

УДК 550.837.21

Рябова Светлана Александровна
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник,
Институт динамики геосфер
им. академика М.А. Садовского РАН,
119334 г. Москва,
ул. Ленинский проспект, д. 38, корп. 1
e-mail: riabovasa@mail.ru

**ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ
(МАГНИТНОГО ТИППЕРА)
И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ
С ИЗМЕНЕНИЕМ УРОВНЯ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Аннотация:

Магнитотеллурический метод применяют для решения широкого круга задач, связанных с расчленением геологических разрезов с изменяющимися по глубине и от точки к точке электромагнитными свойствами. В частности, широкое применение нашло магнитовариационное зондирование, основанное на пространственно-временном анализе вариаций магнитных составляющих магнитотеллурического поля. Цель настоящей работы – анализ синхронных вариаций магнитного типпера и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта, зарегистрированных в сильнообводненном районе. В качестве исходных данных используются результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля и гидрогеологического режима, выполняемого на Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (54,96° с.ш., 37,76° в.д.). При выполнении настоящих исследований применяются современные методы корреляционно-регрессионного анализа. Оценка магнитного типпера осуществляется на основе метода разделения сигнал / шум. Полученные в работе данные свидетельствуют об отрицательной и близкой к линейной зависимости между амплитудой магнитного типпера и уровнем подземных вод безнапорного водоносного горизонта.

Ключевые слова: магнитный типпер, уровень подземных вод, корреляционно-регрессионный анализ, магнитотеллурический метод разделения сигнал / шум, безнапорный водоносный горизонт, магнитовариационное зондирование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.166

Riabova Svetlana A.
Candidate of Physical
and Mathematical Sciences, Researcher,
Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,
119334 Moscow,
bldg. 1 38 Leninsky Prospekt
riabovasa@mail.ru

**TEMPORARY VARIATIONS
OF MAGNETOTELLURIC FUNCTION
(MAGNETIC TIPPER) AND THEIR
POSSIBLE RELATIONSHIP WITH
VARIATIONS OF GROUNDWATER LEVEL**

Abstract:

The magnetotelluric method is used to solve a wide range of problems related to the partition of geological sections with electromagnetic properties varying in depth and from point to point. In particular, magnetovariational sounding is widely used based on the spatiotemporal analysis of variations in the magnetic components of the magnetotelluric field. The purpose of this paper is to analyze synchronous variations of the magnetic tipper and the groundwater level of the pressure-free horizon recorded in a heavily flooded area. As the initial data, we use the results of monitoring variations in the geomagnetic field and hydrogeological regime, performed at the Mikhnevo Geophysical Observatory of Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (54.96° N, 37.76° E). When performing these studies, modern methods of correlation and regression analysis are used. The magnetic tipper is evaluated based on the signal-to-noise separation method. The data obtained in the work indicate a negative and close to linear relationship between the amplitude of the magnetic tipper and the groundwater level of the pressure-free horizon.

Keywords: magnetic tipper, groundwater level, correlation and regression analysis, the signal-to-noise separation magnetotelluric method, pressure-free horizon, magnetovariational sounding

Введение

Магнитотеллурический метод – комплекс методов электрической разведки, основанный на изучении вариаций естественного электромагнитного (магнитотеллурического) поля Земли [1]. Комплекс магнитотеллурических методов разведки включает в

себя магнитотеллурическое и магнитовариационное зондирование, магнитотеллурическое, теллурическое, магнитовариационное и комбинированное магнитотеллурическое профилирование [2].

Например, магнитовариационное зондирование основано на пространственно-временном анализе вариаций магнитных составляющих магнитотеллурического поля [3]. Изучаемыми параметрами магнитного поля являются отношения вертикальной и горизонтальных магнитных составляющих, называемых магнитовариационным импедансом, или «типпером» [4].

С момента разработки первых магнитотеллурических методов разведки и вплоть до настоящего времени они нашли применение при оценке мощности и состава покровных и коренных отложений; определении глубины залегания фундамента; поисках и разведке месторождений нефти и газа, рудных месторождений и термальных вод; глубинных исследованиях земной коры и верхней мантии [5 – 8]. Преимущества магнитотеллурических методов разведки по сравнению с другими методами электроразведки состоят в большей глубинности, а также в отсутствии искусственных источников поля, что делает эти методы более мобильными, особенно в труднодоступных районах.

