

УДК 550.372;550.837

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПОИСКА ГЛУБИННЫХ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

К. М. Ермохин¹, Ю. А. Копытенко¹, М. С. Петрищев^{1,*},
член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич², П. А. Сергушин¹

Поступило 27.08.2018 г.

Экспериментально доказана возможность выделения глубинных поляризующихся объектов в естественных электромагнитных полях на основе синхронных измерений вертикальной составляющей длиннопериодных вариаций магнитного поля Земли. Интерпретация данных вызванной поляризации выполнена методом аналитического продолжения геофизических полей вниз (в сторону источников).

Ключевые слова: вызванная поляризация, фазовый метод, магнитное поле Земли.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852217-220>

Метод вызванной поляризации (ВП), разработанный В.А. Комаровым в СССР в конце 1950-х годов и Г. Сигелом в Канаде, оказался эффективным при поиске неглубокозалегающих рудных месторождений. Для поиска глубинных залежей углеводородов (УВ) метод ВП применяется редко (преимущественно на шельфе [9]), что объясняется его относительно малой глубиной при использовании искусственных источников электромагнитного поля для наземных съёмки.

Естественные источники длиннопериодных вариаций электромагнитного поля позволяют вести поиски глубинных неоднородностей до 10 км и более [1]. В методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ), наиболее интенсивно развиваемом в последние годы для поиска залежей УВ с целью повышения результативности сейсморазведки, эффекты ВП только начинают устойчиво выделяться [2]. Геолого-геофизические предпосылки применения метода ВП в задачах поиска залежей УВ рассматривались в [5].

Рассмотрим пути использования эффекта ВП при синхронном магнитовариационном профилировании вертикальной компоненты естественного магнитного поля Земли. Среди предпосылок применения такого подхода можно выделить следующее:

вертикальная составляющая переменного магнитного поля создаётся естественными теллурическими токами, т.е. порождается объектом поиска [6];

измерение магнитного поля проще и технологичнее электрических измерений (отсутствуют поляризация электродов и влияние приповерхностных факторов) [10, 12];

погрешности при измерении магнитной вертикальной составляющей не критичны к ориентации магнитных датчиков [7];

влияние горизонтально-слоистого разреза при измерении вертикальной магнитной компоненты минимально, т.е. предмет поиска — глубинные объекты, в числе которых могут быть и залежи углеводородов, проявляются наиболее отчётливо [13].

Предлагаемая ниже технология является логическим продолжением фазово-градиентного метода [7]. Суть нового подхода следующая: при достаточно большом интервале времени измерений из сигнала могут быть выделены отдельные длиннопериодные гармоники $A_k \exp\left(i\left(\frac{2\pi}{T_k}t + \varphi_k\right)\right)$, где t — время, T_k — период, A_k — амплитуда, а φ_k — фаза гармоники k . Отклик среды на теллурический ток состоит в изменении амплитуд и фаз отдельных гармоник:

$$a_k \exp\left(i\left(\frac{2\pi}{T_k}t + \varphi_k + \varphi_k^{in} + \varphi_k^{ip}\right)\right),$$

где φ_k^{in} — индукционный сдвиг фазы (ИС) k -й гармоники, φ_k^{ip} — сдвиг фазы ВП. Индукционный сдвиг прямо пропорционален частоте [1], т.е. $\varphi_k^{in} = \frac{2\pi}{T_k}\mu$ (где μ — индукционный параметр), а сдвиг фазы ВП φ_k^{ip} в отличие от ИП не зависит от частоты, т.е. $\varphi_k^{ip} = \nu$ (на этом основан принцип фазового измерения кажущейся поляризуемости, реализованный в аппа-

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Санкт-Петербургский филиал

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва

*E-mail: k_m_e@list.ru

ратуре ВП-Ф с контролируемым источником поля [8]).

Для выделения гармоник, присутствующих в наблюдаемом сигнале, на первом этапе вычисляется его спектр, а затем амплитуда и фаза доминирующих гармоник уточняются с помощью узкополосного симметричного фильтра, не искажающего фазу.

Наиболее перспективным для применения указанного подхода нам представляется диапазон периодов геомагнитных пульсаций Рс4 (50–150 с). Квазипериодические пульсации Рс4 отличаются высокой устойчивостью в интервале 04–14 ч местного времени на протяжении нескольких дней в восстановительную фазу геомагнитной бури и суббури [11].

Для разделения эффектов индукции и ВП используем разностную схему. Вычислим сдвиг фазы отклика среды в двух точках 1 и 2 — $R_1(t)$, $R_2(t)$, отстоящих недалеко друг от друга (порядка 200–500 м), для некоторой гармоники n . При синхронных измерениях [7] ввиду синфазности сигнала от удалённого источника φ_n — фаза n -й гармоники одинакова.

Разность сдвига фазы между точками 1 и 2:

$$\Delta\varphi_n^{12} = \omega(\mu_2 - \mu_1) + (v_2 - v_1),$$

т.е. ИС и сдвиг фазы ВП разделены в частотной области. Построив кривую $v_{i+1} - v_i$, $i = 0, 1, \dots, N$, по профилю (N — число точек на профиле) и проинтегрировав, получим

$$v_k = \sum_{j=0}^k (v_{j+1} - v_j) + C_v,$$

т.е. кривую кажущейся поляризуемости по профилю с точностью до постоянного множителя и неизвестного слагаемого C_v . Фоновая составляющая C_v может быть выбрана, например, средней по участку или по профилю [3]. Аналогично вычисляется кривая индукционного параметра.

Глубина проникания поля определяется толщиной скин-слоя как $d = \sqrt{10\rho T / (2\pi)}$, км, где ρ — кажущееся электрическое сопротивление в Ом · м; T — период колебаний в секундах (магнитная проницаемость среды полагается равной магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Для исследований до глубины H достаточно принять $H = d/4$, где поле меняется не более чем на 30%, т.е. оно квазиоднородно. Глубинность исследований в этом случае (при использовании периодов порядка 100 с) даже в очень низкоомных разрезах, типичных для нефтяных районов ($\rho \approx 10$ Ом · м), составит

около 4 км, что достаточно для эффективных поисков залежей УВ.

При интерпретации данных ВП традиционно используется формула Сигела—Комарова, т.е. определяется сначала распределение удельного сопротивления в разрезе, а затем поляризуемости. Предлагаемый подход не даёт такой возможности, поэтому мы воспользовались методом аналитического продолжения (АП) геофизических полей вниз (в сторону источников) [3, 4].

Экспериментальные работы проведены в Карелии вблизи пос. Лехта в 2017 г. по профилю длиной 5 км с шагом 250–350 м. Этот район характеризуется рядом известных поляризующихся объектов (шунгиты, графиты, сульфидные залежи) [14].

Измерения сдвига фазы производились синхронно с помощью базовой станции и непосредственно между точками, идущими подряд по профилю.

Синхронные 3–6-часовые записи датчиков вертикальной магнитной компоненты с частотой отсчётов 50 Гц первично обрабатывались визуально с целью выбора общих информативных участков (наличия сигнала достаточной интенсивности и стабильности во времени). Таким образом отобраны синхронные записи длиной 1 ч и выделены гармоники, обеспечивающие построение функций $v(x)$ и $\mu(x)$. На интервале 50–150 с выделены три периода с максимальной амплитудой. Полученные разрезы распределения $v(x, z)$ и $\mu(x, z)$ (z — глубина) в нижнем полупространстве представлены на рис. 1. Разрез индукционного параметра $\mu(x, z)$ показал наличие контакта двух геологических блоков пород в области 2000-го пикета (проводящий — слева, непроводящий — справа). Положение контакта в плане и направление падения подтверждаются данными аэромагниторазведки (рис. 2).

В разломной области контакта и пересечения двух разломов (рис. 2) на разрезе $v(x, z)$ выделяется поляризующийся объект на глубине 300 м, что характерно для геологических условий Карелии [14]. Глубинность АП составляет $1/3$ длины профиля [3]. В эксперименте при длине профиля 5 км объекты глубже 1,5 км недоступны для метода АП. Для достижения требуемой глубинности 5 км при поисках залежей углеводородов длина профиля должна составлять не менее 12–15 км.

Проведённый эксперимент показал принципиальную возможность нахождения поляризующихся залежей на основе АП данных синхронных измерений длиннопериодных вариаций магнитного поля.

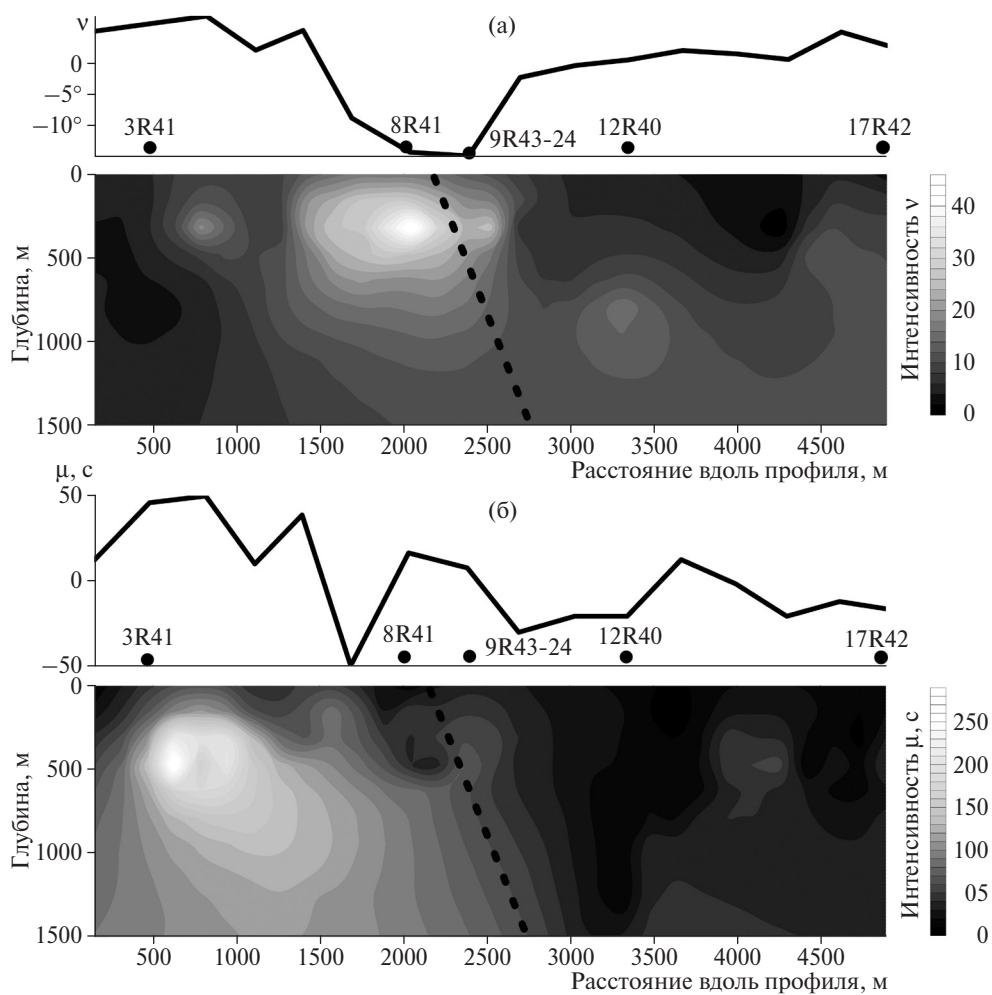


Рис. 1. Результаты аналитического продолжения функций в нижнее полупространство: а — $v(x)$ (сдвиг фазы ВП); б — $\mu(x)$ (индукционный параметр). На верхних панелях выборочно указано положение пунктов измерения по профилю, штриховой линией отмечен контакт блоков.

