

## **ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕРМОЭНЕРГЕТИКЕ**

Истощение разведанных запасов углеводородов требует скорейшего введения в энергетический баланс альтернативных ресурсов, среди которых для нашей страны наиболее приемлемыми могут быть геотермальные.

В настоящее время капиталовложения в поиски и оценку геотермальных энергетических ресурсов достаточно велики. Значительно сократить затраты уже на этапе прогноза и поиска как гидротермальных ресурсов, связанных с термальными подземными водами, так и петротермальных, связанных с перегретыми сухими горными породами, возможно благодаря применению новых наукоемких технологий, в том числе геофизических.

Авторами рассматриваются вопросы применения магнитотеллурического метода для изучения геотермальных зон и выявления в земной коре “термических куполов”, т.е. областей, в которых на относительно небольших глубинах образовались естественные температурные аномалии.

### **Введение**

Методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) измеряется естественное переменное электромагнитное поле Земли (магнитотеллурическое поле Земли) [1]. По результатам обработки и интерпретации магнитотеллурических данных строятся геоэлектрические модели среды, отражающие изменения удельного электрического сопротивления в разрезе или в объеме.

Сопротивление горных пород определяется не только их минеральным составом, но и флюидным и термальным режимами недр. В частности, обводнение или плавление горных пород обычно вызывает понижение сопротивления [2]. Кроме того, гидротермальная активность может приводить к образованию глинистых минералов, обладающих низким сопротивлением.

Перечисленное определяет возможность эффективного использования метода МТЗ для изучения геотермальных ресурсов. К тому же, в отличие от других электромагнитных методов, метод МТЗ не требует искусственных источников, что особенно важно при глубинных исследованиях.

Метод МТЗ широко применяется при изучении геотермальных ресурсов в тектонически активных зонах, связанных с границами литосферных плит. В таких регионах тепло Земли давно используется для теплоснабжения и выработки электроэнергии. Наиболее современный и довольно подробный обзор применения метода МТЗ для изучения гидротермальных ресурсов представлен в [3].

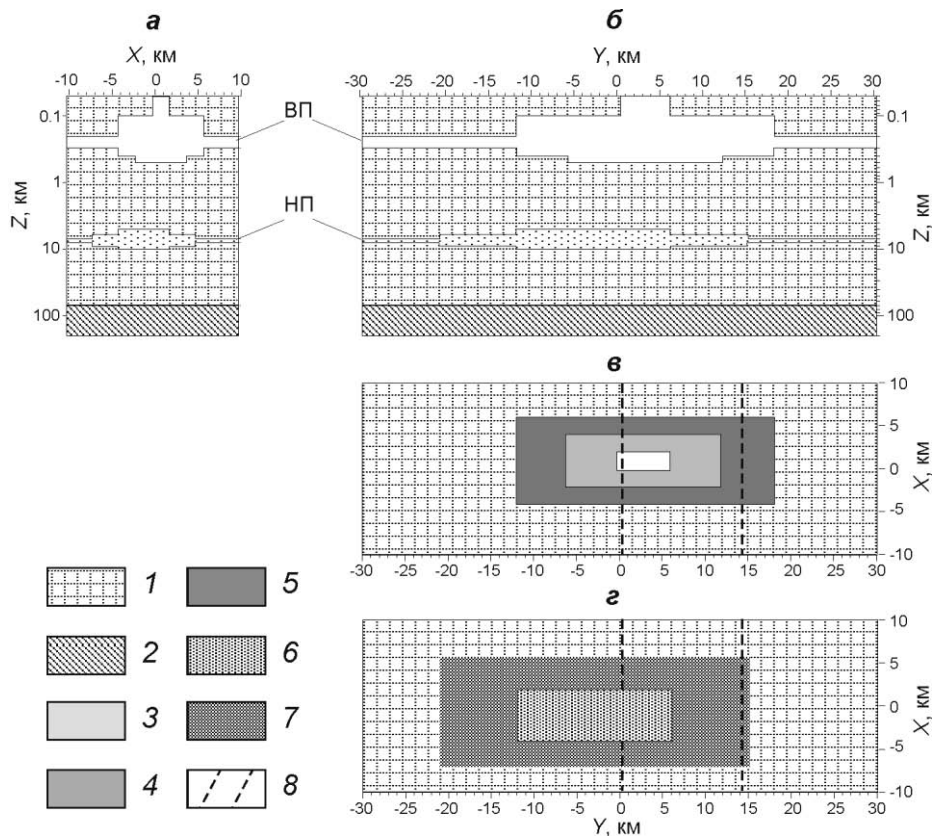
В последнее время довольно широко обсуждается возможность использования “тепла сухих горных пород” (петротермальных ресурсов) в тектонически стабильных областях

