

УДК 550.837.211; 550.361

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

П.Ю. Пушкарев, В.К. Хмелевской, Д.А. Бойченко, Н.С. Голубцова,
К.А. Иванова, К.С. Слепых, М.Д. Хуторской

Аннотация. Статья посвящена магнитотеллурическим исследованиям геотермальных ресурсов, которые мы подразделяем на гидротермальные и петротермальные. Гидротермальные ресурсы характерны для тектонически активных зон и давно эксплуатируются, а магнитотеллурика широко применяется для их поисков и разведки. Нами построена типичная геоэлектрическая модель геотермальной зоны и с помощью синтетических данных оценены возможности методов интерпретации данных. Петротермальные ресурсы обусловлены теплосодержанием горных пород земной коры и по своему термическому потенциалу на два порядка превышают гидротермальные ресурсы. Однако для их извлечения требуется бурение глубоких и сверхглубоких скважин, особенно в стабильных областях континентов. Мы рассматриваем перспективы магнитотеллурики при региональном прогнозе петротермальных ресурсов, а также детальных изысканиях и мониторинге резервуаров глубокого тепла.

Ключевые слова. Гидротермальные ресурсы, петротермальные ресурсы, магнитотеллурика, интерпретация геофизических данных, электропроводность.

Abstract. The paper describes magnetotelluric investigations of geothermal resources, which we subdivide into hydrothermal and petrothermal. Hydrothermal resources are typical for active tectonic zones and are exploited for a long time, while magnetotellurics is widely used for their exploration. We constructed a typical resistivity model of a hydrothermal zone and, using synthetic data, evaluated the possibilities of data interpretation methods. Petrothermal resources are related with heat content of crustal rocks and their thermal potential is hundred times bigger than that of hydrothermal resources. However, for their extraction deep drilling is required, especially in stable tectonic continental regions. We consider the prospects of magnetotelluric for regional prognosis of petrothermal resources, as well as for detailed exploration and monitoring of deep heated reservoirs.

Key words. Hydrothermal resources, petrothermal resources, magnetotellurics, geophysical data interpretation, electric conductivity.

ВВЕДЕНИЕ. В методе магнитотеллурического (МТ) зондирования измеряется естественное переменное электромагнитное поле Земли, или МТ поле [Жданов, 1986]. В результате обработки и интерпретации МТ-данных получают геоэлектрические модели среды, отражающие изменения удельного электрического сопротивления в разрезе или в объеме. Сопротивление горных пород определяется как их минеральным составом, так и флюидным и термальным режимами недр. В частности, обводнение или плавление горных пород обычно вызывает понижение сопротивления [Ваньян, Шиловский, 1983]. Кроме того, гидротермальная активность может приводить к образованию плинных минералов, обладающих низким сопротивлением. Это говорит о хороших возможностях использования метода МТ-зондирования для изучения геотермальных ресурсов. В отличие от других электромагнитных методов он не требует искусственных источников, что особенно важно при глубинных исследованиях.

МТ-зондирования широко применяются при изучении геотермальных ресурсов в тектонически активных зонах, связанных с границами литосферных плит, где тепло Земли в форме гидротермальных ресурсов давно используется для теплоснабжения и выработки электроэнергии. Наиболее современным и довольно подробным обзором применения МТ-зондирования для изучения гидротермальных

ресурсов является работа [Munoz, 2014]. В последнее время также обсуждается возможность использования «тепла сухих горных пород» (петротермальных ресурсов) в тектонически стабильных областях.

В настоящей статье мы затронем оба этих направления. Вначале мы представим типичную геоэлектрическую модель геотермальной зоны и обсудим некоторые вопросы интерпретации МТ-данных. Затем мы рассмотрим перспективы применения МТ-зондирования при региональном прогнозе и эксплуатации петротермальных ресурсов.

Типичная геоэлектрическая модель геотермальной зоны и особенности методики интерпретации магнитотеллурических данных

При МТ-исследованиях для решения геотермальных и других задач часто приходится иметь дело с двумя проводящими объектами: приповерхностным и глубинным. Приповерхностный может быть связан с гидротермальными минеральными преобразованиями, а глубинный – с частичным плавлением. Используя синтетические МТ-данные, мы оценили эффективность методов инверсии в таких условиях, в частности, их способность разделить влияние двух проводящих объектов и восстановить их структуру.

