

УДК 550.3

**Особенности магнитотеллурического сканирования земной коры
при поисках и разведке месторождений углеводородов**

**Б. К. Сысоев¹, А. К. Ягафаров², Ш. А. Арсан^{2*}, Д. С. Худяков¹,
М. Е. Савина²**

¹ООО «МТелл», г. Тюмень, Россия

²Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: shadiarsan@geologist.com

Аннотация. Работа раскрывает информацию об особенностях магнитотеллурического сканирования земной коры при поисках и разведке месторождений углеводородов. Рассматриваются возможности применения магнитотеллурического зондирования в исследованиях земной коры.

Ключевые слова: метод электромагнитной разведки; метод магнитотеллурического зондирования; электромагнитное поле Земли

**Features of magnetotelluric scanning of the Earth's crust
while searching and exploring hydrocarbon deposits**

**Boris K. Sysoev¹, Alik K. Yagafarov², Shadi A. Arsan^{2*}, Denis S. Khudyakov¹,
Marina E. Savina²**

¹MTell LLC, Tyumen, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: shadiarsan@geologist.com

Abstract. The article describes features of magnetotelluric scanning of the Earth's crust while searching and exploring hydrocarbon deposits. The text gives valuable information on possibilities of magnetotelluric method in the study of the Earth's crust.

Key words: electromagnetic prospecting method; magnetotelluric sounding method; the Earth's electromagnetic field

Введение

Высокая геолого-экономическая эффективность оценивается точным попаданием скважин в малоразмерные геологические объекты, латеральные размеры которых составляют первые сотни метров. Новейшие концепции происходящих геологических процессов, приводящих к формированию малоразмерных залежей и вместе с тем «ураганных» по дебиту и по накопленной добыче углеводородов, позволяют конкретно определять наиболее перспективное направление развития геолого-геофизических работ. Одним из таких направле-

ний является применение детальной электроразведки методом магнитотеллурического сканирования (МТ-сканирования).

Объект и методы исследования

Метод МТ-сканирования представляет собой высокотехнологичный метод электромагнитной разведки, осуществляющий сканирование земной коры на различных глубинах, в основе которого используется энергия электромагнитного излучения, имеющая природное происхождение и связанная с энергетикой Земли.

Традиционно считалось, что теллурические токи возникают в Земле только в результате космофизических явлений. Но теоретические исследования электромагнитного излучения самой Земли внесли в теорию возникновения теллурических токов и магнитотеллурического сканирования новые данные в генетическую природу этих явлений. Было установлено, что под влиянием различных эндогенных воздействий в земной коре могут генерироваться локальные электромагнитные поля (вихри). Установлены также значительные по величине вариации всех компонент геомагнитного поля и обнаружены быстрые флуктуации электромагнитного поля, возникающие как под влиянием магнитных вспышек на Солнце, так и независимо от него. Некоторые исследователи считают, что последние связаны с глубинными источниками внутри Земли. Источниками магнитотеллурических вариаций могут служить электрические токи во внешней оболочке ядра и мантии Земли, которые совместно с субвертикальными каналами участвуют в создании глобальной сети теллурических токов [1–3]. Внутренняя дегазация Земли обязательно сопровождается электромагнитным излучением. Энергетические вихри в электромагнитных полях ярко выражены в отложениях фундамента в виде субвертикальных проводящих каналов.

Наблюдаемые деформации магнитотеллурического (электромагнитного) поля обусловлены неоднородностями геосреды. Наличие внутри геологических образований проводящих объектов даже в виде замкнутых трещин создают замкнутые электромагнитные вихри, обеспечивающие дополнительные потери энергии электромагнитного поля в трещиноватых породах [4–6].

Таким образом, изменения пористости трещиноватых пород в случае заполнения их различными флюидами сопровождаются существенными изменениями их электросопротивления. Из всех геофизических методов к выявлению зон трещиноватости и тектонических нарушений метод магнитотеллурического сканирования выделяется своей высокой эффективной чувствительностью [4, 7, 8].

В общепринятой теории электромагнитных зондирований источниками магнитотеллурических вариаций являются электрические токи в околоземном космическом пространстве. В связи с этим длина волны магнитотеллурических вариаций в атмосфере во много раз превышает диаметр Земли, падающая электромагнитная волна принимается плоской и однородной. Проникающее в земную кору электромагнитное поле вызывает в ней однородный вихревой ток с определенной плотностью, направление которого соответствует земной поверхности. При этом в зависимости от частоты и проводимости горных пород возможно определение глубины исследования [4, 9–11].

Это положение и предопределило применение магнитотеллурических исследований в качестве региональных геофизических методов, нацеленных на изучение крупнейших структур земной коры, осадочных бассейнов. Но в действительности МТ-методами сканируется множество малоразмерных объектов в отложениях осадочного чехла.

Переменные поля проникают в породу с конкретной проводимостью. В идеально проводящей среде электромагнитное поле отсутствует. Проводник характеризуется наличием тока проводимости, синфазного с напряженностью электрического поля. Установлено, что на границе между горными породами с различными литологическими параметрами среды скачкообразно изменяются.

Сейсморазведка — основной метод подготовки объектов под поисковое бурение, даже в трехмерном исполнении не позволяет однозначно выявлять залежи нефти. Она лишь с большей степенью достоверности и детальности картирует ловушки, которые при определенных условиях могут содержать залежи, а могут их и не содержать. На самом деле в Западной Сибири, как и всюду, искали нефть методом проб и ошибок, применяли аэромагнитную съемку и бурили, бурили, и бурили.

Доля затрат на обеспечение добывания сейсмической информации, включающее отвод земельных участков, рубку просек и строительство дорог, транспортировку грузов, природоохранные мероприятия, организацию связи и др., в общем балансе геолого-разведочных работ составляет 46 % [12–14].

Тенденция непрерывного сгущения сети сейсморазведочных профилей с целью детализации настолько уже очевидна, что вызывают беспокойство тотальная вырубка лесов и поражение зеленого покрова на исследуемых территориях.

Сейсморазведка испытывает серьезные трудности при выполнении работ в населенных районах, где оплаты потрав могут превысить стоимость съемки, работы в залесенных районах, заповедных зонах, районах с пересеченным рельефом, экологически чувствительных областях; реки, каналы, озера также представляют серьезную проблему при проведении работ [13, 15–17].

При проведении работ методом электромагнитного сканирования (электромагнитной разведки) указанные проблемы вполне разрешимы.

При полевых работах применяется малоразмерная четырехканальная установка

с радиусом площадки не более 10 м (рис. 1).

Установки размещаются по профилю через 100–500 м (при глубинных исследованиях шаг может достигать 1–2 км) и работают автономно или под контролем оператора через узел связи с автоматизированным местом оператора (АРМ) в реальном времени. При установке приборов расстояние между пикетами определяется с помощью GPS-навигатора. Координаты пунктов наблюдения

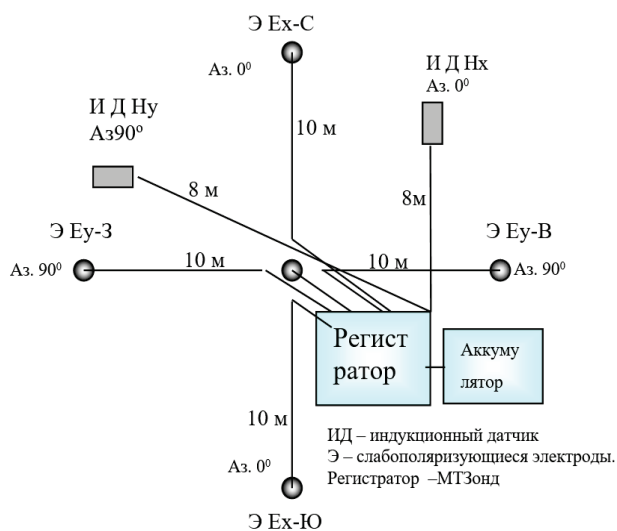


Рис. 1. Четырехканальная установка МТЗ

автоматически определяются во время записи встроенным в регистратор GPS-приемником.

Организация полевых работ электромагнитным методом не предусматривает развертывания больших базовых лагерей. Обслуживание регистраторов в количестве 10 шт. осуществляют не более 9 человек (3 ИТР + 6 рабочих) [4, 18, 19].

Применяемая технология электромагнитной разведки включает высокотехнологическую телеметрическую аппаратуру МТЗонд и программное обеспечение для всех стадий процесса получения данных, их обработки и интерпретации. Доля затрат на обеспечение получения геоэлектрической информации в 3–4 раза ниже, чем в сейсморазведке.

В России реализован выпуск четырехканального и двухканального регистраторов электромагнитного поля Земли (выпуск пятиканального регистратора производится по специальному заказу) (рис. 2). Эта аппаратура по сравнению с лучшими мировыми аналогами обеспечивает повышение точности измерений, расширение функциональных возможностей, снижение энергопотребления, увеличение надежности, снижение стоимости в 2–3 раза, повышение гибкости и удобства эксплуатации.

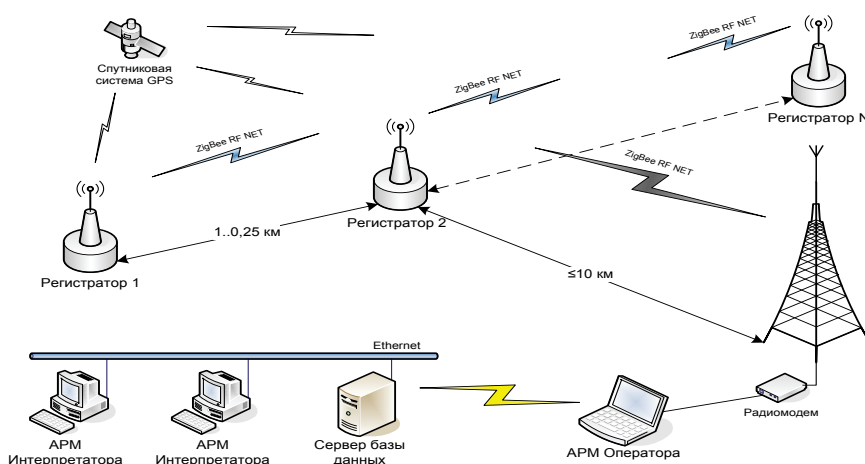


Рис. 2. Структура комплекса МТ-зондирования

Комплекс МТЗонд включает аппаратуру для измерения сигналов датчиков, преобразования и хранения их в цифровой форме, автоматизированное рабочее место оператора, управляющего регистратором.

Выводы

В данной работе приведены основные положения применения метода магнитотеллурического зондирования для изучения недр. Показана возможность применения метода при проведении региональных геологических исследований, а также выявления не только крупноразмерных структур, но и малоразмерных в отложениях осадочного чехла. Этот метод, по нашему мнению, будет эффективен при поисках и разведке месторождений нефти и газа в сложившихся реальных горно-геологических условиях.

Библиографический список

1. Сысоев Б. К., Шейнкман А. Л. Использование детальных магнитотеллурических зондирований для поиска малоразмерных залежей в фундаменте // Физика Земли. – 2007. – № 4. – С. 43–47.
2. Изучение внутренней структуры и коллекторских свойств кристаллического фундамента сейсморазведкой 3Д / А. Г. Авербух [и др.] // Геофизика. – 2007. – № 4 – С. 66–73.

3. Блинов В. Ф. Растущая Земля: из планет в звезды. – М.: Едиториал УРСС. – 2003. – 272 с.
4. Zhang K., Yan J. A 3D magnetotelluric inversion system with a theoretical assessment in oil and gas exploration // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2015. – Vol. 89, Issue s1. – P. 434–436. DOI: 10.1111/1755-6724.12307_11
5. The magnetotelluric method theory and practice / A. D. Chave, A. G. Jones (Eds.). – New York: Cambridge University Press, 2012. – 604 p.
6. Spichak V. V. Modeling of magnetotelluric fields in 3-D media // *Methods in Geochemistry and Geophysics*. – 2007. – Vol. 40. – P. 313–350.
7. Бембель Р. М., Мегеря В. М., Бембель С. Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов: моногр. – Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 344 с.
8. Berdichevsky M. N., Zhdanov M. S. Advanced theory of deep geomagnetic sounding. – Amsterdam: Elsevier, 1984. – 408 p.
9. Berdichevsky M. N., Dmitriev V. I. Models and methods of magnetotellurics. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 576 p.
10. Барашков А. С. Восстановление электромагнитных полей на поверхности Земли по тензору импеданса // *Физика Земли*. – 1986. – № 5. – С. 43–52.
11. Барашков А. С., Дмитриев В. И. Об обратной задаче глубинного магнитотеллурического зондирования // *Доклады Академии наук СССР*. – 1987. – Т. 295, № 1. – С. 83–86.
12. Тимурзиев А. И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазонакопления // *Геофизика*. – 2007. – № 4. – С. 49–60.
13. Гатаулин Р. М., Адиев Я. Р., Сейсмические образы “троп” вертикальной миграции флюидов как цилиндрические зоны коллапса // *Геофизика*. – 2003. – № 1 – С. 209–211.
14. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы / В. А. Кондратьев [и др.] // *Разведка и охрана недр*. – 2004. – № 8–9. – С. 26–28.
15. Joint interpretation of magnetotelluric, seismic, and well-log data in Hontomin (Spain) / X. Ogaya [et al.] // *Solid Earth*. – 2016. – № 7. – P. 943–958. DOI: 10.5194/se-7-943-2016
16. Мартыанов Н. Е. Размышления о пульсациях Земли. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 272 с.
17. Theoretical assessment of 3-D magnetotelluric method for oil and gas exploration: Synthetic examples / K. Zhang [et al.] // *Journal of Applied Geophysics*. – 2014. – Vol. 106. – P. 23–36. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.04.003
18. Дортман Н. В., Фивег С. М. Удельное электрическое сопротивление минералов и горных пород // *Петрофизика: справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые* / Под ред. Н. В. Дортман. – М.: Недра, 1992. – С. 183–204.
19. Кузнецов В. А. О нормализации кривых магнитотеллурического зондирования, искаженных S-эффектом // *Физика Земли*. – 2005. – № 7. – С. 91–96.

References

1. Sysoev, B. K., & Sheinkman, A. L. (2007). Application of detailed magnetotelluric sounding to prospecting for small-size deposits of hydrocarbons in the basement. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 43(4), pp. 304-308. (In English).
2. Averbukh, A. G., Arapova, A. I., Akhmetova, E. R., Garnov, A. V., Graf, S. Yu., Gritsenko, A. M.,... Oberemechenko, I. S. (2007). Detailed 3D Seismic Studies of Crystalline Basement Structure and Reservoir Properties. *Russian Geophysics*, (4), pp. 66-73. (In Russian).
3. Blinov, V. F. The growing Earth: from planets to stars. Moscow, Editorial URSS, 272 p. (In Russian).
4. Zhang, K., & Yan, J. (2015). A 3D magnetotelluric inversion system with a theoretical assessment in oil and gas exploration. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(s1), pp. 434-436. (In English). DOI: 10.1111/1755-6724.12307_11
5. Chave, A. D., & Jones, A. G. (Eds.). (2012). The magnetotelluric method theory and practice. New York, Cambridge University Press, 604 p. (In English).
6. Spichak, V. V. (2007). Modeling of magnetotelluric fields in 3-D media. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 40, pp. 313-350. (In English).