В настоящей статье затрагиваются оба названных направления. Сначала будет представлена типичная геоэлектрическая модель геотермальной зоны и рассмотрены некоторые вопросы интерпретации магнитотеллурических данных. Затем мы обратимся к перспективам применения магнитотеллурических зондирований при региональном прогнозе и эксплуатации петротермальных ресурсов.

## Типичная геоэлектрическая модель геотермальной зоны и особенности методики интерпретации магнитотеллурических данных

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

Типичная трехмерная геоэлектрическая модель геотермальной зоны (рис. 1) включает два вытянутых проводника с соотношением длины и ширины 3:1. В фоновом разрезе эти проводники вырождаются в два тонких проводящих слоя на глубинах 0.2–0.3 км (ВП,  $\rho=2$  Ом·м) и 7–8 км (НП,  $\rho=5$  Ом·м). Вмещающие высокоомные горные породы литосферы ( $\rho=100$  Ом·м) подстилаются проводящей астеносферой ( $\rho=20$  Ом·м). Синтетические магнитотеллурические данные рассчитывались с помощью программы 3D-моделирования [4].



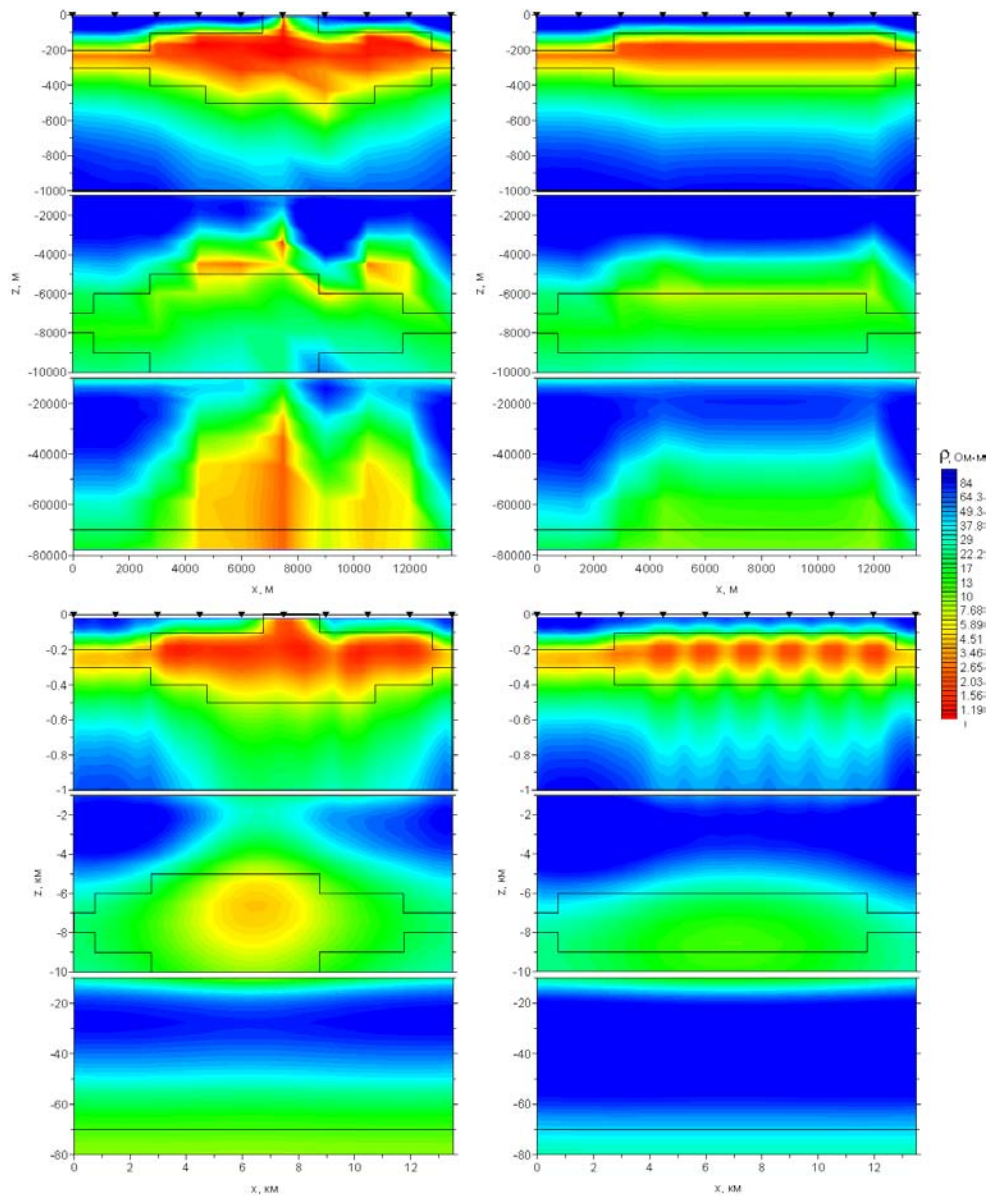
**Рис. 1.** Типичная геоэлектрическая модель геотермальной зоны. Разрезы в плоскостях  $Y=0$  (а) и  $X=0$  (б) и карты верхнего (в) и нижнего (г) проводников на разных глубинах