3D-модель геотермальной зоны включает два вытянутых проводника, соотношение их длины и ширины составляет 3:1. В фоновом разрезе они вырже-

даются в два тонких проводящих слоя в диапазонах глубин 0,2–0,3 и 7–8 км. Вмещающие высокоомные горные породы (литосфера) подстилаются проводящей астеносферой (рис. 1). Синтетические МТ-данные были рассчитаны с помощью программы 3D-моделирования [Mackie et al., 1994].

Результаты МТ-исследований существенно зависят от используемых компонент МТ-данных и методов решения обратной задачи [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Основу МТ-данных составляет тензор импеданса $[Z]$, матрица размером 2×2 , определяемая в точках наблюдения в широком диапазоне частот по горизонтальному электрическому и магнитному полям. При использовании методов интерпретации, основанных на 1D- (горизонтально-однородной) модели среды, используется лишь одна компонента, чаще всего эффективный импеданс Z^{ef} . При 2D-интерпретации обычно используют две компоненты, связанные с продольными и поперечными токами по отношению к структурам (Z^{\parallel} и Z^{\perp}). При решении 3D обратной задачи (при 3D-инверсии) учитываются все четыре компонента тензора $[Z]$. Важную дополнительную информацию содержит матрица Визе-Паркинсона $[W]$, которая строится по вертикальному и горизонтальному магнитным полям и имеет одну информативную компоненту в 2D-среде и две – в 3D.

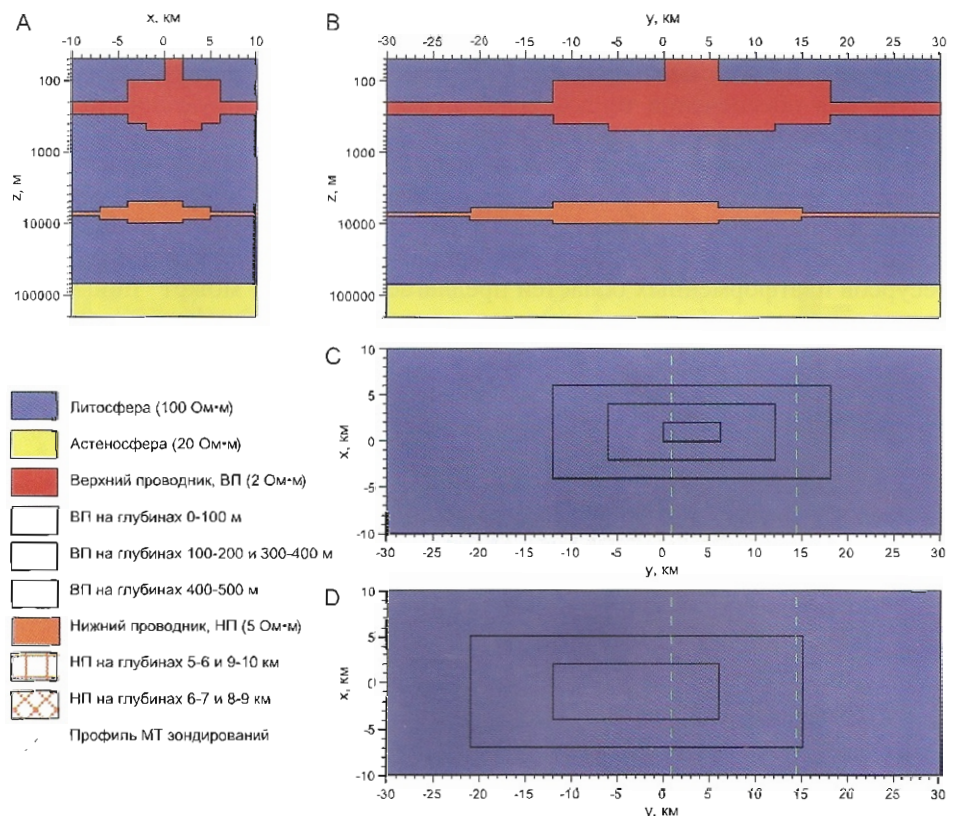
Рассмотрим результаты 1D- и 2D-инверсии синтетических данных по двум профилям: «центральному», пересекающему проводящие объекты вблизи центров, и «боковому», пересекающему их вблизи краев (рис. 2). 1D-инверсия эффективного импеданса по программе Occam [Constable et al., 1987] верно восстановила структуру приповерхностного проводника, но исказила структуру глубинного. 2D-инверсия поперечного и продольного импедансов

и типпера по программе REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000] дала достоверную информацию о глубинном проводнике и глубине до астеносферы.

