

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКОЙ AMN+NMA

ФЕДОРОВА О. И.

Рассматривается новая методика электрозондирований с применением комбинированной установки AMN+NMA, $B \rightarrow \infty$. Выполнены физическое моделирование зондирований над горизонтально расположенным параллелепипедом и математическое моделирование над шаром с использованием известной установки AMNB по методу вертикальных электрических зондирований и с применением новой установки. Моделирование показало, что предложенная методика зондирований имеет преимущества перед широко применяемым методом вертикальных электрических зондирований, а именно: в геоэлектрическом разрезе более четко оконтуриваются локальные неоднородности и особенно их нижние границы, краевые эффекты от неоднородности менее выражены. Приводятся результаты экспериментальных работ по изучению грунтовой плотины на крупном отстойнике Свердловской области. Комбинированным методом AMN+NMA фиксируются локальные проводящие неоднородности, по которым возможны утечки воды из отстойника. Экспериментальные исследования подтверждают перспективность новой методики зондирований в изучении неоднородных сред.

Ключевые слова: электрические зондирования; установка; геоэлектрическая неоднородность; электрическое сопротивление; краевые эффекты.

В геофизической практике электрические зондирования на постоянном токе выполняют с применением различных установок. Чаще всего для изучения верхней части геологического разреза применяется метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) с использованием симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже или Венера, что позволяет для горизонтально-слоистых сред определять мощность и удельное сопротивление слоев.

Верхняя часть разреза наиболее подвержена интенсивным геологическим процессам, приводящим к нарушению слоистого залегания горных пород и образованию геологических неоднородностей. Неоднородности будут влиять на результаты электрозондирований. В некоторых случаях они являются геологическими «помехами». Приповерхностные неоднородности трансформируют кривую зондирования и вносят неверное представление о более глубинном строении среды. На малых глубинах могут возникать трудности при определении размеров геологических объектов из-за появления краевых эффектов от самих искоемых объектов. Краевые эффекты также будут искажать общую структуру геоэлектрического разреза.

Многими исследователями проводился анализ влияния неоднородностей на результаты электрозондирований по методу ВЭЗ (А. Г. Яковлев, 1989; В. К. Хмельневской, В. А. Шевнин, 1994; I. N. Modin et al., 1994). В работе А. А. Бобачева и др. (1995) делаются выводы, что искажения на кривых зондирования зависят от типа элемента установки – подвижного (питающего) или неподвижного (приемного), проходящего над неоднородностью, – и от точки записи измеренного значения разности потенциалов.

Развитие методов электрических зондирований на постоянном токе идет в двух направлениях: совершенствование подходов интерпретации и разработка

новых методик измерений. Для вертикальных электрических зондирований существуют программы 1D и 2D-инверсия полученных данных, которые сужают рамки эквивалентности решения обратной задачи. Тем не менее в сложных средах добиться однозначности решения невозможно. Также предлагаются новые технологии измерений, например такие, как методы томографии электросопротивления среды (Х. Шима), где чаще используют двухэлектродную установку АМ или дипольную осевую. В МГУ разработан метод сплошных электрических зондирований (СЭЗ), у которого много общего с томографией. По методике СЭЗ измерения проводят с использованием двухсторонней трехэлектродной установки $AMN+MNB$, $C \rightarrow \infty$. Отличительной особенностью СЭЗ является выделение анализа искажений от неоднородностей в отдельный этап с последующей 1D- и 2D-интерпретацией (А. А. Бобачев, М. Н. Марченко, И. Н. Модин, 1995). Точку записи в используемых установках относят к середине разноса. При такой методике зондирований между питающими и приемными электродами могут находиться геологические неоднородности, влияющие на электрическое поле в точке измерений и образующие краевые эффекты на разрезе кажущихся сопротивлений.

Для уменьшения искажающего влияния неоднородностей был предложен новый способ электрических зондирований с комбинированной установкой Гуммеля $AMN+NMA$, $B \rightarrow \infty$ (А. Ф. Шестаков, О. И. Федорова, 2016).

Моделирование электрозондирований с установкой $AMN+NMA$. В трехэлектродной установке Гуммеля AMN один питающий электрод A и два приемных M и N находятся на одной линии, второй питающий электрод B отнесен в бесконечность, причем электроды A и N находятся на равном расстоянии от центрального электрода M . Отметим, что установка Гуммеля применялась только для профилирования. Предлагается выполнять двойные измерения комбинированным способом $AMN+NMA$, $B \rightarrow \infty$. Крайние электроды при втором измерении меняются местами, т. е. питающий электрод A подключается к клемме N приемника, а приемный N соответственно к клемме A генератора тока. Зондирование осуществляется за счет перемещения крайних электродов на одинаковое расстояние от электрода M . Полученные данные обрабатываются путем расчета среднего кажущегося сопротивления $\rho_k^{cp} = (\rho_k^{AMN} + \rho_k^{NMA})/2$ на каждом разнесе, значения относятся к центральному электроду M .

Таким образом, при комбинированных измерениях $AMN+NMA$ подсвечивается среда и измеряется разность потенциалов с двух сторон относительно центрального электрода, что значительно отличается от измерений электрического поля другими методиками. Сравним результаты электрозондирований с применением трехэлектродной установки $AMN+NMA$ и симметричной установки $AMNB$ (ВЭЗ) над локальными объектами, полученные математическим и физическим моделированием (О. И. Федорова, 2016).

Математическое моделирование электрозондирований провели над проводящим шаром $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ (ρ_2 – сопротивление шара) радиуса b , помещенным в однородное полупространство. Разрезы кажущегося сопротивления ρ_k/ρ_1 построены для зондирований с установкой $AMN+NMA$ от полуразноса $r/b = AM/b$, а по методике ВЭЗ – от $r/b = AB/2b$.

Верхняя кромка шара выделяется обеими установками. Слева и справа от шара в обоих случаях наблюдаются краевые эффекты сравнительно небольшой интенсивности (рис. 1, а, в). На разрезе ρ_k/ρ_1 при зондировании с применением установки $AMN+NMA$ изолинии сопротивлений концентрируются внутри шара, они замкнуты, и ниже шара сопротивление близко к значению сопротивления

вещающей среды (рис. 1, в). На разрезе ВЭЗ (рис. 1, а) изолинии не замкнуты и вытянуты вниз, создавая ложный аномальный эффект.

Результаты физического моделирования над параллелепипедом из нержавеющей стали (2 × 6 × 8 см), помещенным в бак с водой, схожи с теоретическими расчетами над шаром. При использовании метода вертикальных электрических зондирований краевые эффекты возникают в районе боковых сторон параллелепипеда в виде вытянутых аномалий повышенного сопротивления (рис. 1, б). Над самим объектом аномальная зона пониженного сопротивления также распространяется в глубь разреза. При использовании установки *AMN+NMA* аномалия находится в разрезе непосредственно на месте изучаемого объекта, имеются боковые эффекты меньшей интенсивности, чем при применении *AMNB* (рис. 1, з).

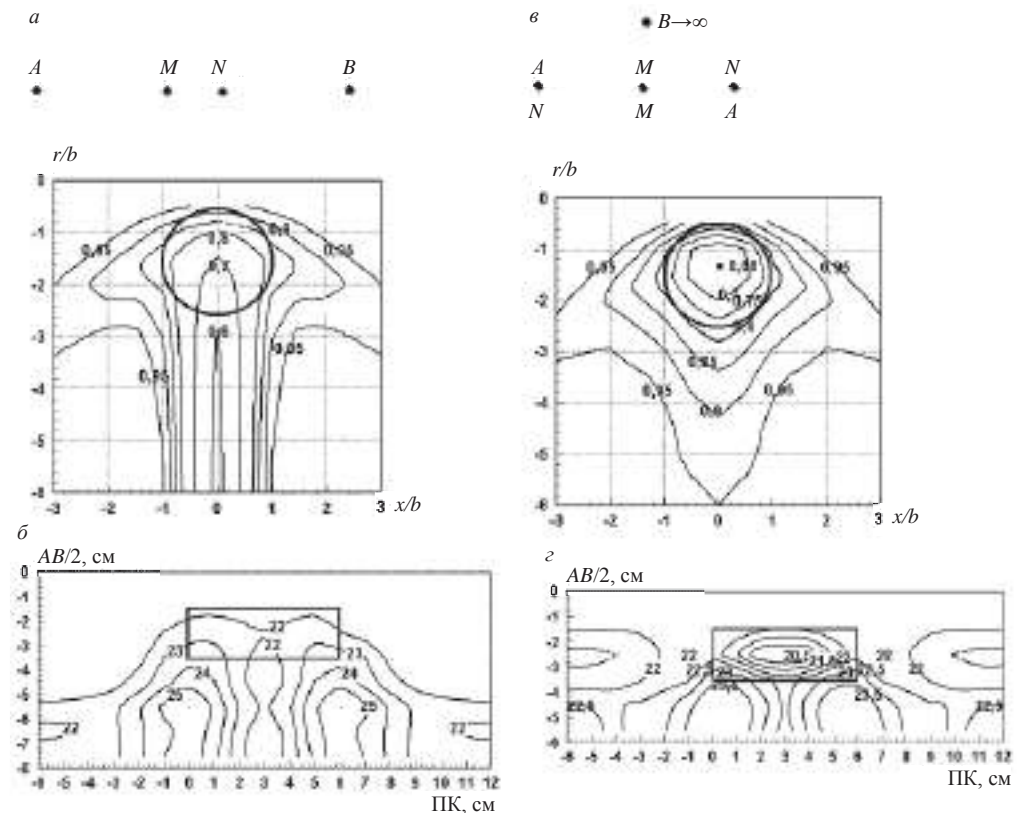


Рис. 1. Разрезы кажущихся сопротивлений ρ_k/ρ_1 над проводящим шаром и параллелепипедом: а, б – установка *AMNB*; в, з – установка *AMN+NMA*

В методе ВЭЗ при прохождении одного из питающих заземлений через параллелепипед возникают краевые эффекты над его боковыми гранями, которые создают аномалию, противоположную по сопротивлению самой неоднородности. Максимум аномалии наблюдается, когда приемные заземления *MN* находятся непосредственно над боковыми гранями. В методе *AMN+NMA*, за счет того что разносится не только питающее заземление *A*, но и приемное *N*, а потом они меняются местами, во-первых, увеличивается расстояние между приемными заземлениями *M* и *N*, во-вторых, полученные значения ρ_k осредняются, что приводит к уменьшению интенсивности краевых эффектов.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные работы были проведены на искусственном грунтовом объекте – плотине, ограждающей

накопитель химических отходов. Плотина имеет протяженность 650 м, высоту 10–13 м и сложена песчано-глинистым материалом. Целью работы являлось изучение состояния насыпного грунтового материала и выявление мест утечек из водохранилища. Выполнены комбинированные зондирования установкой $AMN+NMA$, $B \rightarrow \infty$ с максимальным полуразносом 28 м и вертикальные электрические зондирования установкой $AMNB$ (ВЭЗ), максимальный $AB/2 = 50$ м. Пункты зондирования размещались через 20 м. Измерения проводили электрозведочной аппаратурой ЭРА-ЗНАК.

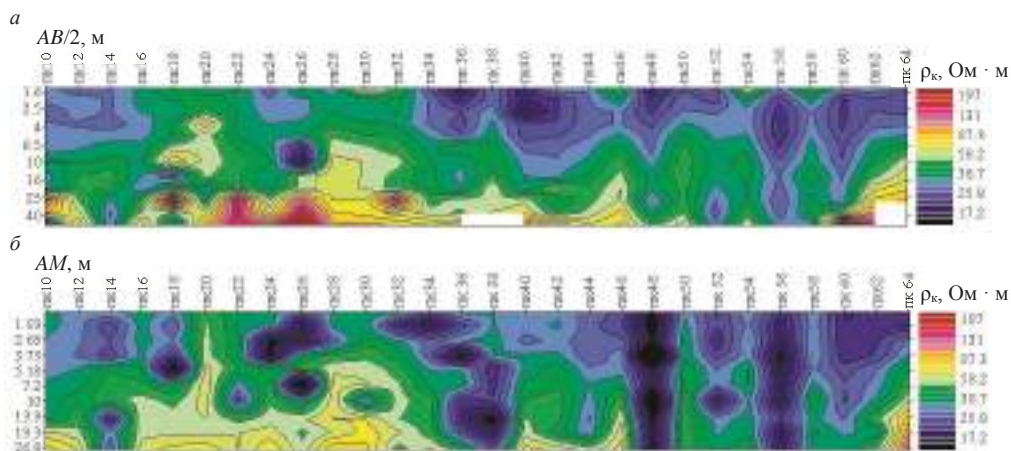


Рис. 2. Результаты электрических зондирований установками $AMNB$ – а и $AMN+NMA$ – б

Профиль проходил по верхнему бьефу плотины, который отсыпан глинисто-щебенистым материалом с большим содержанием крупного щебня, в связи с чем возникали трудности с заземлениями. Однако поскольку приемная линия MN (NM) по методу $AMN+NMA$ увеличивается одновременно с разносом AM (MA), то измеряемый сигнал достаточно хорошо фиксируется без большого влияния помех. В методе ВЭЗ не всегда удавалось избежать влияния помех, что отражалось на качестве измерений. Разрез кажущихся сопротивлений построен от половины расстояния между крайними электродами $AN/2 = AM$. Значения вычисленных электросопротивлений относятся к центру установки, электроду M ($AMN+NMA$). Разрез ρ_k по методу ВЭЗ строился от полуразноса $AB/2$.

На разрезах ρ_k верхняя часть плотины имеет пониженные сопротивления за счет проникновения атмосферных осадков в местах разуплотнения грунта (рис. 2, а, б). В западной и центральной частях плотины при зондировании методом $AMN+NMA$ довольно четко выделяются электропроводные локальные аномалии как на малых разносах, так и на разносах 7–10–15 м в районе подошвы плотины (рис. 2, б). На обоих разрезах наблюдаются вытянутые вглубь низкоомные аномалии (пикеты 48, 52, 56, 60), которые по методу $AMN+NMA$ имеют минимальные значения кажущихся сопротивлений 10–17 Ом · м, что указывает на сильную обводненность грунта.

Результаты электрозондирований показали неоднородное состояние насыпного материала. В западной части полотна плотины комбинированным методом $AMN+NMA$ фиксируются локальные проводящие неоднородности, по которым возможны утечки воды из отстойника. Наиболее обводнена восточная часть плотины. Электропроводные зоны здесь вытянуты от поверхности полотна до основания, имеют низкие сопротивления, что говорит о высокой проницаемости грунтового материала в аномальных зонах.

Таким образом, предложен способ электрических зондирований комбинированной установкой $AMN+NMA$, $B \rightarrow \infty$. Согласно физическому и математическому моделированию, данная методика зондирований имеет преимущества перед широко применяемым методом ВЭЗ, использующим симметричную установку $AMNB$: более четкое оконтуривание геоэлектрической неоднородности и особенно ее нижней границы; краевые эффекты от неоднородности менее выражены. Экспериментальные исследования подтверждают перспективность новой методики зондирований в изучении неоднородных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобачев А. А., Марченко М. Н., Модин И. Н., Перваго Е. В., Урусова А. В., Шевнин В. А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. № 12. С. 79–90.
2. Федорова О. И. Моделирование электроразведки с установками $AMNB$ и комбинированной трехэлектродной установкой $AMN+NMA$ над локальными неоднородностями // Уральский геофизический вестник. 2016. № 2. С. 81–85.
3. Хмелевской В. К., Шевнин В. А. Электроразведка методом сопротивлений. М.: МГУ, 1994. 160 с.
4. Яковлев А. Г. Влияние геоэлектрических неоднородностей на результат электромагнитных зондирований: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1989.
5. Способ геоэлектроразведки: пат. 2581768 Рос. Федерация. заявл. 25.11.2014; опубл. 20.04.2016. Бюл. № 11. 5 с.
6. Modin I. N., Pervago E. V., Shevnin V. A., et al. Distortions of VES data, caused by subsurface inhomogeneities: report, presented at EAEG 56th Annual Meeting. Austria, Vienna, June 6–10, 1994. 129 p.
7. Shima H. The effects on reconstructed images surrounding resistivity structures in resistivity tomography: report, presented at 59th Annual Int. SEG Meeting. Dallas, 1989.

Поступила в редакцию 5 июня 2017 года

ELECTRICAL SOUNDINGS WITH COMBINED THREE-ELECTRODE PLANTING $AMN+NMA$

Fedorova O. I. – Institute of Geophysics, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: fougeo@mail.ru

The new technique of electrical sounding with combined planting $AMN+NMA$, $B \rightarrow \infty$ is considered. Sounding physical modeling is fulfilled by the example of the model of horizontal parallelepiped and mathematical modeling by the example of the model of a ball with the use of a known planting $AMNB$ according to the method of vertical electrical sounding and the use of the new planting. Modeling has shown that the suggested methods of sounding have some advantages as compared to the widely used method of vertical electrical sounding, namely: in geoelectric section local inhomogeneities are delineated more clearly, especially their lower borders, whereas side effects from the inhomogeneity are less noticeable. The results of a natural experiment on the study of ground dam at a large settler for waste water in Sverdlovsk region are introduced. With the combined method $AMN+NMA$ local inhomogeneities are fixed, along which leakage of water from the settler for waste water are possible. Natural experiments confirm the prospectivity of new methods of sounding in the study of inhomogeneous environment.

Key words: electrical sounding; planting; geoelectric inhomogeneity; electrical resistance; side effects.

REFERENCES

1. Bobachev A. A., Marchenko M. N., Modin I. N., Pervago E. V., Urusova A. V., Shevnin V. A. [New approaches to electrical sounding of the horizontally inhomogeneous media]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 1995, no. 12, pp. 79–90. (In Russ.)
2. Fedorova O. I. [Modeling of electrical soundings with plantings $AMNB$ and combined three-electrode planting $AMN+NMA$ above local inhomogeneities]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik – Ural Geophysical Herald*, 2016, no. 2, pp. 81–85. (In Russ.)
3. Khmelevskoi V. K., Shevnin V. A. *Elektrozvedka metodom soprotivlenii* [Electroprospecting by a method of resistance]. Moscow, MSU Publ., 1994. 160 p.
4. Iakovlev A. G. *Vliianie geoelektricheskikh neodnorodnostei na rezul'tat elektromagnitnykh zondirovaniy. Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Effects of geoelectric inhomogeneities on the result of electromagnetic soundings. Cand. phys.-math. sci. abstract of diss.]. Moscow, MSU Publ., 1989.
5. Shestakov A. F., Fedorova O. I. *Sposob geoelektrozvedki* [Technique of geoelectroprospecting]. Patent RF, no. 2581768, 2014.
6. Modin I. N., Pervago E. V., Shevnin V. A., and others. Distortions of VES data, caused by subsurface inhomogeneities. Report, presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, June 6–10, 1994, pp. 129.
7. Shima H. The effects on reconstructed images surrounding resistivity structures in resistivity tomography. Report, presented at 59th Annual Int. SEG Meeting, Dallas. 1989.