7. Bembel, R. M., Megerya, V. M., & Bembel, S. R. (2003). Geosolitonny: funktsional'naya sistema Zemli, kontseptsiya razvedki i razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov: monogr. Tyumen, Vektor Buk Publ., 344 p. (In Russian).
8. Berdichevsky, M. N., & Zhdanov, M. S. (1984). Advanced theory of deep geomagnetic sounding. Amsterdam, Elsevier, 408 p. (In English).
9. Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. (2008). Models and methods of magnetotellurics. Berlin, Springer-Verlag, 576 p. (In English).
10. Barashkov, A. S. (1986). Vosstanovlenie elektromagnitnykh poley na poverkhnosti Zemli po tenzoru impedansa. Fizika Zemli, (5), pp. 43-52. (In Russian).
11. Barashkov, A. S., & Dmitriev, V. I. (1987). Ob obratnoy zadache glubinnogo magnetotelluricheskogo zondirovaniya. Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences, 295(1), pp. 83-86. (In Russian).
12. Timurziyev, A. I. (2007). New Paradigm of Oil and Gas Geology Based on deep filtration model of fluid formation and accumulation. Russian Geophysics, (4), pp. 49-60. (In Russian).
13. Gataulin, R. M. & Adiev, Ya. R. (2003). Seismicheskie obrazy "trop" vertikal'noy migratsii flyuidov kak tsilindricheskie zony kollapsa. Russian Geophysics, (1), pp. 209-211. (In Russian).
14. Kondrat'ev, V. A., Pospuev, A. V., Agafonov, Yu. A., Pashevin, A. M., & Ol'khovik, E. A. (2004). Rezul'taty primeneniya novykh tekhnologiy elektromagnitnykh zondirovaniy na yuge Sibirskoy platform. Prospect and protection of mineral resources, (8-9), pp. 26-28. (In Russian).
15. Ogaya, X., Alcalde, J., Marzán, I., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A.,... Benjumea, B. (2016). Joint interpretation of magnetotelluric, seismic, and well-log data in Hontomin (Spain). Solid Earth, (7), pp. 943-958. (In English). DOI: 10.5194/se-7-943-2016
16. Mart'yanov, N. E. (2003). Razmyshleniya o pul'satsiyakh Zemli. Krasnoyarsk, KNII-GiMS Publ., 272 p. (In Russian).
17. Zhang, K., Wei, W., Lu, Q., Dong, H., & Li, Y. (2014). Theoretical assessment of 3-D magnetotelluric method for oil and gas exploration: Synthetic examples. Journal of Applied Geophysics, 106, pp. 23-36. (In English). DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.04.003
18. Dortman, N. V., & Fiveg, S. M. (1992). Udel'noe elektricheskoe soprotivlenie mineralov i gornykh porod. Petrofizika. Spravochnik. V trekh knigakh. Kniga pervaya. Gornye porody i poleznye iskopaemye. Mocsow, Nedra Publ., pp. 183-204. (In Russian).
19. Kuznetsov, V. A. (2005). Normalization of magnetotelluric sounding curves distorted by the S effect. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 41(7), pp. 594-598. (In English).

Сведения об авторах

Сысоев Борис Константинович, геофизик, ООО «МТелл», г. Тюмень

Ягафаров Алик Каюмович, д. г.-м. н., профессор, академик РАН, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Арсан Шади Арсанович, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: shadiarsan@geologist.com

Худяков Денис Сергеевич, инженер, ООО «МТелл», г. Тюмень

Савина Марина Егоровна, ассистент кафедры геологии месторождений нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Boris K. Sysoev, Geophysicist, MTell LLC, Tyumen

Alik K. Yagafarov, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Industrial University of Tyumen

Shadi A. Arsan, Postgraduate at the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen, e-mail: shadiarsan@geologist.com

Denis S. Khudyakov, Engineer, MTell LLC, Tyumen

Marina E. Savina, Assistant at the Department of Geology of Oil and Gas, Industrial University of Tyumen