1 – литосфера; 2 – астеносфера; 3–5 – карты верхнего проводника на глубинах 0–0.1 км (3), 0.1–0.2 и 0.3–0.4 км (4), 0.4–0.5 км (5); 6, 7 – карты нижнего проводника на глубинах 5–6 и 9–10 км (6), 6–7 и 8–9 км (7); 8 – профили МТЗ

Результаты исследований существенно зависят от используемых компонент магнитотеллурических данных и от метода решения обратной задачи [5]. Основу используемых данных составляет тензор импеданса  $[Z]$ , матрица размером  $2 \times 2$ , определяемая в точках наблюдения в широком диапазоне частот по горизонтальному

электрическому и магнитному полю. При использовании методов интерпретации, основанных на одномерной горизонтально-однородной модели среды, используется лишь одна компонента, чаще всего эффективный импеданс  $Z^{ef}$ . При двумерной интерпретации обычно используют две компоненты, связанные с продольными и поперечными по отношению к структурам токами ( $Z^{\parallel}$  и  $Z^{\perp}$ ). При решении трехмерной обратной задачи (при 3D-инверсии) учитываются все четыре компоненты тензора  $[Z]$ . Важную дополнительную информацию содержит матрица Визе–Паркинсона  $[W]$ , которая строится по вертикальному и горизонтальному магнитному полю и имеет одну информативную компоненту в 2D-среде и две – в 3D.

Рассмотрим результаты 1D- и 2D-инверсии синтетических данных по двум профилям, отмеченным на рис. 1 – “центральному”, пересекающему проводящие объекты вблизи центров проводников, и “боковому”, пересекающему их вблизи краев (рис. 2).



**Рис. 2.** Результаты инверсии (геоэлектрические разрезы) по “центральному” (слева) и “боковому” (справа) профилям. Вверху – 1D инверсия по программе *Ossat*; внизу – 2D инверсия по программе *REBOCC*. Черные линии – истинное положение границ

1D-инверсия эффективного импеданса по программе *Occam* [6] верно восстановила структуру приповерхностного проводника (ВП на рис. 1), но исказила структуру глубинного (НП на рис. 1). 2D-инверсия поперечного и продольного импедансов и типпера по программе *REBOCC* [7] дала достоверную информацию о глубинном проводнике и глубине до астеносферы.

Представленные результаты иллюстрируют погрешности, к которым 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. Но вполне вероятно, что в более сложных условиях и 2D-инверсия может привести к существенным погрешностям, а правильный результат сможет обеспечить лишь 3D-инверсия.