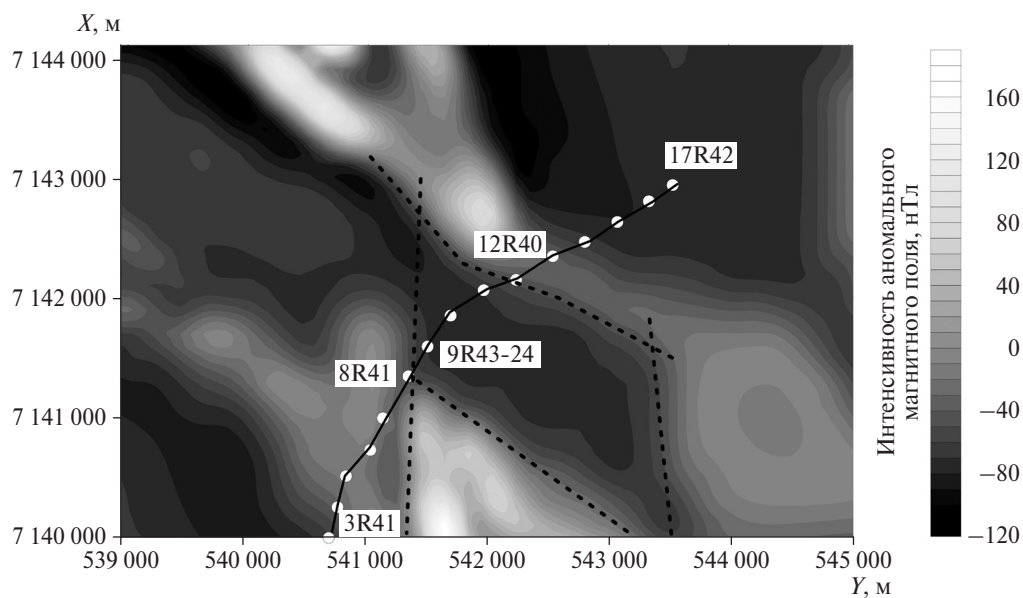


Рис. 2. Фрагмент карты аномального магнитного поля ΔT_a Лехтинской геологической структуры с положением экспериментального профиля. Пункты измерения указаны кружками, штриховой линией обозначены разломы.

Источники финансирования. Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) и Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
2. Зорин С.И. Измерение эффекта вызванной поляризации в теллурическом поле. Дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 83 с.
3. Ермохин К.М. // Геоинформатика. 2010. № 2. С. 51–60.
4. Ермохин К.М. // ДАН. 2017. Т. 476. № 1. С. 104–107.
5. Ермохин К.М. // Зап. Гор. ин-та. 2017. Т. 227. С. 511–515.
6. Ингеров А.И., Ингеров И.А., Лозовой А.Л., Мендри Я.В. // Науч. вестн. Нац. гор. ун-та (Днепропетровск). 2012. № 2. С. 5–10.
7. Копытенко Ю.А., Исмаилов В.С., Петрищев М.С. // ДАН. 2015. Т. 462. № 3. С. 352–355.
8. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 391 с.
9. Легейдо П.Ю. // Геофизика. 2004. № 5. С. 38–41.
10. Мусеев В.С. Методы вызванной поляризации и наземно-скважинной электроразведки при поисках и оконтуривании залежей углеводородов западно-сибирской нефтегазоносной провинции. Автореф. дис. д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск: СНИИГГИМС, 2002. 40 с.
11. Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения магнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 271 с.
12. Собисевич А.Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 354 с.
13. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Изучение ультранизкочастотных электромагнитных возмущений, регистрируемых в районе Эльбурского вулканического центра. В сб.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФА РАН. 2008. Т. 6. С. 157–163.
14. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Под ред. Л.В. Глушанина, Н.В. Шарова, В.В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

ON THE USE OF NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELDS TO SEARCH FOR DEEP POLARIZED OBJECTS

K. M. Ermokhin, Yu. A. Kopytenko, M. S. Petrishchev,
Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich, P. A. Sergushin

Received August 27, 2018

In article the possibility of detection of the deep polarized objects in natural electromagnetic fields is experimentally proved on the basis of synchronous measurements of a vertical component of long-period variations of magnetic field of Earth. Interpretation of data of the induced polarization is executed by method of analytical continuation of geophysical fields down (towards sources). Experimental works are completed near Lekhta (Karelia) in 2017.

Keywords: induced polarization, phase method, Earth's magnetic field.