

УДК 550.837

Разработка и реализация метода низкочастотного наземно-подземного зондирования

В. П. Колесников, Т. А. Ласкина

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: info@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 10 июля 2018 г.)

Рассмотрен подход к реализации наземно-подземного зондирования на основе квазистационарного электромагнитного поля с использованием аппаратурно-программного комплекса АНЧ-3М–ПМП-2. Разработанная технология обеспечивает возможность контроля проникающей способности электромагнитного поля от земной поверхности до шахтного поля, характеризуется повышенной чувствительностью к наличию проводящих зон и относительно высокой оперативностью работ.

Ключевые слова: наземно-подземное зондирование, электромагнитное поле, технология, эффективная глубина, информативность.

DOI: 10.17072/psu.geol.17.3.284

Введение

Развитие методов электротометрии и исследование их многофункциональных возможностей, несомненно, актуальны при решении различного рода задач.

В данной работе рассмотрен один из новых подходов к реализации метода наземно-подземного зондирования (НПЗ) с использованием низкочастотных квазистационарных электромагнитных полей. Исследования выполнены на примере соляного месторождения в целях получения информации о физических свойствах пород, залегающих от земной поверхности до глубины расположения шахтных выработок.

Реализация методов наземно-подземного зондирования сопряжена с определенными трудностями (Kai et al., 2017; Pan et al., 2016; Хачай и др., 2009; Петровский, 2001), включая обоснование их информационных возможностей, создание специального аппаратурно-методического обеспечения, способов интерпретации и геологического истолкования результатов наблюдений. Это послужило основным направлением выполненных нами работ.

В качестве реализуемого использован способ частотного зондирования, осно-

ванный на возбуждении электромагнитного поля на земной поверхности с помощью гальванического источника в виде заземленной линии АВ и регистрации компонент магнитного поля трехкомпонентными индукционными датчиками в шахтных выработках.

Поскольку при НПЗ взаимное расположение питающей и приемной установок, а следовательно, и характер поведения регистрируемого электромагнитного поля значительно отличаются от традиционных наземных методов и методик зондирования, необходимо применение соответствующих подходов к его реализации. В данной работе рассмотрен один из таких подходов, основанный на существующих общих физических представлениях с использованием специального аппаратурно-программного обеспечения и результатов анализа экспериментальных наблюдений.

Физическое обоснование

Информативность метода наземно-подземного зондирования определяется следующими факторами: 1) необходимость учета особенностей формирования электромагнитного поля; 2) определение связи компонент измеряемого в шахтных

условиях электромагнитного поля с электрическим сопротивлением перекрывающей толщи пород; 3) оценка эффективной глубины проникновения электромагнитного поля.

Рассмотрим характер формирования магнитного поля при наличии в среде проводящего объекта (рис. 1).

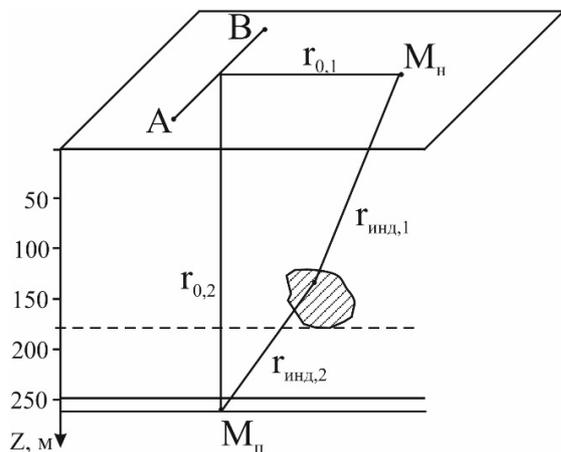


Рис. 1. Формирование магнитного поля при наличии в среде проводящего объекта

Наблюдаемое магнитное поле определяется соотношением

$$\overline{H}(\omega, r) = \left| \overline{H}_0(\omega, r_0) - \overline{H}_{инд}(\omega, r_{инд}) \right|, \quad (1)$$

где $\overline{H}_0(\omega, r_0)$ – первичное поле источника в точке измерений, удаленной от него на расстояние r_0 ; $\overline{H}_{инд}(\omega, r_{инд})$ – поле, индуцированное проводящим телом (током индукции, образующимся в этом теле), расположенным на расстоянии $r_{инд}$ от точки наблюдения.