### **Перспективы применения метода МТЗ для оценки и эксплуатации петротермальных ресурсов платформенных областей**

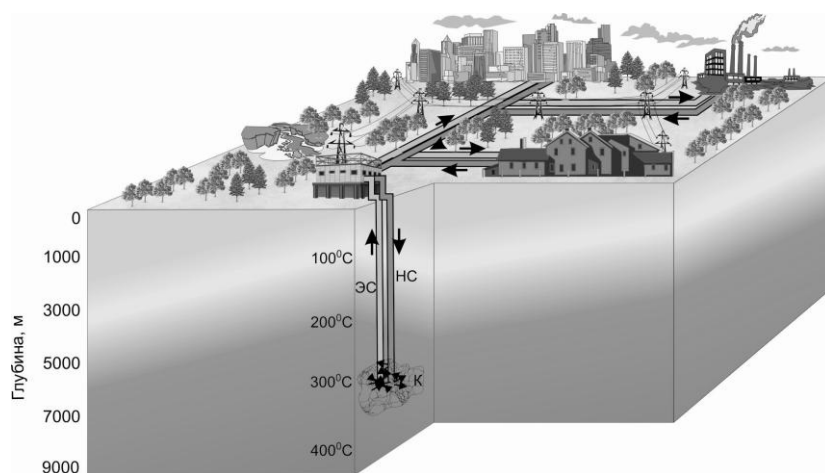
Вследствие уменьшения запасов органического топлива и одновременного роста потребностей в энергоресурсах, а также для сохранения окружающей среды в энергетический оборот все активнее вовлекаются возобновляемые альтернативные энергетические источники. Для России с ее относительно малым количеством солнечных дней в году и большими перепадами температур в тропосфере наиболее приемлемо использование глубинного тепла Земли. Утилизация гидротермальных ресурсов в нашей стране началась на Камчатке еще в 1967 г., но из-за ограниченности теплового потенциала подземных вод не смогла полностью обеспечить энергетические потребности региона.

На огромной территории России содержится колоссальный ресурс тепловой энергии, заключенной в разогретых глубинным тепловым потоком горных породах. При совершенствовании технологии глубокого бурения и производства зон гидро-разрыва горных пород извлечение петротермального тепла может стать вполне рентабельным. В этом случае будет получен практически неисчерпаемый энергетический ресурс для обеспечения теплом и электроэнергией удаленных малых городов и поселков.

В перспективе представляется возможным использование тепла недр Земли в пределах древних платформ, где эксплуатационные температуры 200–250 °С содержатся на глубинах более 8 км [8]. Для использования такого рода ресурсов предлагается использование замкнутых петротермальных циркуляционных систем (ПЦС), в которых поверхностная вода закачивается в нагнетательную скважину, нагревается в созданном с помощью гидроразрыва резервуаре (коллекторе) и откачивается через эксплуатационную скважину (рис. 3). Важный критерий при выборе мест размещения ПЦС – близость к потребителю электроэнергии и, особенно, к потребителю горячей воды, если предполагается ее использование для теплоснабжения.

Эффективность выбора районов строительства ПЦС может быть повышена при использовании геофизической информации, в том числе результатов глубинных исследований методом МТЗ, применение которых возможно на трех этапах: на этапе региональных исследований для выявления зон вероятного повышения глубинных температур с минимальными глубинами требуемого бурения; на этапе детальных изысканий в выбранном для строительства ПЦС районе для установления степени трещиноватости пород на эксплуатационном интервале глубин; на этапе геофизического и экологического мониторинга в процессе эксплуатации ПЦС.

Далее мы последовательно рассмотрим три названных этапа исследований.



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

Интересующий нас диапазон глубин может находиться либо в самых низах разреза глубоких осадочных бассейнов, либо уже в кристаллическом фундаменте. В связи с этим особое значение приобретает любая геофизическая информация, достоверно отражающая структуру аномалий внутри бассейнов и в кристаллическом фундаменте, в том числе и полученная магнитотеллурическими методами. В результате многолетних исследований методом МТЗ накоплен большой объем информации о коровых проводящих аномалиях, созданы карты аномалий разных масштабов – от отдельных регионов до территории бывшего СССР и даже всего мира [9]. Нами на основе материалов, собранных в начале 90-х годов прошлого столетия под руководством М.Н. Бердичевского в рамках всесоюзного проекта, и с привлечением более поздних результатов МТЗ была составлена цифровая карта проводимости консолидированной земной коры Северной Евразии.

Надо отметить, что связь коровой проводимости с геотермическим режимом недр исследована достаточно подробно [10]. 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 тепло-массопереноса, обуславливающего образование геотермальных месторождений. Поэтому информацию о коровой проводимости необходимо использовать в комплексе геолого-геофизических данных при прогнозе ресурсов глубинного тепла.