Полученные результаты иллюстрируют, к каким погрешностям приводит применение 1D-инверсии при наличии в разрезе приповерхностной и глубинной горизонтально-неоднородных проводящих зон. Отметим, что в нашем случае соотношение длины и ширины этих зон оказалось благоприятным для 2D-инверсии. Очевидно, что в более сложных условиях и она может привести к существенным погрешностям, а правильный результат обеспечит лишь 3D-инверсия.

Перспективы применения магнитотеллурических зондирований при оценке и эксплуатации петротермальных ресурсов платформенных областей

Вследствие уменьшения запасов органического топлива и одновременного роста потребностей в энергоресурсах, а также для сохранения окружающей среды в энергетический оборот все активнее вовлекаются возобновляемые альтернативные энергетические источники. Для России с ее относительно малым количеством солнечных дней в году и большими перепадами температур в тропосфере наиболее приемлемым является использование глубинного тепла Земли. Утилизация гидротермальных ресурсов в нашей стране началась на Камчатке еще в 1967 году, но из-за ограниченности теплового потенциала подземных вод не смогла полностью обеспечить энергетических потребностей региона. На огромной территории России содержится колоссальный ресурс тепловой энергии, заключенный в разогретых глубинным тепловым потоком горных породах. При совершенствовании технологии глубокого бурения



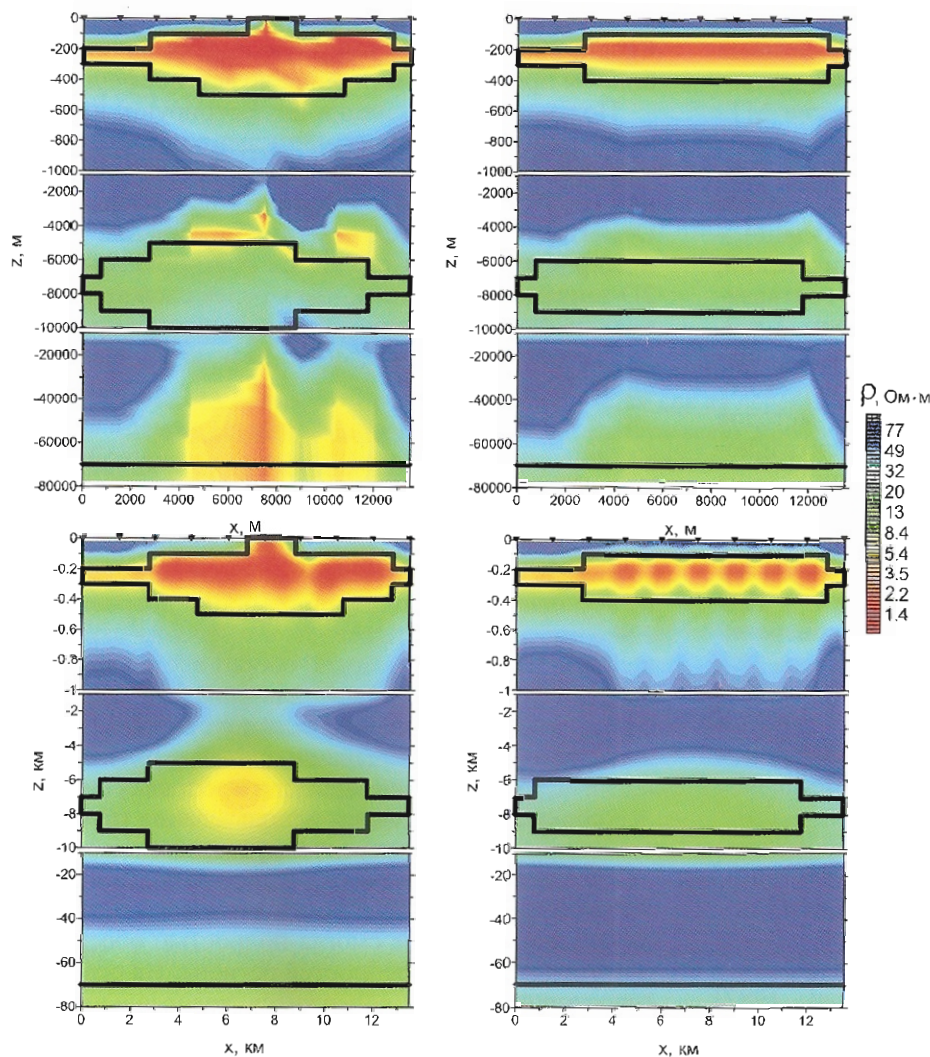


Рис. 2.
 Результаты инверсии
 (геоэлектрические разрезы):
 слева – по «центральному»,
 справа – по «боковому» профилю»,
 сверху – 1D-инверсия по программе
 Оссап, внизу – 2D-инверсия
 по программе REBOSS.
 Черные линии показывают
 истинное положение границ

и производства зон гидроразрыва горных пород извлечение этого (петротермального) тепла может стать вполне рентабельным. В этом случае мы получим практически неисчерпаемый энергетический ресурс для обеспечения теплом и электроэнергией «удаленные» малые города и поселки. В перспективе возможно использование тепла недр Земли в пределах древних платформ, где эксплуатационные температуры 200–250 °С содержатся на глубинах более 8 км [Гнатусь и др., 2011]. Для использования ресурсов платформенных областей предлагается использовать замкнутые петротермальные циркуляци-

онные системы (ПЦС). В такой системе поверхностная вода закачивается в нагнетательную скважину, нагревается в созданном с помощью гидроразрыва резервуаре (коллекторе) и откачивается через эксплуатационную скважину (рис. 3).

Важным критерием выбора мест размещения ПЦС является близость к потребителю электроэнергии и особенно горячей воды, если предполагается ее использование для теплоснабжения. Эффективность выбора районов строительства ПЦС может повысить использование геофизической информации, в том числе результатов глубинных

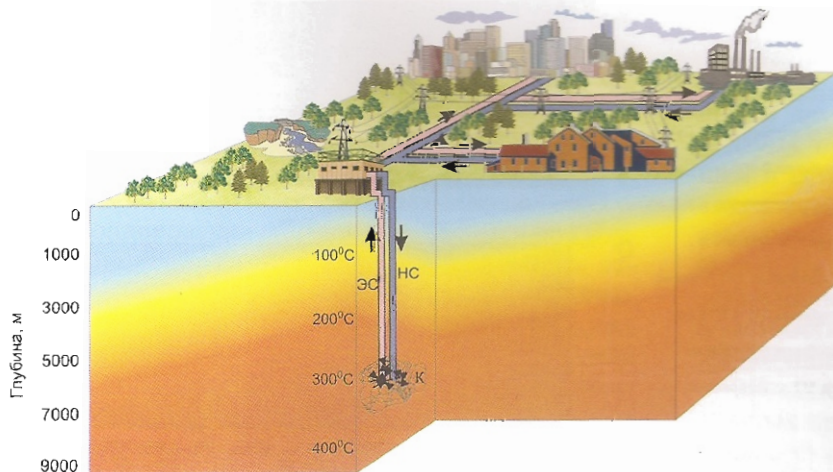


Рис. 3.
 Схема петротермальной
 циркуляционной системы.
 ЭС – эксплуатационная скважина,
 НС – нагнетательная скважина,
 К – коллектор

МТ-зондирований. Их применение возможно на трех этапах:

1) этап региональных исследований, на котором выявляются зоны вероятного повышения глубинных температур, где требуемая глубина бурения может оказаться меньше;

2) этап детальных изысканий в выбранном для строительства ПЦС районе для установления степени трещиноватости пород на эксплуатационном интервале глубин;

3) этап геофизического и экологического мониторинга в процессе эксплуатации ПЦС.