Очевидно, что чем выше проводимость тела, тем больше величина индуцированного в нем тока и, согласно закону Био-Савара-Лапласа, тем больше величина возбуждаемого им магнитного поля $\overline{H}_{инд}(\omega, r_{инд})$, (Яворский, Детлаф, 1981).

Исходя из этого при наземной съемке величина регистрируемого поля $\overline{H}_n(\omega, r) = \left| \overline{H}_0(\omega, r_n) - \overline{H}_{инд}(\omega, r_{н,инд}) \right|$ будет снижаться над проводящим телом в силу появления в нем индукционного тока.

Иная картина получается при наблюдении в подземных (шахтных) условиях,

где величина наблюдаемого магнитного поля $\overline{H}_n(\omega, r) = \left| \overline{H}_0(\omega, r_n) - \overline{H}_{инд}(\omega, r_{н,инд}) \right|$ может увеличиваться, поскольку расстояние от проводящего тела (источника индуцированного тока) до точки наблюдения ($r_{инд,2}$) становится значительно меньше расстояния от наземного источника до этой точки ($r_{0,2}$) и соответственно возможна ситуация, когда

$$\overline{H}_0(\omega, r_0) < \overline{H}_{инд}(\omega, r_{инд})$$

(Терещенко и др., 2013).

Таким образом, существует вполне определенная физическая связь величины магнитного поля с проводимостью (электрическим сопротивлением) среды.

Оценка эффективной глубины

В теории переменных полей за эффективную глубину проникновения поля $Z_{эф}$ принимают глубину, при которой величина поля уменьшается в e раз (e – основание натурального логарифма, $e=2.7$) (Электроразведка..., 1989):

$$z_{эф} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\pi f \cdot 4\pi 10^{-7}}{2\rho}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho}{f}}. \quad (2)$$

То есть эффективная глубина проникновения электромагнитного поля в однородной среде определяется ее удельным сопротивлением и частотой поля: чем больше сопротивление среды и меньше частота поля, тем больше глубина проникновения поля в недра Земли.

Соответствующие графики относительной величины $E_{x,омн}$ для разных значений частот (\sqrt{T}) и заданной величины сопротивления ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) приведены на рис. 2.

Для оценки скорости изменения полученных графиков $E_{x,омн}(z)$ с глубиной трансформируем их в графики производной $\frac{\partial E_{омн}}{\partial(\sqrt{T})}$, наиболее контрастно отображающие чувствительность

относительной напряженности поля к изменению зондирующего параметра \sqrt{T} .

Найдем выражение для этой производной. Исходя из предыдущей работы (Колесников, 2013), запишем:

$$E_{отн} = e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \cdot z_{эф}} = e^{-\sqrt{\frac{2\pi f \mu\sigma}{2}} \cdot z_{эф}} = e^{-\sqrt{\pi f \mu\sigma} \cdot z_{эф}} = e^{-\sqrt{\pi\mu\sigma} \frac{1}{\sqrt{T}} \cdot z_{эф}}$$

Выполнив замену $x = \sqrt{T}$; $u = 1/x$; и учитывая

$$\frac{\partial E_{отн}}{\partial x} = \frac{\partial E_{отн}}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x};$$

получим

$$\frac{\partial E_{отн}}{\partial U} = -\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф} \cdot e^{-\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф} U} = -\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф} E_{отн};$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial(x^{-1})}{\partial x} = -x^{-2}; x^2 = (\sqrt{T})^2 = T;$$

$$\frac{\partial E_{отн}}{\partial x} = -\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф} E_{отн} \left(-\frac{1}{x^2}\right) =$$

$$= +\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф} E_{отн} \frac{1}{x^2} = \sqrt{\pi\mu\sigma} E_{отн} \frac{z_{эф}}{T} = \frac{\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф}}{T} E_{отн};$$

$$\frac{\partial E_{отн}}{\partial(\sqrt{T})} = \frac{\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot z_{эф}}{T} E_{отн} = \sqrt{\frac{\pi 4\pi 10^{-7}}{\rho} \frac{z_{эф}}{T} E_{отн}} = \frac{2\pi z_{эф}}{T} \sqrt{\frac{10^{-7}}{\rho}} E_{отн}. (3)$$

Результаты расчета относительной величины $\frac{\partial E_{отн}}{\partial(\sqrt{T})}$ для разных значений элек-

трического сопротивления однородной среды (рис. 3) показывают возможность оценки, помимо $Z_{эф}$ диапазона, эффективного проявления слоя

$$\Delta Z_{эф} (\Delta Z_{эф} = Z_{эф} \pm DZ),$$

оказывающего наиболее значительное влияние на результат измерений (в данном примере этот диапазон отмечен для

величины $\frac{\partial E_{отн}}{\partial(\sqrt{T})}$, отличающейся от ее

максимального значения на 10 %).

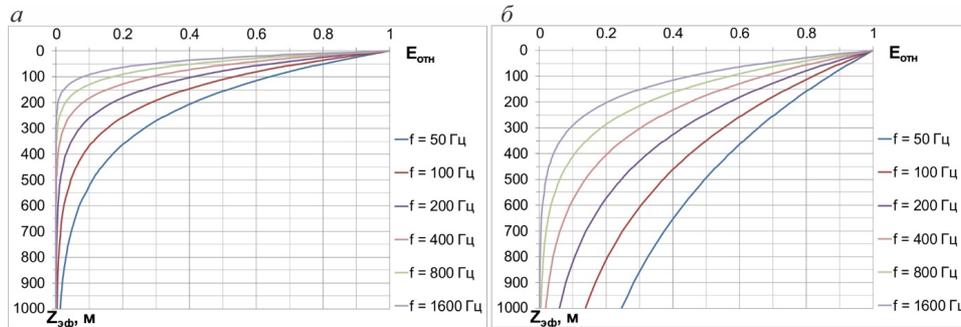


Рис. 2. Графики зависимости $E_{x,отн}$ для разных значений частот при $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (а) и $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (б)

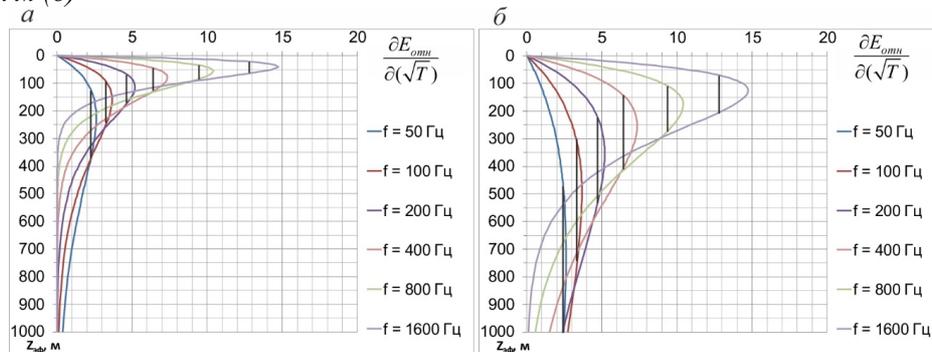


Рис. 3. Графики $\frac{\partial E_{отн}}{\partial(\sqrt{T})}$ при $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (а), $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (б)

Однако в случае неоднородной, к примеру, горизонтально-слоистой модели среды, задача оценки $Z_{эф}$ усложняется.

Как следует из уравнения (2), $Z_{эф}$ определяется отношением $\frac{\rho}{f}$. В этом одна из причин неоднозначности определения глубины зондирования ($Z_{эф}$) и комплексирования гальванического и индуктивного методов зондирования.

Для повышения однозначности оценки $Z_{эф}$ (либо $\Delta Z_{эф}$) нужна дополнительная априорная информация (анализ параметрических зондирований с использованием данных бурения, электрического каротажа, комплексного анализа с результатами наземного зондирования и др. с целью выделения основных пачек пород, оказывающих заметное влияние на результаты наблюдаемого поля).

Рассмотрим один из подходов к реализации этого.

Будем исходить из следующего: в случае однородной среды

$$Z_{эф} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho}{f}} = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{T} \approx \\ \approx 5 \cdot 10^2 \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{T} = K(\rho) \cdot \sqrt{T}; \quad (4)$$

если среда неоднородная, к примеру, горизонтально-слоистая, то

$$Z_{эф} = K(\mu) \cdot \sqrt{T} \quad (Z_{эф,i} = K(\mu_i) \cdot \sqrt{T}), \quad (5)$$

где $\mu_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}}$ – относительное сопротивление i -го и $(i+1)$ -го слоев.

Из последнего соотношения получаем выражение для определения $K(\mu_i)$:

$$K(\mu_i) = \frac{Z_{эф,i}}{\sqrt{T}},$$

которую можно оценить, сопоставив глубину залегания кровли маркирующего слоя $Z_{эф,i}$ (определенного по результатам анализа параметрического зондирования, выполненного вблизи скважины) с величиной \sqrt{T} (по проявлению соответствующего градиента изменения поля (эффек-

тивного сопротивления, отмечаемого в относительно ненарушенной части разреза).

Пример экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования с использованием разработанной технологии были выполнены в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.

Для реализации наземно-подземного зондирования сформирован аппаратно-программный комплекс, включающий генератор АНЧ-3М ($f = 4.88, 9.76, 19.52, 39, 78, 156$ и 312 Гц; $I_{max} = 2$ А) и измеритель ПМП-2, основанный на использовании трехкомпонентных индукционных датчиков (Колесников и др., 2014; Колесников, Дягилев, 2014).

Обработка и интерпретация результатов наблюдений проводились с помощью программы спектрального анализа переменных электромагнитных полей AnalyzerH3D (Дягилев и др., 2015) и системы программ интерпретации электрических зондирований ЗОНД (Колесников и др., 2005).

По результатам исследования фонового электромагнитного поля, зарегистрированного при выключенном наземном генераторе, выявлено, что оно содержит поле основной промышленной частоты $f = 50$ Гц и ее гармоник (рис. 4, а). Эти частоты, отличающиеся от использованных для наземно-подземного зондирования, в данном случае не могут оказывать существенного влияния на результаты выполненной съемки.

При обработке полученных данных НПЗ установлено, что наблюдаемое поле зафиксировало уверенное проявление каждой из частот, генерируемых наземным источником (шесть частот), а также их нечетных гармоник (от 2 до 12 наиболее информативных для каждой из частот) (рис. 4, б), обеспечивая этим принципиальную возможность зондирования в расширенном диапазоне глубин. В совокупности достаточно уверенно выделено 47 частот в диапазоне от 4.88 до 1562 Гц,

что является весьма обширной исходной информацией для анализа исследуемой толщи пород.

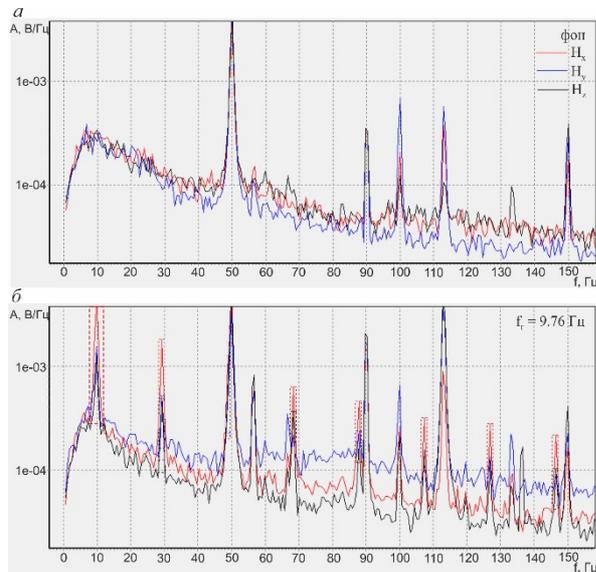


Рис. 4. Пример спектра фоновой записи в частотном диапазоне 1-150 Гц (а) и спектра записи при включении наземного генератора на частоте 9.76 Гц (б)

В целях получения начального представления о характере изменения физических свойств обследуемой среды по результатам выполненных многочастотных наблюдений построен разрез интерпретационного параметра H_z/H_r (рис. 5), отображающий степень изменения проникающей способности электромагнитного поля.

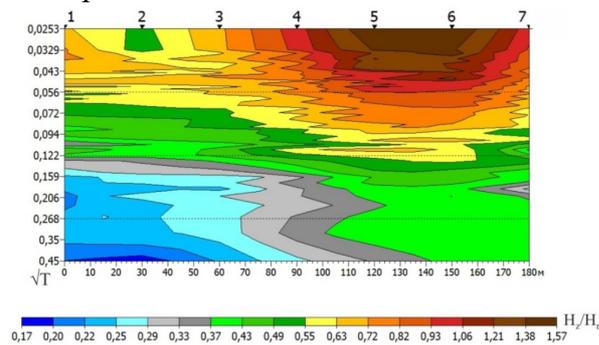


Рис. 5. Разрез отношения H_z/H_r , построенный по результатам анализа основных используемых частот и их гармоник

Исходя из рассмотренных выше общих физических принципов сформирован вариант вычисления эффективного сопротивления по результатам шахтных наблюдений магнитного поля, несущего инфор-

мацию об обобщенном электрическом сопротивлении пород в области эффективного проникновения электромагнитного поля:

$$\rho_k = \frac{1}{\pi\omega} \left(\frac{H_z(\omega)_{surface}}{H_z(\omega)_{minz}} \right)^2 \quad (6)$$

Полученная эмпирическая формула справедлива для случая субпараллельного положения наземного и шахтного профилей с их небольшим отклонением по вертикали.

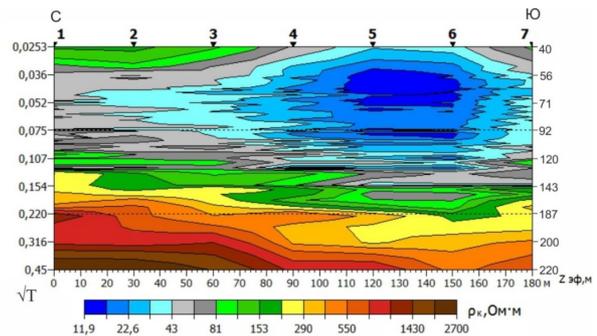


Рис. 6. Разрез эффективного сопротивления по данным НПЗ

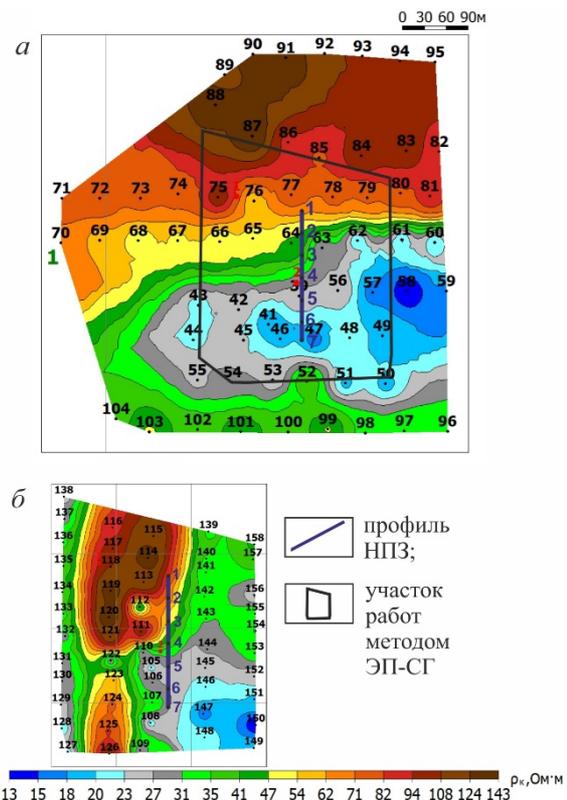


Рис. 7. Карты кажущегося сопротивления по данным метода ПМП для $Z_{эф} = 120-130$ м (а) и ЭП-СГ для $Z_{эф} = 140-150$ м (б)

Комплексный анализ полученных материалов показал закономерное про-

явление разной проникающей способности квазистационарного поля через обследуемую толщу пород, а также изменение их электрической проводимости, связанной со степенью разуплотненности и влагонасыщенности порового пространства.

В целях предварительной заверки информативности результатов съемки методом НПЗ использовано два наземных экспресс-метода электроразведки – метод электропрофилирования по методике среднего градиента (ЭП-СГ) (Электроразведка..., 1989) (рис. 7, а) и индукционное зондирование методом промышленных магнитных полей (ПМП) (Колесников, Ласкина, 2014) (рис. 7, б), наиболее приемлемых в сложных зимних условиях выполнения экспериментальных работ.

Выводы

Разработанный подход к реализации низкочастотного наземно-подземного зондирования на основе использования аппаратно-программного комплекса АНЧ-ЗМ–ПМП-2 позволяет получать достаточно детальную информацию о строении изучаемой части разреза от приповерхностных отложений до глубины залегания шахтных выработок при анализе основных частотных составляющих сигнала и их гармоник. Метод обеспечивает возможность контроля проникающей способности электромагнитного поля от земной поверхности до шахтного поля, характеризуется повышенной чувствительностью к наличию проводящих зон, относительно высокой помехоустойчивостью и оперативностью выполнения работ.

Разработанный способ наземно-подземного зондирования может использоваться в наземно-шахтной или межскважинной модификации при решении инженерно-геологических и поисковых задач.

Библиографический список

Аппаратурно-программный комплекс для геоэлектроразведки: пат. 148256 Рос. Федерация: МПК7: G01V3/02 / Колесников В.П., Дягилев Р.А., Колесников С.В.; 28.10.2014.

Колесников В.П. Электрметрия. Основы теории переменных электромагнитных полей / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2013. 185 с.

Колесников В.П., Ласкина Т.А. Электроразведка в условиях урбанизированных территорий // Геофизика. 2014. №5. С. 33-40.

Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. 2-е изд., доп. / ЦНИТРИ. М., 2001. 290 с.

Программа для регистрации промышленных электромагнитных полей для проведения геофизических изысканий: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2014611489 Рос. Федерация / Колесников В.П., Дягилев Р.А.; 04. 02. 2014.

Программа спектрального анализа промышленных электромагнитных полей для проведения геофизических изысканий: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015617490 Рос. Федерация / Дягилев Р.А., Колесников В.П., Ласкина Т.А., Артемьев Д.А.; 13. 07. 2015.

Программа обработки и интерпретации результатов вертикального электрического зондирования ЗОНД: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611865 Рос. Федерация / Колесников В.П., Кутин В.А., Мокроносов С.В., правообладатель Колесников В.П.; 11.01.2005.

Тереженко Е.Д., Любич В.А., Миличенко А.Н., Пильгаев С.В. Использование электромагнитных волн экстремально низкочастотного диапазона для аварийной связи в шахтах // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 36-42.

Хачай О.А., Хачай О.Ю., Кононов А.В. 3-D методика электромагнитного индукционного просвечивания и система обработки и интерпретации для изучения состояния водозащитной толщи кимберлитовых трубок // Горный информационно-аналитический бюллетень / МГГУ, 2009. №12. С.230-236.

Электроразведка: Справочник геофизика: в 2 кн. / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. 438 с.

Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1981. 512 с.

Kai C., Sheng J. and Wang S. Electromagnetic receiver with capacitive electrodes and triaxial induction coil for tunnel exploration //

Earth, Planets and Space. 2017. Vol. 69. P. 123. DOI 10.1186/s40623-017-0706-3.

Pan J., Li Zh., Huang X. The forward research on three-component information of surface-

tunnel NMR method // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2016. P. 592-596. doi.org/10.4133/SAGEEP.29-096.

Development and Application of the Surface-Mine Low-Frequency Sounding Technique

V.P. Kolesnikov, T.A. Laskina

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

E-mail: info@psu.ru

The results of development and implementation of surface-mine low-frequency sounding including the justification of informative capabilities, analysis of investigation depth, technology of field measurements, hardware-software package, peculiarities of the data processing and interpretation are considered.

Key words: *surface-mine sounding, electromagnetic field, technology, depth of investigation, informative capabilities.*

References

- Apparaturno-programmnyy kompleks dlya geoelektrozvedki* [The hardware-software complex for the electrical prospecting]: Pat. 148256 RF: MPK7: G01V3/02. Kolesnikov V.P., Dyagilev R.A., Kolesnikov S.V.; 28.10.2014.
- Kolesnikov V.P.* 2013. Elektrometriya. Osnovy teorii peremennykh elektromagnitnykh poley [Electrometry. Fundamentals of alternative electromagnetic field theory]. PSU, Perm, p. 185. (in Russian)
- Kolesnikov V.P., Laskina T.A.* 2014. Elektro-zvedka v usloviyakh urbanizirovannykh territoriy [Electric surveys in conditions of urban territories]. Geofizika. 5: 33-40. (in Russian)
- Petrovskiy A.D.* 2001. Radiovolnovye metody v podzemnoy geofizike [Radio-frequency methods in underground geophysics]. CNI-TRI, Moskva, p. 290. (in Russian)
- Programma dlya registratsii promyshlennykh elektromagnitnykh poley dlya provedeniya geofizicheskikh izyskaniy* [The program of recording the industrial electromagnetic fields for geophysical investigation]: svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM № 2014611489 Ros. Federatsiya. Kolesnikov V.P., Dyagilev R.A. 11.01.2005.
- Programma spectralnogo analiza promyshlennykh elektromagnitnykh poley dlya provedeniya geofizicheskikh izyskaniy* [The program of spectral analysis of industrial electromagnetic fields for geophysical investigation]: svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM № 2015617490 Ros. Federatsiya. Dyagilev R.A., Kolesnikov V.P., Laskina T.A., Artemyev D.A. 13.07.2015.
- Programma obrabotki i interpretatsii rezultatov vertikalnogo elektricheskogo zondirovaniya ZOND* [Program Zond for the processing and interpretation of vertical electrical sounding data]: svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM № 2004611865 Ros. Federatsiya. Kolesnikov V.P., Kutin V.A., Mokronosov S.V. 11.01.2005.
- Tereshchenko E.D., Lyubchich V.A., Milichenko A.N., Pilgaev S.V.* 2013. Ispolzovanie elektromagnitnykh voln ekstremalno nizkochastotnogo diapazona dlya avariynoy svyazi v shakhtakh [Application of extremely low frequency electromagnetic waves for the emergency communication in mines]. Vestnik Kolskogo nauchnogo centra RAN, 1: 36-42 (in Russian)
- Hachay O.A., Hachay O.Y., Kononov A.V.* 2009. 3-D metodika elektromagnitnogo induktsionnogo prosvechivaniya i sistema obrabotki i interpretatsii dlya izucheniya sostoyaniya vodozashchitnoy tolshchi kimberlitovykh trubok [3-D method of electromagnetic inductive transillumination and system for processing and interpretation used for kimberlite pipes study] Gornyy Informatsionno-analiticheskiy bulletin. 12: 230-236. (in Russian)

- Elektrorazvedka: Spravochnik geofizika [Electric Exploration: Geophysical reference book]. Eds. V.K. Khmelevskogo, V.M. Bondarenko. 1989. Nedra, Moskva, p. 438. (in Russian)
- Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. 1981. Spravochnik po fizike [Handbook on Physics]. Nauka, Moskva, p. 512. (in Russian)
- Kai C., Sheng J. and Wang S. 2017. Electromagnetic receiver with capacitive electrodes and triaxial induction coil for tunnel exploration. *Earth, Planets and Space*. 69:123. doi: 10.1186/s40623-017-0706-3.
- Pan J., Li Zh., Huang X. 2016. The forward research on three-component information of surface-tunnel NMR method. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 592-596. doi: 10.4133/SAGEEP.29-096.