

УДК 550.837.211

**П.Ю. Пушкарёв** (к.ф.-м.н., доцент), [pavel\\_pushkarev@list.ru](mailto:pavel_pushkarev@list.ru)**В.К. Хмелевской** (д.г.-м.н., профессор)**К.А. Иванова**

МГУ им. М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геофизики

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, геотермальные ресурсы, земная кора.**Аннотация**

*Рассмотрены теоретические основы и современное состояние метода магнитотеллурического (МТ) зондирования. С использованием синтетических МТ данных, рассчитанных для характерной геоэлектрической модели геотермальной зоны, опробован ряд методов анализа и инверсии МТ данных, выбрана оптимальная методика интерпретации. Применительно к глубинным геотермальным ресурсам платформенных областей, обсуждается перспективность использования информации об аномалиях пониженного сопротивления консолидированной земной коры, выявляемых по МТ данным.*

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 (УЭС) в разрезе или в объёме. УЭС горных пород определяется как их минеральным составом, так и флюидным и термальным режимами недр. В частности, обводнение или плавление горных пород обычно вызывает понижение УЭС [Ваньян и Шиловский, 1983]. Кроме того, гидротермальная активность может приводить к образованию глинистых минералов, обладающих низким УЭС. Поэтому метод МТ-зондирования широко применяется при изучении геотермальных ресурсов. В отличие от других электромагнитных методов, он не требует искусственных источников, что особенно важно при глубинных исследованиях.

Результаты МТ-исследований существенно зависят от используемых компонент МТ-данных и методов решения обратной задачи [Бердичевский и Дмитриев, 2009]. Основу МТ-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 1D (горизонтально-однородной) модели среды, используется лишь одна компонента, чаще всего эффективный импеданс  $Z^{ef}$ . При 2D интерпретации обычно используют две компоненты, связанные с токами, продольными и поперечными по отношению к структурам ( $Z^{\parallel}$  и  $Z^{\perp}$ ). При решении 3D обратной задачи (при 3D инверсии) задействуются 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 [Бердичевский и др., 2003].

Существует множество методов анализа МТ данных, позволяющих локализовать аномалии, оценить размерность среды, определить направления простирания структур. Также имеются реализующие разные подходы программы решения 1D, 2D и 3D обратных задач. Для того, чтобы выбрать оптимальную методику анализа и интерпретации МТ данных, можно оценить эффективность различных методов на синтетических данных, то есть рассчитанных для некоторой 3D геоэлектрической модели среды.

Для многих геотермальных зон характерно наличие двух аномалий пониженного УЭС, приповерхностной и глубинной. Верхняя может быть обусловлена проводящими минералами гидротермального происхождения, нижняя – частичным плавлением горных пород. Также вклад в формирование обеих аномалий могут вносить минерализованные термальные воды. Нами была составлена обобщённая 3D геоэлектрическая модель, содержащая приповерхностную и глубинную аномалии, и, с помощью программы MT3DFwd [Mackie et al., 1994], рассчитаны синтетические МТ данные для этой модели на площади, охватывающей аномалии.

Применив достаточно простые методы анализа МТ данных, реализованные в программе MT\_Array [Иванов, 2010], мы смогли без труда оконтурить основную аномальную зону и сделать предположение, что в большинстве точек площади применима 2D инверсия. Однако на этапе анализа карт и частотных разрезов МТ параметров сложно разделить влияние верхнего и нижнего проводящих объектов. Их разделение обеспечило применение достаточно простой 1D инверсии по программе Occam1D [Constable et al., 1987], но глубинная часть разреза при этом оказалась искажена приповерхностными эффектами. Вполне приемлемый результат обеспечила 2D инверсия по программе REBOCC [Siripunvaraporn and Egbert, 2000], достаточно уверенно восстановив положение

как приповерхностного, так и глубинного проводников. Успешный результат был получен и с помощью программы 3D инверсии МТ данных WSIInv3DMT [Siripunvaraporn et al., 2005], однако её применение требует очень больших вычислительных ресурсов.

В результате нам удалось выработать оптимальную методику анализа и интерпретации МТ данных, которая может быть применена при изучении геотермальных зон рассмотренного типа. Безусловно, в дальнейшем она может совершенствоваться с привлечением новых методов анализа и интерпретации.

В рассмотренных выше геотермальных зонах, приуроченных к тектонически активным регионам, геотермальные ресурсы давно извлекаются с относительно небольших глубин и используются для отопления и выработки электричества. В последнее время всё больше интереса с точки зрения извлечения глубинного тепла привлекают платформенные области [Гнатусь и др., 2011], однако здесь необходимо бурение скважин до глубин 5-10 км. С точки зрения применения геофизических методов, задача также усложняется, поскольку речь идёт о более глубоко залегающих и менее ярких аномалиях.

В последние годы в западной части Воронежской антеклизы, на территориях Калужской и Брянской областей, выполнены МТ зондирования, позволившие выявить аномалии пониженного УЭС в консолидированной земной коре, на глубинах порядка 10 км и глубже [Варенцов и др., 2011]. Ярко выделяется линейная зона, простирающаяся с юга на север, и продолжающая хорошо изученную на Украине Кировоградскую коровую аномалию, которую её исследователи связывают с современной тектонической активизацией [Гордиенко и др., 2005].

Известно и множество других коровых аномалий, природа которых связывается с графитизацией и сульфидизацией, с повышенной обводнённостью и частичным плавлением горных пород. Очевидно, что многие аномалии могут свидетельствовать о повышенных глубинных температурах и представлять интерес с точки зрения прогноза глубинных геотермальных ресурсов.

Работа выполнена в рамках Российско-Американского гранта РФФИ-CRDF, № проекта РФФИ 11-05-92501, № проекта CRDF RUG1-7026-MO-11.

### Литература

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 2009, 680 с.

2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мерщикова Н.А., Пушкарев П.Ю. Магнитовариационное зондирование: новые возможности. *Физика Земли*, 2003, № 9, с. 3-30.
3. Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. Москва, Наука, 1983, 88 с.
4. Варенцов И.М., Ковачикова С., Куликов В.А., Логвинов И.М., Пушкарев П.Ю., Соколова Е.Ю., Яковлев А.Г. Коровые аномалии электропроводности на западном склоне Воронежской антеклизы. *Материалы Международной конференции «Современное состояние наук о Земле», посвящённой памяти В.Е. Хаина*. Москва, 1-4 февраля 2011, с. 290-295.
5. Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д., Хмелевской В.К. Петротермальная геоэнергетика и геофизика. *Вестник МГУ, Серия 4 (Геология)*, 2011, № 3, с. 3-9.
6. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев, Корвін пресс, 2005, 210 с.
7. Жданов М.С. *Электроразведка*. Москва, Недра, 1986, 316 с.
8. Иванов П.В. Программное обеспечение MT\_Artaу для анализа магнитотеллурических данных. *Материалы XVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов»*. Москва, МГУ, 2010.
9. 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.
10. 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.
11. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 2000, Vol. 65, No. 3, p. 791-803.
12. Siripunvaraporn W., Egbert G., Lenbury Y., Uyeshima M. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 2005, Vol. 150, p. 3-14.