Интересующий нас диапазон глубин может находиться либо в самых низах разреза глубоких осадочных бассейнов, либо уже в кристаллическом фундаменте. В результате МТ-зондирований накоплено много информации о коровых проводящих аномалиях, созданы карты аномалий разных масштабов – от отдельных регионов до территории бывшего СССР (под ред. М.Н. Бердичевского) и даже всего мира [Жамалетдинов и Кулик, 2012]. На рис. 4 приведено изображение цифровой карты проводимости консолидированной земной коры Северной Евразии, составляемой нами на основе материалов, собранных в начале 1990-х годов в рамках Всесоюзного проекта под руководством М.Н. Бердичевского, а также более новых результатов.

Достаточно подробно исследована связь коровой проводимости с геотермическим режимом недр [Гордиенко и др., 2007]. И хотя природа многих аномалий остается дискуссионной, на наш взгляд, есть хорошие перспективы использования информации о коровой проводимости для прогноза петротермальных ресурсов. Так, некоторые аномалии могут быть вызваны современной тектоно-магматической активизацией, сопровождающейся внедрением расплавов и флюидов. Помимо этого различные коровые аномалии связаны с графитизированными тектоническими швами и обводненными разломами.

Как бы то ни было, они, по-видимому, являются глубинными, относительно хорошо проницаемыми зонами. Таким образом, многие коровые аномалии соответствуют областям повышенного глубинного теплопереноса, который обуславливает образование геотермальных месторождений. Поэтому информацию о коровой проводимости необходимо использовать в комплексе геолого-геофизических данных при прогнозе ресурсов глубинного тепла.

На этапе детальных изысканий на выбранном под строительство участке часто применяется лишь малоглубинная геофизика. Однако при проектировании ПЦС желательно знать строение и свойства недр до глубин порядка 10 км, которых могут достичь забой скважин и на которых будет создаваться коллектор тепла. Соответствующая геоэлектрическая модель позволит оценить глубины залегания отдельных горизонтов, выявить возможные тектонические нарушения и другие аномальные зоны. Серьезной проблемой, ограничивающей возможности МТ-зондирований, будет экранирование глубинных коровых аномалий из-за концентрации тока в проводящем осадочном чехле, подстилаемом высокоомным фундаментом. Еще одной проблемой может быть высокий уровень промышленных электромагнитных помех, поскольку ПЦС предполагается строить вблизи потребителей электроэнергии и горячей воды. Впрочем, в этом случае могут быть проведены электромагнитные зондирования в поле мощного искусственного источника.

Мониторинг петротермальной системы представляется наиболее сложной задачей. Картирование резервуара с поверхности затрудняется маленьким соотношением его мощности и глубины залегания, а также упомянутым выше эффектом экранирования: возбуждение изометричного объекта, как гальваническое (за счет перетекания тока из осадочного чехла), так и индукционное (за счет ЭМ-индукции в резервуаре), невелико. Нами было выполнено