Известно, что самые подвижные компоненты в недрах Земли – флюиды – играют важную роль в массо-теплопереносе и образовании горных пород, минералов и месторождений [9]. Электропроводность чувствительна к наличию жидких флюидов [10]. Можно предположить, что изменение со временем количества флюидов и их процентного содержания отразится во временных вариациях магнитотеллурических функций, в частности, магнитовариационных параметров.

Поскольку в распоряжении имелись трехкомпонентные магнитные записи и данные мониторинга уровня подземных вод на Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), было решено провести анализ синхронных вариаций магнитного типпера и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта.

Исходные данные

При выполнении настоящих исследований используются результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля и гидрогеологического режима, выполняемого на Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (54,96° с.ш., 37,76° в.д.).

Измерения вариаций геомагнитного поля выполнялись на Геофизической обсерватории «Михнево» в специальном стационарно оборудованном пункте, что позволяет уменьшить риск записи геомагнитных вариаций неестественного происхождения. Локальные геомагнитные вариации регистрировались с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018, электронный блок которого обеспечивает соответствующее преобразование данных, получаемых с феррозондового датчика, их обработку и накопление с дискретностью 1 с [11].

Уровень подземных вод каширского горизонта (глубина 25,8 м, мощность до 1 м) определяется в открытой скважине глубиной 31,5 м, пройденной на обсерватории «Михнево» [12]. В пределах северного геоблока относительно Нелидово-рязанской шовной зоны, где расположена обсерватория, каширский горизонт является безнапорным [13]. Наблюдения проводятся с помощью погружного зонда LMR-308i, обеспечивающего автоматическую регистрацию уровня воды с дискретностью 1 с и погрешностью не хуже 0,1 мм.

Методы вычисления передаточных функций

Необходимым этапом успешного использования метода магнитотеллурического зондирования является обработка полевого материала, позволяющая устойчиво определять компоненты передаточных функций на поверхности Земли по временным записям естественного электромагнитного поля.

В повышении качества обработки значительный успех достигнут на пути использования робастной статистики. Главным преимуществом робастных статистических методов является возможность автоматизированной отбраковки элементов данных с большими погрешностями (невязки), способных существенно исказить результаты при обычном среднеквадратическом подходе [14]. Этот подход подтвердил свои преимущества по сравнению с другими подходами для оценки магнитотеллурических функций [15].

Самый популярный метод на основе робастной статистики – это метод разделения сигнал / шум, позволяющий подавлять шумы различного происхождения [16]. В основе этого метода лежит представление сглаженных магнитотеллурических функций в следующем виде:

$$Z(\omega) = U(\omega)D(\omega)Z^{1-D}(\omega),$$

где $Z^{1-D}(\omega)$ – передаточная функция для одномерной $(1-D)$ модели; $D(\omega)$ – безразмерная гладкая функция искажений (ее применение, как продемонстрировано в статье [17], приводит к более точной оценке передаточных функций); $U(\omega)$ – безразмерная гладкая корректирующая функция; ω – частота.

При расчете магнитного типпера, который представляется в следующем виде:

$$T(\omega) = U(\omega)D(\omega),$$

передаточная функция $Z^{1-D}(\omega)$ приблизительно равна единице. Функции $D(\omega)$ и $U(\omega)$ представляются в виде N полиномов Чебышева с комплексными коэффициентами d_n и u_n :

$$D(\omega) = \sum_{n=1}^N d_n T_n[\chi(\omega)];$$
$$U(\omega) = \sum_{n=1}^N u_n T_n[\chi(\omega)].$$

Частотная зависимость задается как $\chi_j(\omega) = 1 - 2 \log(j/J) / \log(1/J)$ для $j = 1, \dots, J$ частот так, чтобы $-1 \leq \chi_j(\omega) \leq 1$.

При выполнении настоящих исследований предпочтение для вычисления компонент магнитного типпера было отдано описанному выше методу разделения сигнал / шум. Кроме того была проведена предварительная фильтрация данных на основе применения вейвлет-преобразования [18], что позволило повысить качество идентификации выбросов на предварительном этапе обработки данных.

Методы анализа синхронных вариаций магнитного типпера и уровня подземных вод

При оценке силы связи между вариациями магнитного типпера и уровня подземных вод использовался корреляционный анализ с применением методик линейной корреляции Пирсона, ранговой корреляции Кендалла и Спирмена [19].

С целью подтверждения статистической значимости корреляционной зависимости между двумя рядами данных использовался метод анализа статистической значимости при помощи суррогатных рядов данных. Вычисление суррогатных рядов выполнялось с помощью рандомизации фазы Фурье разложения исходного ряда [20]. Полу-

ченные таким образом суррогатные ряды анализировались на корреляцию вместе с оригинальными рядами данных.

Для установления зависимости между вариациями магнитного типпера и уровня подземных вод применялся метод линейного регрессионного анализа, включающий построение уравнений парной линейной регрессии и оценку их значимости, оценивание ошибок аппроксимации обнаруженных зависимостей по полученным уравнениям регрессии [21].

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты оценки магнитуды магнитного типпера приведены на рис. 1, который демонстрирует, что магнитуда магнитного типпера непостоянна во времени. Можно предположить, что вариации уровня подземных вод, которые в случае безнапорного водоносного горизонта пропорциональны изменению мощности водопродящего слоя, – одна из причин вариаций магнитуды магнитного типпера. Представленные на рис. 1 результаты сравнения вариаций магнитуды магнитного типпера и уровня подземных вод безнапорного горизонта на Геофизической обсерватории «Михнево» демонстрируют синхронность их изменений.

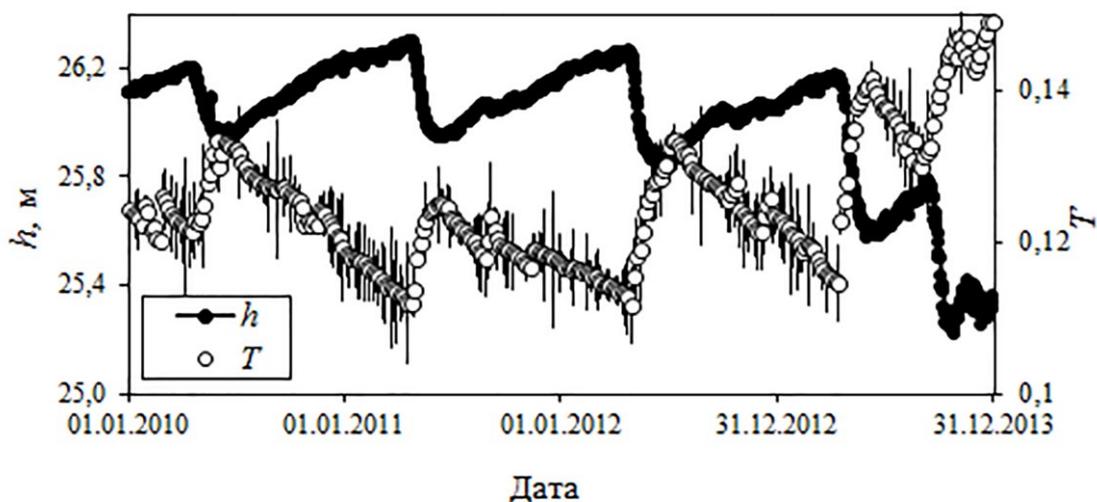


Рис. 1 – Временные вариации магнитуды магнитного типпера T и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта h на обсерватории «Михнево» за период времени 2010 – 2013 гг.

Применение корреляционного анализа показало, что вариации магнитного типпера и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта характеризуются значимой корреляцией (коэффициент детерминации по методу Кендалла равен -58% , по методу Пирсона -85% , по методу Спирмена -72%). Уникальность такой высокой корреляции продемонстрировала оценка коэффициентов корреляции суррогатных рядов данных, значения которых оказались значительно ниже по сравнению с коэффициентами корреляции исходных рядов данных.

Приведенная на рис. 2 диаграмма рассеяния свидетельствует о возможной линейной связи между магнитудой магнитного типпера и уровнем подземных вод безнапорного водоносного горизонта на обсерватории «Михнево»: очевидно, что точки данных в основном располагаются вдоль одной прямой линии.

В результате пошагового алгоритма регрессионного анализа было получено следующее уравнение:

$$T = -0,03h + 0,96, \quad (1)$$

где T – магнитуда магнитного типпера; h – уровень каширского водоносного горизонта.

На рис. 2 приведены линейная аппроксимация и 99-процентный интервал линии регрессии.

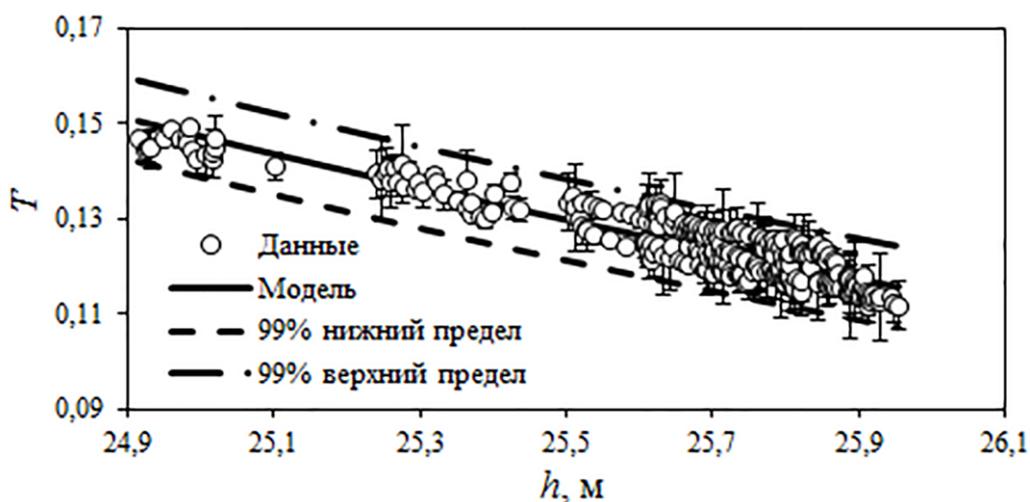


Рис. 2 – Зависимость между магнитудой магнитного типпера T и уровнем подземных вод безнапорного водоносного горизонта h на обсерватории «Михнево» за период времени 2010 – 2013 гг.
Линия линейной регрессии (сплошная линия)
и 99-процентный интервал линии регрессии (верхний и нижний доверительные пределы)

Оценку надежности уравнения регрессии в целом и показатель тесноты связи дает F -критерий Фишера. По данным анализа, $F = 844,44$. Вероятность случайно получить такое значение F -критерия составляет $2 \cdot 10^{-121}$ %, что не превышает допустимый уровень значимости 1 %. Следовательно, полученное значение неслучайно, оно сформировалось под влиянием существенных факторов, т.е. подтверждается статистическая значимость всего уравнения. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,854$ оценивает долю вариации результата за счет представленных в уравнении факторов в общей вариации результата. В данном случае доля составляет 85,4 % и указывает на очень сильную степень обусловленности вариации результата вариацией факторов, другими словами, на очень сильную связь факторов с результатом. Оба коэффициента свидетельствуют об очень сильной (более 85 %) доле объясненной дисперсии исходных данных результата в полученной модели. Следовательно, полученное уравнение (1) хорошо отображает связь между вариациями магнитного типпера и уровня подземных вод.

Заключение

Таким образом, статистический анализ с проверкой достоверности и статистической значимости корреляционного соотношения с использованием рандомизированных рядов данных показал, что вариации магнитного типпера и уровня подземных вод безнапорного (каширского) водоносного горизонта характеризуются значимой отрицательной корреляцией. На основе регрессионного анализа получена линейная зависимость между магнитудой магнитного типпера и уровнем подземных вод на обсерватории «Михнево».

По мнению автора, представленные в настоящей работе данные представляют большой интерес для мерзлотно-гляциологического и гидрогеологического картирования и дают основу для исследования динамики физического состояния массива горных пород, в том числе оценки вариаций водонасыщенности. Можно предполагать, что в разных по гидрогеологическим характеристикам районах будет наблюдаться отличная от полученной при выполнении настоящих исследований зависимость между магнитотеллурическими параметрами и уровнем подземных вод, в этой связи необходимо проводить дальнейшие исследования.

Литература

1. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
2. Chave, A.D. The magnetotelluric method: theory and practice / A.D. Chave, A.G. Jones. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 552 p.
3. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования / И.И. Рокитянский. – Киев: Наукова думка, 1975. – 276 с.
4. Магнитовариационное зондирование: новые возможности / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев, Н.С. Голубцова, Н.А. Мерщикова, П.Ю. Пушкарев // Физика Земли. – 2003. – № 9. – С. 3 – 30.
5. Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики / И.М. Варенцов, В.А. Куликов, А.Г. Яковлев, Д.В. Яковлев // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 9 – 29.
6. Жамалетдинов А.А. Магнитотеллурический метод изучения строения массивов горных пород: учебное пособие / А.А. Жамалетдинов. – Апатиты: Кольск. фил. ПетрГУ, 2014. – 103 с.
7. Куликов В.А. Возможности МТ методов при проведении работ на высокоомных разрезах / В.А. Куликов, А.Г. Яковлев // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 12. – С. 3 – 6.
8. Bai, D. Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, Southern China / D. Bai, Z. Liao, M.A. Meju // Geophysical Journal International. – 2001. – Vol. 147. – No. 3. – P. 677 – 687.
9. Семашко С.В. Современные движения флюидов в земной коре / С.В. Семашко // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 2. – С. 51 – 67.
10. Мороз Ю.Ф. Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке / Ю.Ф. Мороз, В.А. Логинов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – Вып. 42. – С. 9 – 24.
11. Рябова С.А. Особенности геомагнитных вариаций на средних широтах Восточно-Европейской платформы / С.А. Рябова, А.А. Спивак // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – № 2. – С. 99 – 206.
12. Горбунова Э.М. Гидрогеологическое районирование Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны / Э.М. Горбунова // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. – М: ГЕОС, 2005. – С. 134 - 138.
13. Riabova S.A. Calculation of magnetotelluric function and their variations due to changes in the groundwater lever / S.A. Riabova // 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference Proceedings. – Vol. 18. – P. 119 – 126.
14. Sutarno D. Development of robust magnetotelluric impedance estimation: A review / D. Sutarno // Indonesian Journal of Physics. – 2005. – Vol. 16. – P. 79 – 89.
15. Рябова С.А. Сравнение методов оценки магнитотеллурических функций / С.А. Рябова // Новые идеи в науках о Земле: в 7 т. Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». – М.: Издательство Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2019. – Т. 4: Инновационные и цифровые технологии геологической разведки, горного дела, бурения скважин. – С. 479 – 481.
16. Larsen I.C. Robust smooth magnetotelluric transfer functions / I.C. Larsen, R.L. Mackie, A. Manzella, A. Fiodelisi, S. Rieven // Geophysical Journal International. – 1996. – Vol. 124. – No. 3. – P. 801 – 819.
17. Larsen, I.C. Low frequency (0.1 – 0.6 cpd) electromagnetic study of deep mantle electrical conductivity beneath the Hawaiian Islands / I.C. Larsen // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1975. – Vol. 43. – P. 17 – 46.

-
18. Trad, D.O. Wavelet filtering of magnetotelluric data / D.O. Trad, J.M. Travassos // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – P. 482 – 491.
 19. Харченко М.А. Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов / М.А. Харченко. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 31 с.
 20. Middleton, G.V. Data analysis in the Earth sciences using MatLab / G.V. Middleton. – New York: Prentice Hall, 2000. – 260 p.
 21. Weisberg, S. Applied linear regression / S. Weisberg. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. – 370 p.