль в тепловом питании Паужетской гидротермальной системы.

Полученные данные послужат основой для дальнейшего развития уже имеющихся представлений о строении гидротермальной системы.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

- [1] Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И., *Модели и методы магнитотеллурики*, Научный мир, М., 2009, 677 с. [Berdichevskiy M. N., Dmitriyev V. I., *Modeli i metody magnitotelluriki*, Nauchnyy mir, M., 2009, 677 pp.]

- [2] Мороз Ю. Ф., *Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки*, Наука, М., 1991, 182 с. [Moroz YU. F., *Elektroprovodnost' zemnoy kory i verkhney mantii Kamchatki*, Nauka, M., 1991, 182 pp.]
- [3] Рычагов С. Н., Жатнуев Н. С., Коробов А. Д. и др., *Структура гидротермальной системы*, Наука, М., 1993, 298 с. [Rychagov S. N., Zhatnuyev N. S., Korobov A. D. i dr., *Struktura gidrotermal'noy sistemy*, Nauka, M., 1993, 298 pp.]
- [4] Rodi W., Mackie R. L., "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion", *Geophysics*, **66** (2001), 174-187.
- [5] <http://www.geotherm.rushydro.ru/geopp/general/>.
- [6] <https://www.interfax-russia.ru/far-east/main/velichenie-moshchnosti-pauzhetskoy-geoes-trebuets-bureniya-novyh-skvazhin-kamchatskiy-gubernator>.
- [7] <http://nw-geo.ru/geophysics/tech/amt/>.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 677 с.
- [2] Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 182 с.
- [3] Рычагов С. Н., Жатнуев Н. С., Коробов А. Д. и др. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
- [4] Rodi W., Mackie R. L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. 2001. vol. 66. P. 174-187.
- [5] <http://www.geotherm.rushydro.ru/geopp/general/>
- [6] <https://www.interfax-russia.ru/far-east/main/velichenie-moshchnosti-pauzhetskoy-geoes-trebuets-bureniya-novyh-skvazhin-kamchatskiy-gubernator>
- [7] <http://nw-geo.ru/geophysics/tech/amt/>

WORKS OF YOUNG SCIENTISTS

MSC 86A04

Research Article

Goelectric section of the Pauzhetskaya hydrothermal system (southern Kamchatka) according to magnetotelluric sounding

M. A. Klementyev^{1,2}, V. A. Loginov²

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4, Russia

² Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006 Petropavlovsk-Kamchatsky, 6, Piipa Boulevard, Russia

E-mail: boltozavar@gmail.com

Geophysical studies have been carried out using the magnetotelluric sounding method in the territory of the Pauzhetskaya hydrothermal system in order to study its structure. Two-dimensional magnetotelluric inverse is performed. A conductive horizon with low electrical resistivity is highlighted.

Key words: magnetotelluric sounding, the Pauzhetskaya hydrothermal system, conductive horizon, electrical resistance.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-205-214

Original article submitted: 04.04.2020

Revision submitted: 04.06.2020

For citation. Klementyev M. A., Loginov V. A. Goelectric section of the Pauzhetskaya hydrothermal system (southern Kamchatka) according to magnetotelluric sounding. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **31**: 2, 205-214. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-205-214

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Klementyev M. A., Loginov V. A., 2020

Funding. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors