

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МОДИФИКАЦИИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

POSSIBILITY OF USING THE TECHNIQUE OF THE NON-CONTACT MEASUREMENTS OF THE ELECTRIC FIELD IN THE MODIFICATION OF SOUNDING THROUGH ENGINEERING GEOLOGICAL SURVEY



*P. V. Груздев, Забайкальский государственный университет, г. Чита
rogruzdev@mail.ru*

R. Gruzdev, Transbaikal State University, Chita

Отмечено, что гальванические измерения низкочастотного электрического поля имеют принципиальные ограничения при работах в условиях невозможности или неэффективности организации заземлений, поэтому единственным способом решения подобных проблем являются технологии бесконтактных измерений электрического поля (БИЭП). Физические основы метода заключаются в том, что тангенциальные составляющие напряженности электромагнитного поля по обе стороны границы раздела «земля – воздух» равны. Показано, что, измеряя горизонтальные компоненты электрического поля над поверхностью земли, можно определить те же компоненты электрического поля в земле у ее поверхности. Приведены результаты опытно-методических работ, проведенных сотрудниками геологоразведочной организации ООО «Восток-геология» методом бесконтактных измерений электрического поля на дренажной системе водохранилища в период низких температур, снежного покрова и отсутствия гальванического заземления. Геофизические работы методом БИЭП в Забайкалье выполнялись впервые. Предпосылки выполнения электроразведочных работ данным методом обоснованы поставленной геологической задачей и наличием соответствующей электроразведочной аппаратуры. В основу полевых наблюдений методом БИЭП положены исследования Б. Г. Сапожникова с аппаратным комплексом ERA-MAX. По результатам полевых наблюдений в специализированных программах построены геоэлектрические разрезы и проведена интерпретация. В ходе интерпретации результаты, полученные методом БИЭП, сопоставлены с инженерно-геологическими данными по итогу буровых работ. Построен инженерно-геофизический разрез по профилю наблюдений. На основании полученных результатов выполнено описание инженерно-геологической ситуации, действующей на объекте исследований. Подведены итоги и обоснована актуальность выполненных исследовательских работ

Ключевые слова: электроразведка; бесконтактные измерения; стелющая линия; активные электроды; водоносный горизонт; водупорный горизонт; геоэлектрический разрез; аппаратура ERA-MAX; многолетне-мерзлые породы; сезонная мерзлота

It is noted that galvanic measurements of a low-frequency electric field have fundamental limitations when working in conditions of impossibility or ineffectiveness of grounding, therefore, the only way to solve such problems is the technology of contactless measurement of the electric field (BIEP). A principal physics of a method is that tangential components of strength of an electromagnetic field on both sides of a demarcation of “surface – to-air” are equal. Respectively, measuring horizontal components of an electric field over the Earth’s surface, the author thereby defines the same components of an electric field in the earth at its surface. The results of the experienced and methodical works which are carried out by the author and other staff of the prospecting organization LLC “Vostokgeologiya” by method of non-contact measurements of an electric field on the drainage system of a res-

ervoir in the period of low temperatures, snow cover and lack of galvanic grounding are given in this article. The geophysical works as a method of non-contact measurements of an electric field in Transbaikalia were performed for the first time. Prerequisites of realization of electroprospecting works as a method of non-contact measurements of an electric field are proved by the set geological tasks and existence of the corresponding electroprospecting equipment. The basis for field observations of the method of non-contact measurements of an electric field is B.G. Sapozhnikov researches with the instrument ERA-MAX complex. By results of field observations in specialized programs geoelectric cuts are constructed and interpretation is carried out. During interpretation the results of a method of non-contact measurements of an electric field are compared with engineering-geological data on the result of drilling operations. Thereof the engineering and geophysical section on a profile of observations is constructed. On the basis of the received results the description of the engineering-geological situation operating on an object of researches is executed. By the results of works the conclusions are made and the relevance of the performed research works is proved

Key words: *measurements electric field; non-contact measurements; creeping line; active electrodes; water-bearing horizon; waterproof horizon; geoelectric section; equipment ERA-MAX; permafrost; seasonal frozen ground*

Введение. В зимний период проведение традиционных методов электроразведки, основанных на измерении низкочастотного электрического поля, с помощью гальванических заземлений затрудняет сезонное промерзание почвенно-растительного слоя, грунтов и наличие снежного покрова. В подобных сложных климатических условиях измерение электрического поля возможно посредством использования методики бесконтактных измерений (БИЭП), что позволяет проводить исследования в отсутствие гальванического заземления, при этом существенно упрощает и ускоряет процесс измерения по сравнению со стандартными вариантами метода сопротивлений [1; 4].

Опытные работы методом БИЭП в модификации зондирования на дренажной системе водохранилища выполнены автором и другими специалистами геологоразведочной организации «Востокгеология». Идея применения метода БИЭП появилась в то время, когда зимой в короткий срок потребовалось выполнить геофизические исследования методом электроразведки на предмет дренирования основания дамбы водохранилища.

Основной задачей инженерно-геофизических работ являлось выделение границ распространения многолетнемерзлых пород, выявление, оконтуривание и прослеживание направления зон разгрузки водоносных горизонтов.

Физические основы метода БИЭП. Электростатическое поле в воздухе (изолинии потенциала и линии напряженности поля) является зеркальным отражением электрического поля постоянного тока в земле (рис. 1). Тогда горизонтальная составляющая электрического поля в центральной части линии «АВ» одинаково медленно уменьшается при перемещении точки наблюдения в обе стороны от поверхности раздела земля — воздух. Это означает, что высотная зависимость для этой составляющей поля чрезвычайно мала. Данной зависимостью можно пренебречь, когда наблюдения проводятся на высотах 1...5 % от длины линии «АВ». Вертикальная составляющая электрического поля в воздухе в центральной части линии «АВ» много меньше горизонтальной составляющей. Таким образом, при измерении электрического поля в воздухе вблизи границы раздела земля — воздух очевидной физической предпосылкой предложенного усовершенствования является известное равенство тангенциальных составляющих электрического поля по обе стороны граничной поверхности [6—8].

Это позволяет заменить контактные измерения электрического поля (с применением заземленных электродов) бесконтактными измерениями с использованием приемных электродов-антенн. Последние либо вообще не имеют гальванического контакта с землей, либо этот контакт очень плохой.

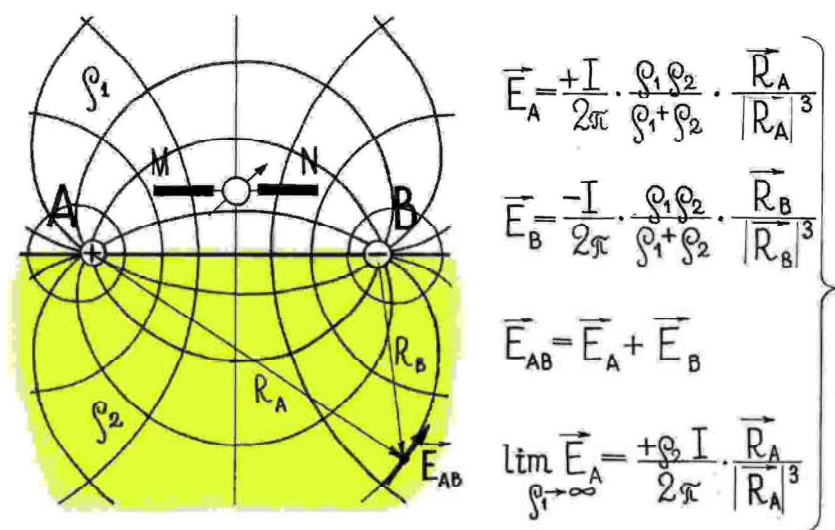


Рис 1. Электрическое поле в земле и воздухе по Б. Г. Сапожникову /
Fig. 1. Electric field in the earth and air according to B. G. Sapozhnikov

Таким образом, физические основы метода заключаются в том, что тангенциальные составляющие напряженности электромагнитного поля по обе стороны границы раздела «земля – воздух» равны. Соответственно, измеряя горизонтальные компоненты электрического поля над поверхностью земли, можно определить те же компоненты электрического поля в земле у ее поверхности [7; 8].

Методика наблюдений и аппаратура БИЭП. В основу методики наблюдений БИЭП положены исследования Б. Г. Сапожникова с аппаратным комплексом ERA-MAX, который позволяет комбинировать контактные и бесконтактные методы измерений, а также использовать в качестве измерительных электродов не только стелющиеся линии, но и металлические точечные активные электроды. Активные электроды образуют измерительный канал с большим значением модуля входного импеданса (входная емкость (макс.) 0,05 пФ; входное активное сопротивление (мин.) 100 ГОм) и симметричным (дифференциальным) входом для измерения входного напряжения на выбранной рабочей частоте.

Методика наблюдений БИЭП в модификации зондирования основана на возбуждении и измерении в изучаемых сре-

дах низкочастотного электрического поля с помощью незаземленной питающей линии АВ и бесконтактных приемных «активных электродов» MN вблизи земной поверхности [6].

Наблюдения БИЭП в модификации зондирования выполнены на двух профилях комплектом электроразведочной аппаратуры «ERA-MAX» в составе *генератор и измеритель с активными электродами*.

Перед началом полевых работ измеритель ERA-MAX совместно откалиброван с генератором на рабочей частоте 625 Гц. Измеритель обладает высокими значениями входного сопротивления (не менее 100 МОм) и входной емкостью (не более 15 пФ), что позволяет измерять слабый уровень сигнала (более 0,5 мкВ) в условиях плохих заземлений. Наличие активных электродов позволяет проводить измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в бесконтактном варианте.

Активные электроды соединены коаксиальным кабелем и подключаются через специальный разъем на панели измерителя. Результатом измерения считается разность потенциалов ΔU на приемных электродах MN.

Выполнено два профиля наблюдений. Первый размечен параллельно в 250 м от

основания дамбы. Расстояние между профилями составляет 50 м, точки наблюдения (пикеты) разбиты по профилю через 25 м. Климатические условия на момент проведения работ сложные, так как средняя температура за день составляла $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, мощность промерзшего слоя порядка 1,5...2,0 м, а снежный покров – около 5...10 см.

Незаземленная стелющаяся питающая линия собрана из двух отрезков гибкого кабеля с изолированными концами в рези-

новой оболочке – РПШ-2×0,35 (сопротивление изоляции не менее 10 МОм). Линия растягивалась вдоль по профилю наблюдений (рис. 2). Первый отрезок провода длиной 20 м подключается к разъему «В» генератора, второй отрезок длиной 2 м центром помещен на пикет наблюдения и подключается к разъему «А» генератора. Стеkanie тока с незаземленного электрода происходило благодаря «емкостной утечке», равномерно распределенной по его длине.

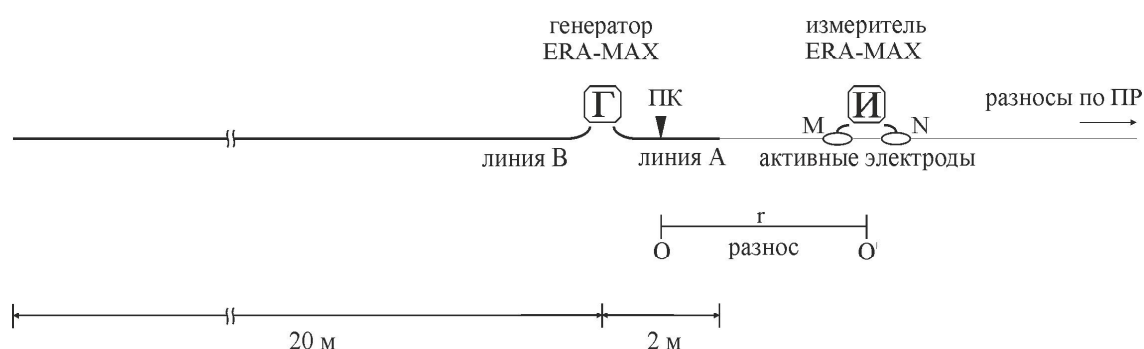


Рис. 2. Монтажная схема установки БИЭП в модификации зондирования с активными электродами / Fig. 2. Assembly diagram of non-contact measurement installation of an electric field in modification of intubation with the fissile electrodes

Измерения разности потенциалов выполнялись по профилю наблюдений с увеличением расстояния от пикета, что представлено в таблице.

**Номера разносов и расстановка приемных электродов на профиле, м /
Numbers of a rating and arrangement of receiving electrodes on a profile, m**

Номер разноса / Number of rating	OO' или r – длина разноса / OO' or r – length of rating	MN – длина приемной линии / MN – length of intake line
1	3,50	1,00
2	4,50	1,00
3	5,50	1,00
4	6,50	1,00
5	7,50	1,00
6	8,50	1,00
7	9,50	1,00
8	10,50	1,00
9	11,50	1,00
10	12,50	1,00
11	13,50	1,00
12	14,50	1,00
13	15,50	1,00
14	17,50	4,00
15	19,50	4,00
16	21,50	4,00

Окончание таблицы

Номер разноса / Number of rating	OO' или r – длина разноса / OO' or r – length of rating	MN – длина приемной линии / MN – length of intake line
17	23,50	4,00
18	25,50	4,00
19	27,50	4,00
20	29,50	4,00
21	31,00	4,00
22	33,00	4,00
23	35,00	4,00
24	37,00	4,00
25	39,00	4,00

Таким образом, разнос установки (длина OO') определялся расстоянием между электрическими центрами питающей линии «А» и приемной линии «MN». Середина линии «MN» являлась электрическим центром приемной линии, к которому относились результаты наблюдений при их графическом изображении.

Глубинность исследования увеличивалась за счет удаления приемной линии от пикета наблюдений. Кажущееся сопротивление вычислялось по стандартной формуле для метода сопротивлений [11]

$$\rho_k = \frac{K\Delta U}{I},$$

где K – коэффициент установки, м;
 ΔU – разность потенциалов MN, мВ;
 I – ток в линии АВ, мА.

Коэффициент установки K определяется по формуле из справочника по электроразведке для установок БИЭП [11]

$$K = \frac{2\pi L_A \bar{L}_M}{\left[\bar{a}_1 \frac{\bar{L}_B + 1}{\bar{L}_B} \ln \frac{\bar{b}_1}{\bar{a}_1} + (\bar{a}_1 - 1) \ln \frac{\bar{a}_1 - 1}{\bar{b}_1 - 1} + \frac{\bar{a}_1 + \bar{L}_B}{\bar{L}_B} \ln \frac{\bar{a}_1 + \bar{L}_B}{\bar{b}_1 + \bar{L}_B} \right]},$$

где $\bar{a}_1 = (\bar{r} - 0,75\bar{L}_M) + 0,5$;
 $\bar{b}_1 = (\bar{r} + 0,25\bar{L}_M) + 0,5$.

Черта сверху обозначает нормировку на L_A .

Объем контрольных измерений составил 5,10 % от общего количества точек наблюдения. Относительная погрешность измерений – 4,51 %, что для метода БИЭП считается удовлетворительным. Чтобы пе-

рейти к близким «истинным» значениям кажущихся удельных электрических сопротивлений, необходимо подбирать коэффициент установки эмпирическим путем, сопоставляя с результатами наблюдений, полученными гальваническими методами [5; 9].

Результаты наблюдений методом БИЭП. Обработка результатов наблюдений методом БИЭП выполнена в программах X2IP1 и Res2Dinv [2; 10]. В программе X2IP1 проведена фильтрация и сглаживание первичных данных. Для отображения рельефа местности точкам наблюдения присвоена высотная отметка, затем данные экспортированы в формат программы Res2Dinv. Далее в программе Res2Dinv выполнена автоматическая двумерная инверсия данных, в результате которой получен разрез удельного электрического сопротивления по профилю наблюдений. На рис. 3 представлен геоэлектрический разрез по первому профилю наблюдений.

Для сопоставления результатов обработки БИЭП с инженерно-геологической обстановкой на объекте исследования приведен инженерно-геологический разрез по профилю наблюдений (рис. 4), условные обозначения к рис. 4, 5 приведены на рис. 6. На разрезе (рис. 4) по данным бурения выделены контур водоносных грунтов, граница сезонной мерзлоты и многолетне-мерзлых грунтов.

По результатам интерпретации метода БИЭП построен геолого-геофизический разрез (рис. 5).

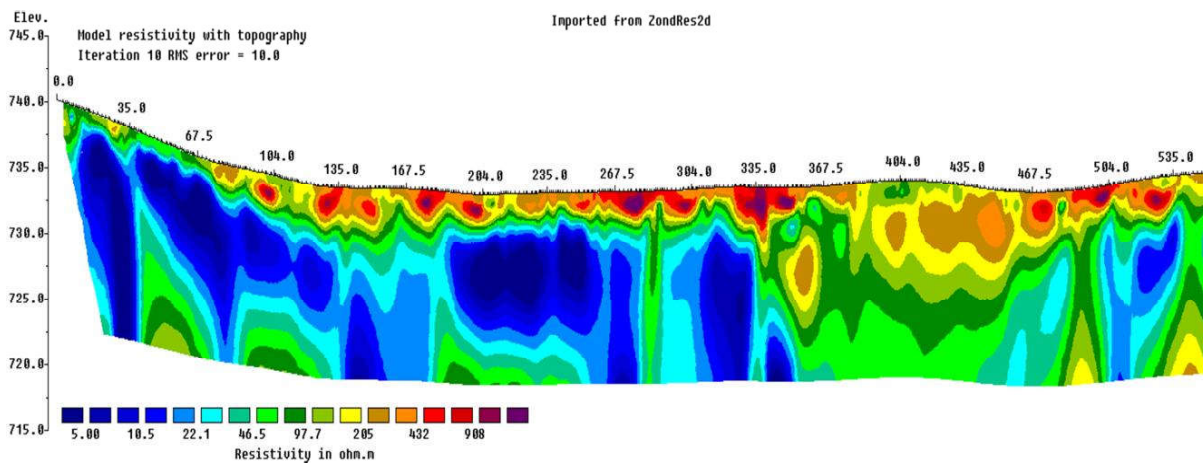


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по результатам БИЭП / Fig. 3. Geoelectric section based on the results of non-contact measurement of electric field

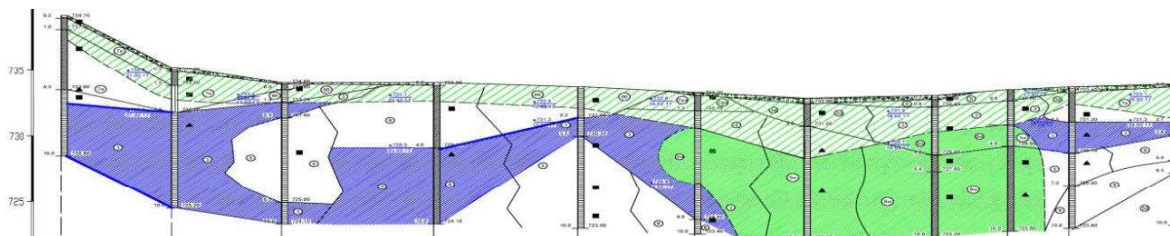


Рис. 4. Инженерно-геологический разрез / Fig. 4. Engineering-geological section

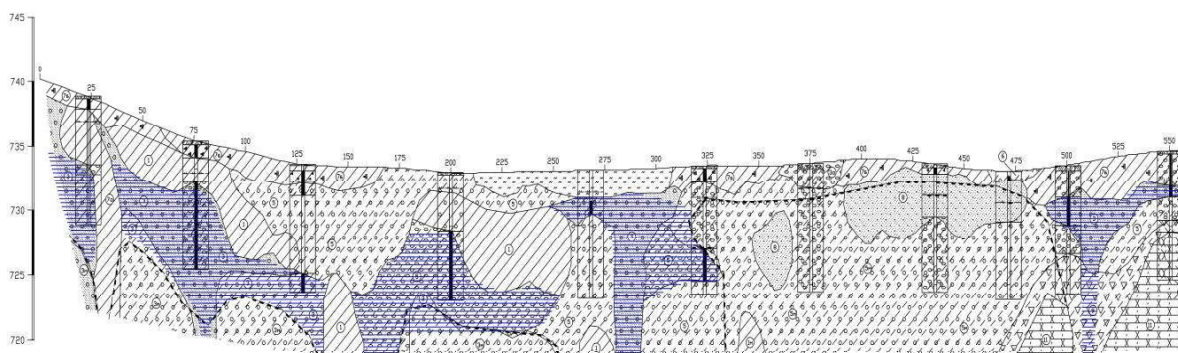


Рис. 5. Инженерно-геофизический разрез по результатам интерпретации БИЭП / Fig. 5. Engineering and geophysical section based on the results of interpretation of non-contact measurement of electric field

Геоминдекс	Геолого-литологич. колонка	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРУНТОВ
aQ	①	Суглинок с щебнем, гравием, гравелистый коричневого цвета, полутвердый, твердый
aQ	③	Гравийный грунт с песчаным, твердый, пластичный, текучим супесчаным заполнителем
aQ	⑤	Супесь гравелистая, коричневого цвета, твердая
aQ	⑥	Супесь галечниковая, коричневого цвета, пластичная, текучая
aQ	⑥Б	Ил суглинистый, супесчаный
aQ	⑦а	Суглинок коричневого цвета, с гравием, тугопластичный, мягкопластичный
aQ	⑦Б	Суглинок легкий, пылеватый, коричневого цвета, текучий, текучепластичный, с примесью органики
aQ	⑧	Песок гравелистый
eQ	⑨	Щебенистый грунт, в т.ч. с супесчаным заполнителем
Многолетнемерзлые грунты		
aQ	③м	Гравийный грунт с твердым, пластичным, текучим супесчаным заполнителем, многолетнемерзлый
aQ	⑤м	Супесь гравелистая, коричневого цвета, твердая, многолетнемерзлая
aQ	⑥м	Супесь галечниковая, коричневого цвета, пластичная, многолетнемерзлая
aQ	⑦ам	Суглинок легкий, пылеватый, серо-коричневого цвета, мягкопластичный
aQ	⑧м	Песок гравелистый, многолетнемерзлый
Скальные грунты		
J	⑪	Скальный грунт – алевролиты трещиноватые от слабopочных до прочных

 <p>Водоносные грунты</p>  <p>Многолетнемерзлые грунты</p>	 <p>Сезонномерзлые грунты</p>  <p>Граница многолетнемерзлых грунтов</p>
--	---

Рис. 6. Условные обозначения к рис. 4, 5 / Fig. 6. Legends to fig. 4, 5

По результатам интерпретации метода БИЭП на инженерно-геофизическом разрезе выявлено следующее. В верхней части на глубине 1,5...2,0 м повышенными значениями удельных сопротивлений выделяется граница сезонной мерзлоты. В интервале 335...475 м сезонная мерзлота объединена с границей многолетнемерзлых грунтов, что подтверждается повышенными значениями сопротивления до глубины

15 м. Самыми низкими значениями удельных сопротивлений отмечены суглинки, они ограничивают снизу или сверху водоносный пласт, являясь водупором. Водоносные грунты представлены гравийным, галечниковым, песчаным и другим заполнителем, удельные сопротивления, которых немного больше, чем у суглинков, но на порядок меньше относительно мерзлых грунтов. Граница водоносных грунтов не

всегда четко отображается в поле удельных сопротивлений, чаще пониженными значениями сопротивлений выделяется обобщенный контур, соответствующий водоносным грунтам и границам водоупоров.

Выводы. В целом методика БИЭП дала положительный результат. Несмотря на то, что в Забайкальском крае для решения подобных задач метод применялся впервые, по результатам камеральной обработки и интерпретации удалось разделить разновидности грунтов по удельному электрическому сопротивлению, выделить зоны пространства многолетнемерзлых пород,

сезонной мерзлоты и определить границы водоупоров, что подчеркивает успешное проведение геофизических работ. Для Забайкалья подобные работы имеют высокую значимость, так как в большинстве районов в период с ноября по апрель, в связи с промерзанием почвенно-растительного слоя, практически невозможно устройство гальванических заземлений. Таким образом, методика БИЭП в модификации зондирования положительно зарекомендовала себя при инженерно-геологических изысканиях в условиях отсутствия гальванического заземления.

Список литературы

1. Бобачев А. А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // Разведка и охрана недр. 2002. № 10. С. 36–40.
2. Бобачев А. А. Руководство к программе X2IPI. М., 2005. 14 с.
3. Бобачев А. А., Горбунов А. А., Модин И. Н., Шевнин В. А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.
4. Груздев А. И., Науменко Д. А., Богданов П. С., Бобачев А. А., Шевнин В. А. Бесконтактное измерение электрического поля с помощью ohmtrapper в условиях Крайнего Севера // Георазрез. 2013. № 1. С. 1–23.
5. Груздев А. И. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // Инженерные изыскания. 2014. № 10. С. 32–37.
6. Сапожников Б. Г. Опыт наблюдений составляющих электрического поля в воздухе при электропрофилировании на переменном токе. Л., 1978. 24 с.
7. Сапожников Б. Г. Рекомендации по методике полевых наблюдений и методике расчёта кажущегося удельного электрического сопротивления при электропрофилировании с установками срединного градиента и незаземлёнными рабочими линиями. Л., 1982. 65 с.
8. Сапожников Б. Г. Электропрофилирование с незаземлёнными рабочими линиями. Л.: Недра, 1985. 96 с.
9. Шевнин В. А., Бобачев А. А., Модин И. Н., Ялов Т. В. Различия результатов гальванических и индуктивных методов на примере ДИП и БИЭП // Междунар. науч.-практ. конф. Геленджик, 2012.
10. Шевнин В. А. Руководство к программе Res2Dinv. М., 2001. 56 с.
11. Якубовский Ю. В., Ляхов Л. П., Комаров В. А. Электроразведка. М.: Недра, 1988. 395 с.

References

1. Bobachev A. A. *Razvedka i ohrana neдр* (Exploration and protection of mineral resources), 2002, no. 10, pp. 36–40.
2. Bobachev A. A. *Rukovodstvo k programme X2IPI* (Guide to the program X2IPI). Moscow, 2005. 14 p.
3. Bobachev A. A., Gorbunov A. A., Modin I. N., Shevnin V. A. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki* (Electromotography by the method of resistances and induced polarization. Instruments and systems of exploration geophysics). 2006. P. 14–17.
4. Gruzdev A. I., Naumenko D. A., Bogdanov P. S., Bobachev A. A., Shevnin V. A. *Georazrez* (Geosection), 2013, no. 1, pp. 1–23.
5. Gruzdev A. I. *Inzhenernye izyskaniya* (Engineering Surveys), 2014, no. 10, pp. 32–37.
6. Sapozhnikov B. G. *Opyt nablyudeniy sostavlyayushchih elektricheskogo polya v vozduhe pri elektroprofilirovaniy na peremennom toke* (Experience of observing the components of the electric field in air during electroprofiling with alternating current). Leningrad, 1978. 24 p.
7. Sapozhnikov B. G. *Rekomendatsii po metodike polevyh nablyudeniy i metodike raschyota kazhushchegosya udelnogo elektricheskogo soprotivleniya pri elektroprofilirovaniy s ustanovkami sereinnogo*

gradienta i nezazemlyonnymi rabochimi liniyami (Recommendations on the method of field observations and methods for calculating the apparent resistivity in electrical profiling with the facilities of the middle gradient and ungrounded working lines). Leningrad, 1982. 65 p.

8. Sapozhnikov B. G. *Elektroprofilirovanie s nezazemlennymi rabochimi liniyami* (Electroprofiling with ungrounded working lines). Leningrad: Nedra, 1985. 96 with.

9. Shevnin V. A., Bobachev A. A., Modin I. N., Yalov T. V. *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Intern. scientific-practical. conf.). Gelendzhik, 2012.

10. Shevnin V. A. *Rukovodstvo k programme Res2Dinv* (A guide to the program Res2Dinv). Moscow, 2001. 56 p.

11. Yakubovsky Yu. V., Lyakhov L. P., Komarov V. A. *Elektrozvedka* (Electrical Exploration). Moscow: Nedra, 1988. 395 p.

Коротко об авторе

Briefly about the author

Груздев Роман Викторович, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: инженерная геофизика, электротомография
rogruzdev@mail.ru

Roman Gruzdev, postgraduate, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: engineering geophysics, electro tomography

Образец цитирования

Груздев Р. В. Возможность применения методики бесконтактных измерений электрического поля в модификации зондирования при инженерно-геологических изысканиях // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 5. С. 4–12. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-4-12.

Gruzdev R. Possibility of using the technique of the non-contact measurement of the electric field in the modification of sounding through engineering geological survey // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 5, pp. 4–12. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-4-12.

Статья поступила в редакцию: 10.04.2018 г.
Статья принята к публикации: 28.04.2018 г.