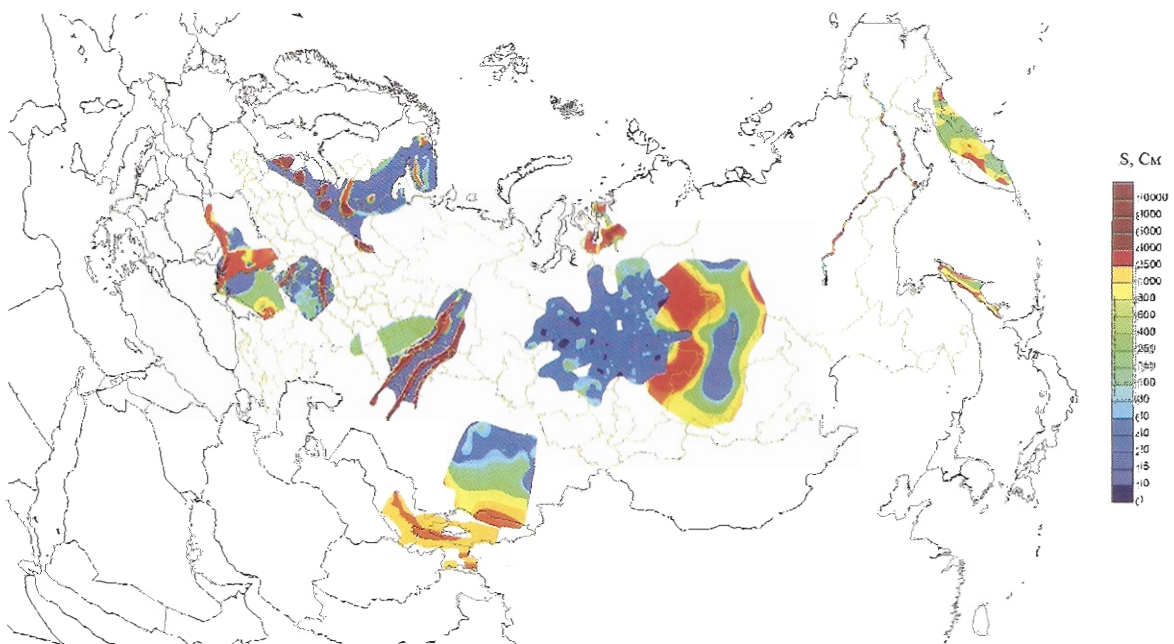


Рис. 4.
Карта проводимости консолидированной земной коры Северной Евразии

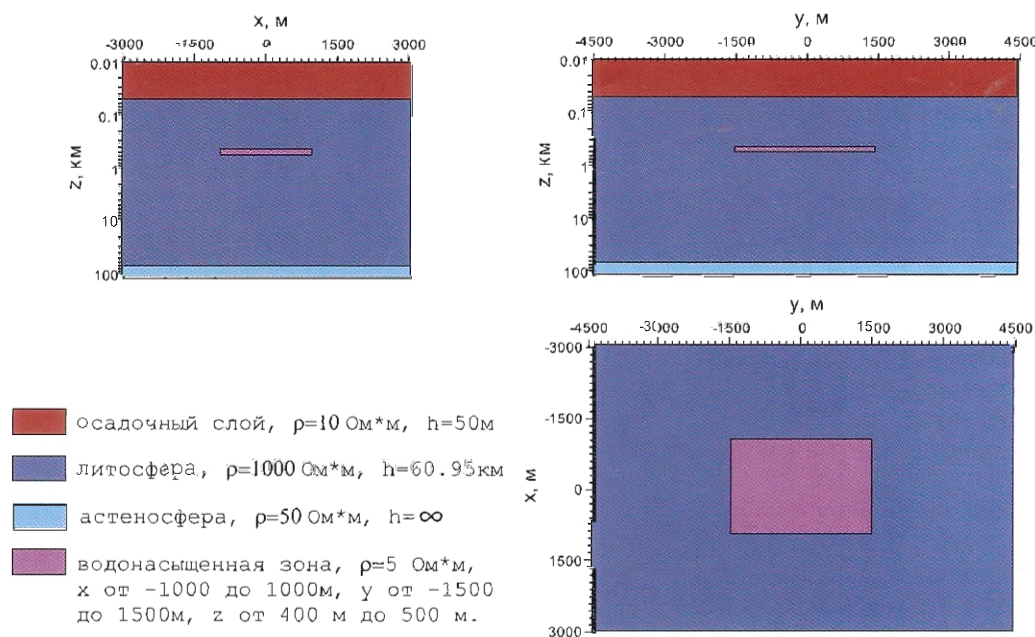


Рис. 5. Пример геоэлектрической модели резервуара. Срезы в плоскостях $y = 0, x = 0, z = 450$ м

моделирование МТ-поля над резервуарами с сопротивлением 5 Ом·м, помещенными в высокоомный фундамент, перекрытый тонким осадочным чехлом, и расположенными на разных глубинах (пример модели приведен на рис. 5). Мощность резервуаров составляла 100 м, а размеры в плане – 200х300 м² и 2000х3000 м². Оказалось, что аномалия кажущегося сопротивления не превышает 5% уже при достижении глубин залегания 200–300 м для первого и 1000–1500 м для второго резервуаров.

Более информативными могут быть скважинные или скважинно-наземные измерения полей искусственных источников. Впрочем, это потребует решения ряда технических вопросов, поскольку речь идет об очень больших глубинах, температурах и давлениях. Помимо картирования резервуара как проводящего объекта существует подход, основанный на анализе сигналов, вызываемых растрескиванием горных пород при гидроразрыве, однако этот подход требует специального обоснования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Мы рассмотрели две проблемы, связанные с применением магнитотеллурики для исследования геотермальных ресурсов.