На выбранном под строительство участке на этапе детальных изысканий часто применяется лишь малоглубинная геофизика. Однако при проектировании ПЭС желательно знать строение и свойства недр до глубин порядка 10 км, поскольку именно этих отметок могут достичь забои скважин и на них будет создаваться коллектор тепла. Соответствующая геоэлектрическая модель позволит оценить глубины залегания отдельных горизонтов, выявить возможные тектонические нарушения и другие аномальные зоны.

Одной из серьезных проблем, ограничивающих возможности МТЗ, может стать экранирование глубинных коровых аномалий из-за концентрации тока в

проводящем осадочном чехле, подстилаемом высокоомным фундаментом, а другой – высокий уровень промышленных электромагнитных помех, поскольку ПЭС 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 малым соотношением его мощности и глубины залегания, а также упомянутым выше эффектом экранирования – и гальваническое (за счет перетекания тока из осадочного чехла), и индукционное (за счет ЭМ индукции в резервуаре) возбуждение изометричного объекта невелико.

Нами было выполнено моделирование магнитотеллурического поля над двумя вставками, имитирующими аномальную проводящую зону с  $\rho=5$  Ом·м. Мощность вставок составляла 100 м, размеры в плане –  $300 \times 200$  м и  $3000 \times 2000$  м. Вставки помещались на разную глубину в высокоомный фундамент ( $\rho=1000$  Ом·м,  $h=60-95$  м), перекрытый тонким осадочным чехлом ( $\rho=10$  Ом·м,  $h=50$  м) и подстилаемый породами астеносферы ( $\rho=50$  Ом·м,  $h=\infty$ ). Оказалось, что аномалия кажущегося сопротивления не превышает 5% уже при достижении глубин залегания 200–300 м для первого резервуара и 1000–1500 м – для второго резервуара.

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, который требует специального обоснования.

### **Заключение**

Авторами были рассмотрены две проблемы, связанные с применением магнитотеллурических методов для исследования геотермальных ресурсов.

Первая касается особенностей интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в геотермальных зонах тектонически активных областей, в которых рассматриваемые методы широко применяются и с их помощью успешно решаются многие задачи. Однако не вполне ясным остается ответ на вопрос – возможно ли (и достаточно ли) в этих областях использование 1D-инверсии или же необходим переход к решению многомерных обратных задач.

В геоэлектрическом отношении многие геотермальные зоны имеют весьма схожее строение, основными элементами которого являются приповерхностная и глубинная неоднородные проводящие зоны. Опыт инверсии синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для типичной геоэлектрической модели геотермальной зоны, представленный в данной статье, показал, что 1D-инверсия не дает достоверной информации о глубинной проводящей зоне. В рассмотренном случае задачу удалось успешно решить с помощью 2D-инверсии, но в более сложных ситуациях может оказаться необходимо решение обратную задачу 3D.

Вторая проблема, затронутая в статье, – оценка перспектив магнитотеллурических исследований при оценке и эксплуатации петротермальных ресурсов платформенных областей. На наш взгляд, на этапе регионального прогноза следует обратить внимание на выявляемые магнитотеллурическими исследованиями проводящие аномалии в консолидированной земной коре, многие из которых, по видимому, связаны с глубинными ослабленными проницаемыми зонами, обеспечивающими повышенный теплоперенос. Некоторые аномалии могут свидетель-

ствовать 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 существенно 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. *Жданов М.С.* Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
2. *Ваньян Л.Л., Шиловский П.П.* Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983. 88 с.
3. *Minos G.* Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // *Surveys in Geophysics*. 2014. V. 35. P.101–122.
4. *Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // *Radio Science*. 1994. V. 29. P.923–935.
5. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
6. *Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.* Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophys.* 1987. V. 52, N 3. P.289–300.
7. *Siripunvaraporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // *Geophysics*. 2000. V. 65, N 3. P.791–803.
8. *Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д., Хмелевской В.К.* Петротермальная геоэнергетика и геофизика // *Вестник МГУ. Сер. 4 (Геология)*. 2011. № 3. С.3–9.
9. *Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н.* Крупнейшие аномалии электропроводности мира // *Геофизический журнал*. 2012. № 4. С.22–39.
10. *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.