Первая из них касается особенностей интерпретации МТ-данных, полученных в геотермальных зонах тектонически активных областей. Магнитотеллурика широко применяется при их изучении, успешно решая многие задачи. Однако остается не вполне ясным ответ на вопрос: возможно ли использовать 1D-методы инверсии или необходим переход к многомерным обратным задачам?

Строение многих геотермальных зон весьма схоже, в геоэлектрическом отношении основными элементами строения являются приповерхност-

ная и глубинная неоднородные проводящие зоны. Рассмотренный опыт инверсии синтетических МТ-данных, рассчитанных для типичной геоэлектрической модели геотермальной зоны, показал, что 1D-инверсия не дает достоверной информации о глубинной проводящей зоне. В нашем случае задачу удалось успешно решить с помощью 2D-инверсии, но в более сложных ситуациях может оказаться необходимым решать 3D-обратную задачу.

Второй проблемой, затронутой в статье, является оценка перспектив магнитотеллурики при оценке и эксплуатации петротермальных ресурсов платформенных областей. На наш взгляд, на этапе регионального прогноза следует обратить внимание на выявляемые МТ-исследованиями проводящие аномалии в консолидированной земной коре. Многие из них, по-видимому, связаны с глубинными ослабленными проницаемыми зонами, обеспечивающими повышенный теплоперенос. Некоторые аномалии могут свидетельствовать о современной тектонической активизации, еще не проявившейся в поверхностной аномалии теплового потока.

Создание петротермальных циркуляционных систем на большой глубине требует больших капитальных затрат. Применение геофизических методов при разведке места строительства и эксплуатации резервуара способно заметно снизить себестоимость ресурсов глубинного тепла и сделать петротермальную энергетику конкурентоспособной по сравнению с традиционной.

Публикация основана на результатах работ, выполненных при поддержке CRDF (грант RUG1-7026-MO-11) и РФФИ (гранты 11-05-92501-АФГИР-Э_а, 11-05-00496-а и 11-05-00047-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983. 88 с.

3. Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д., Хмелевской В.К. Петротермальная геоэнергетика и геофизика // Вестник МГУ. Сер. 4: Геология. 2011, №3. С. 3–9.

4. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Логвинов И.М. Тепловое поле и объекты высокой электропроводности в коре и верхней мантии Украины // Физика Земли. 2007. №4. С. 28–34.

5. Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофизический журнал. 2012. №4. С. 22–39.

6. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.

7. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 1987. Vol. 52. No. 3. p. 289–300.

8. Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. Radio Science, 1994. Vol. 29, p. 923–935.

9. Munos G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. Surveys in Geophysics, 2014. Vol. 35, p. 101–122.

10. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics, 2000. Vol. 65. No. 3, p. 791–803.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор технических наук И.А. Безрук.

ОБ АВТОРАХ



ПУШКАРЕВ
Павел Юрьевич

Доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, кандидат физико-математических наук. Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г. Область научных интересов – электромагнитные зондирования земли с использованием магнитотеллурического поля и полей управляемых источников.



ХМЕЛЕВСКОЙ
Виктор Казимирович

Профессор, зав. отделением геофизики геологического факультета МГУ, доктор геолого-минералогических наук. Окончил геологический факультет МГУ в 1952 г. Область научных интересов – электромагнитные методы изучения земной коры, малоглубинная геофизика.



ХУТОРСКОЙ
Михаил Давыдович

Профессор, заведующий лабораторией теплопереноса Геологического института РАН, доктор геолого-минералогических наук. Заслуженный деятель науки РФ. Окончил геологический факультет МГУ в 1970 г. Область научных интересов – изучение природы, источников и регионального распределения теплового потока из недр Земли.



ГОЛУБЦОВА
Нина Сергеевна

Научный сотрудник кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, кандидат геолого-минералогических наук. Окончила геологический факультет МГУ в 1971 г. Область научных интересов – моделирование и интерпретация данных магнитотеллурических зондирований.



СЛЕПЫХ
Ксения Сергеевна

Аспирант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ.



БОЙЧЕНКО
Дарья Александровна

Магистрант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ.



ИВАНОВА
Катерина Александровна

Магистрант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ.