

ГРУЗДЕВ А.И.

Аспирант кафедры геофизики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, agru@inbox.ru

GRUZDEV A.I.

Postgraduate student of the geophysics department of the geology faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, agru@inbox.ru

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS OF CONTACT AND NON-CONTACT MEASUREMENTS IN THE MIDLAND OF RUSSIA

Ключевые слова: бесконтактные измерения, емкостный контакт, электропрофилерование, электротомография, аппаратный комплекс OhmMapper; аппаратный комплекс Syscal Pro; аппаратный комплекс ERA MAX.

Аннотация: проведение геофизических работ нередко осложняется климатическими условиями. Например, в центральной части России зимой верхний слой земли промерзает, появляется значительный снежный покров. Применение в таких случаях стандартных методик с гальваническим заземлением является очень трудоемким. Поэтому были разработаны бесконтактные емкостные методы измерений, которые позволяют работать без осуществления гальванических контактов. При правильной методике работ результаты контактных и бесконтактных измерений оказываются практически идентичными. В данной работе рассматривается пример бесконтактных измерений с использованием двух современных аппаратных комплексов (высокочастотной и низкочастотной модификаций) и исследований методом электротомографии на одном из объектов Калужской области в зимнее время. Проводится сравнение полученных результатов.

Введение

Существенным практическим ограничением для производства работ методами сопротивлений на постоянном токе в традиционных вариантах исследований является необходимость организации гальванических заземлений. Иногда это оказывается технически трудно осуществимым, неэффективным экономически или совсем невыполнимым (при наличии многолетнемерзлых,

скальных пород, асфальтовых, бетонных, щебенистых покрытий и др.).

Выходом из ситуации в рамках приближения постоянного тока является использование «нетрадиционных» (бесконтактных) вариантов исследования, при которых вместо гальванического контакта применяют емкостный контакт (все или некоторые электроды заменяются стелющимися линиями, антеннами и т.д.).

В настоящее время на геофизическом рынке представлено несколько аппаратных комплексов для бесконтактных измерений, реализующих различные подходы к измерениям.

Можно выделить два основных подхода к проведению бесконтактных измерений электрического поля — высокочастотный [13, 14] и низкочастотный [6, 8, 9, 16, 17]. Из промышленно выпускаемой в настоящее время аппара-

Key words: non-intrusive measurements; capacitive coupling; electric profiling; resistivity imaging; OhmMapper hardware system; Syscal Pro hardware system; ERA MAX hardware system.

Abstract: geophysical surveys are often complicated by climatic conditions. For example, in the central regions of Russia in winter the top layer of the ground freezes and is covered with a lot of snow. In such conditions realization of the standard methods using galvanic earthing is very labor-consuming. So, non-intrusive measurement methods such as capacitive resistivity (CR) techniques were developed. They permit to work without galvanic contacts. When the used technique is right, the results of contact and non-contact measurements (conventional and CR measurements) are practically identical. This article describes an example of using the CR technique with two modern CR hardware systems (high-frequency and low-frequency modifications) and the electrical resistivity imaging method in winter conditions in the Kaluga Region. The obtained results are compare



туры первый подход реализован в комплексе OhmMapper (производства канадской компании Geometrics, <http://www.geometrics.com/>), а второй — в комплексе ERA MAX (производства российской компании «НПП ЭРА», <http://www.era-max.com/>).

Задачей настоящего исследования является сравнение (качественное и количественное) результатов практических исследований с использованием указанных бесконтактных аппаратурных комплексов в средней полосе России (в Калужской области) в зимнее время, а также их сравнение с результатами исследований традиционными методами, в которых используется гальваническое заземление.

Особенности применения бесконтактных емкостных методов измерений

Бесконтактные емкостные методы измерений характеризуются рядом преимуществ и недостатков. Их границы и особенности зависят от многих факторов — различных аспектов методики, строения среды. Для успешного использования этих технологий на практике необходимо понимать условия успешного применения разных методик и аппаратурных комплексов, что является одной из целей настоящей статьи.

К преимуществам бесконтактных технологий в сравнении с гальваническими методами относятся:

- более высокая производительность (скорость перемещения по профилю больше, для выполнения работ требуется меньше людей);
- возможность выполнения работ при отсутствии условий для заземления электродов;
- простота совместной количественной интерпретации получаемых данных с результатами использования гальванических методов.

Основными недостатками бесконтактных методов являются:

- сравнительно недавнее начало развития теории бесконтактных измерений и связанные с этим неточности в описании условий, для которых подходит применение данных методов;
- наличие помех, связанных с взаимным расположением генераторного и измерительного диполей [2];
- зависимость результатов измерений от положения диполей относительно поверхности земли [2];
- сильное пространственное осреднение верхней части разреза за счет длинных стелющихся линий;



Рис. 1. Профиль исследований в деревне Александровка Калужской области (показан красной линией, белые цифры указывают на расстояние вдоль профиля, м)

- неравномерность стекания тока и принимаемого сигнала вдоль незаземленной стелющейся линии.

Методы исследований

Для решения поставленных задач на полигоне МГУ в деревне Александровка Калужской области [4] в январе 2013 года на одном и том же профиле длиной 550 м (рис. 1) были проведены исследования с использованием трех аппаратурных комплексов (OhmMapper, ERA MAX, Syscal Pro).

Александровское плато, на котором проводились измерения, примерно до глубины 20 м сложено ледниковыми отложениями — моренными суглинками (преимущественно в нижней части разреза) и флювиогляциальными песчаными отложениями (в верхней части разреза). Последние обладают высокими электрическими сопротивлениями, что благоприятствует их изучению бесконтактными методами (разрезы с низкими сопротивлениями изначально не подходят для изучения бесконтактными емкостными методами, к тому же при вы-

сокоомном верхнем слое стандартные гальванические методы имеют проблемы с заземлением в отличие от бесконтактных методов).

Строение Александровского плато за годы студенческих практик хорошо изучено разнообразными геофизическими методами [5, 7]. На нем было пробурено более 25 геологических скважин. Профиль исследования является одним из основных опорных профилей, геологическое строение которого изучено наиболее детально.

Температура воздуха во время измерений была минус 15 °С, толщина снежного покрова составляла 20÷60 см.

Высокочастотное электропрофилеирование

Метод высокочастотного электропрофилеирования (ВЧЭП) разрабатывался с начала 1970-х годов В.М. Тимофеевым [10, 11], который использовал частоту поля от 8 до 32 кГц. На основе разработанных им принципов фирмой Geometrics была создана аппаратура *OhmMapper* [15], которая функционально состоит



Рис. 2. Проведение измерений с помощью аппаратуры OhmMapper

из генератора, многоканального измерителя, датчиков и проводов (рис. 2, 3). Частота сигнала составляет 15,5 кГц.

Параметры измерений указаны в таблице. Частота записи составляла 0,3 Гц (настраиваемая частота при непрерывном режиме измерений), что соответствует шагу по профилю 2,5 м.

Так как одной из задач исследования являлось сравнение результатов бесконтактных измерений с результатами использования электротомографической аппаратуры Syscal Pro, измерения установкой OhmMapper проводились на 6 разносах $OO'/2$: 5,00; 6,25; 7,50; 8,75; 10,00; 11,25 м. Измерения проводились в двухканальном варианте, что обеспечивало получение данных для двух разносов (двухразное профилирование) при однократном проходе по профилю. Схема установки показана на рис. 3. Изменение разноса достигалось за счет увеличения длины веревки между измерителями и генератором.

Плановая привязка измерений осуществлялась автоматически с помощью GPS-приемника.

По работе с аппаратурой OhmMapper можно сделать следующие выводы. Ее положительными качествами являются:

- высокая производительность (3 прохода по профилю заняли 2–3 ч);
- малое количество задействованных сотрудников (необходим только один оператор, и еще одного человека целесообразно использовать в качестве ассистента);
- высокая степень автоматизации при записи результатов измерений и привязке.

Отрицательной стороной является низкая надежность пластиковых контактов-креплений. Даже при аккуратной работе и бережном отношении они ломаются (рис. 4). В рассматриваемом случае в начале исследований было 3 измерителя, но после второй поломки работы было решено приостановить. Это не позволило провести измерения с большим количеством разносов, как планировалось изначально.

Бесконтактное измерение электрического поля

Метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП), наиболее активно развивавшийся Б.Г. Сапожниковым, работает на более низких частотах — 625–1250 Гц. Для использования этого метода в ООО «НПП ЭРА» была разработана аппаратура ERA MAX [1]. Она дает возможность комбинировать контактные и бесконтактные методы измерений (например, обеспечивать галь-

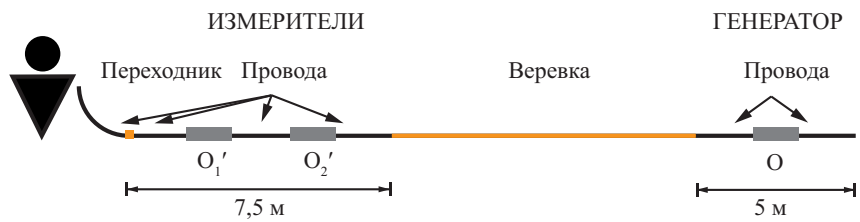


Рис. 3. Схема установки OhmMapper



Рис. 4. Измеритель OhmMapper после поломки

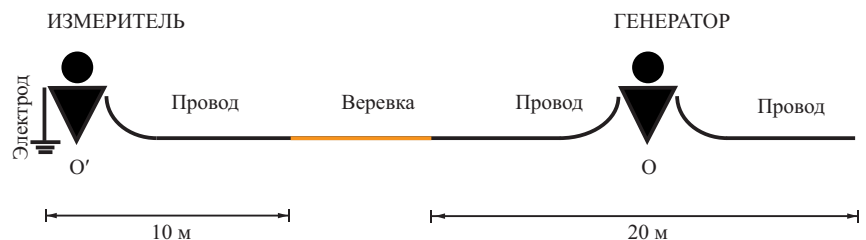


Рис. 5. Схема установки ERA MAX в варианте профилирования

ванические заземления для одного или обоих питающих электродов), а также использовать в качестве измерительных электродов не только стелющиеся линии, но и металлические точечные активные электроды [1]. Наличие активных электродов позволяет проводить измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в бесконтактном варианте.

При проведении описываемых исследований с помощью аппаратуры ERA MAX были осуществлены измерения в варианте профилирования (для сравнения с результатами измерений прибором OhmMapper) и в варианте зондирования (который позволил работать на малых разносах для сравнения с данными Syscal Pro).

Производительность аппаратуры ERA MAX в варианте профилирования (рис. 5) примерно равна таковой для OhmMapper. Конфигурация установки при профилировании: измерительный диполь — заземленный электрод и стелющаяся незаземленная линия длиной 10 м; генераторный диполь — 2 стеля-

щиеся незаземленные линии длиной по 10 м. Между диполями — веревка длиной 10 м. Разнос $OO'/2$ был равен 13,75 м. Полевые работы заняли около 2 ч, в процессе измерений были задействованы 3 человека. Шаг по профилю составил 10 м.

В варианте зондирования (рис. 6) применялась следующая конфигурация установки: измерительный диполь — 2 активных электрода; расстояние между электродами — 1 м для первых 10 разносов и 4 м для последних 5 разносов; генераторный диполь — 2 стелящиеся незаземленные линии длиной по 10 м. Разносы $OO'/2$ составляли: 6,75; 7,25; 7,75; 8,75; 9,75; 10,75; 11,75; 12,75; 13,75; 14,75; 15,5; 16,5; 17,5; 18,5; 19,5 м. Шаг по профилю был равен 30 м. Измерения с использованием этой установки заняли 4 ч, для их выполнения потребовалось 4 человека.

Параметры измерений указаны в таблице.

По работе с прибором ERA MAX можно сделать следующие выводы. Его отрицательными качествами являются:

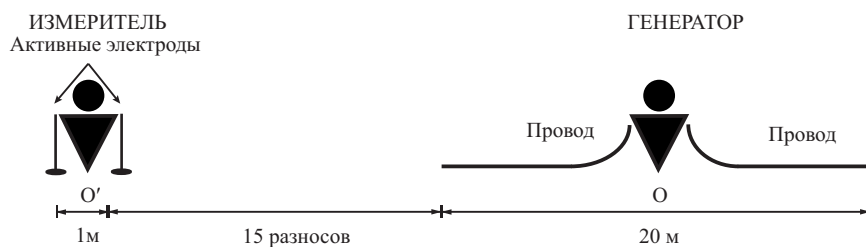


Рис. 6. Схема установки ERA MAX в варианте зондирования

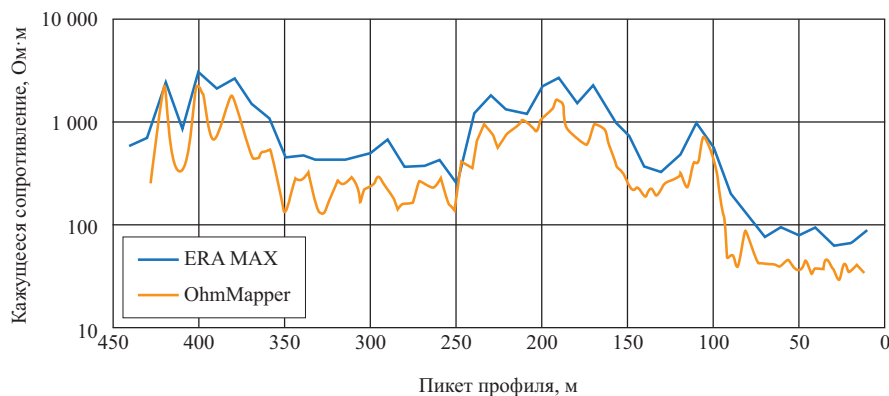


Рис. 7. Графики кажущегося сопротивления по результатам измерений с использованием аппаратуры OhmMapper (при разносе $OO'/2=11,25$ м) и ERA MAX в варианте профилирования (при разносе $OO'/2=13,75$ м)

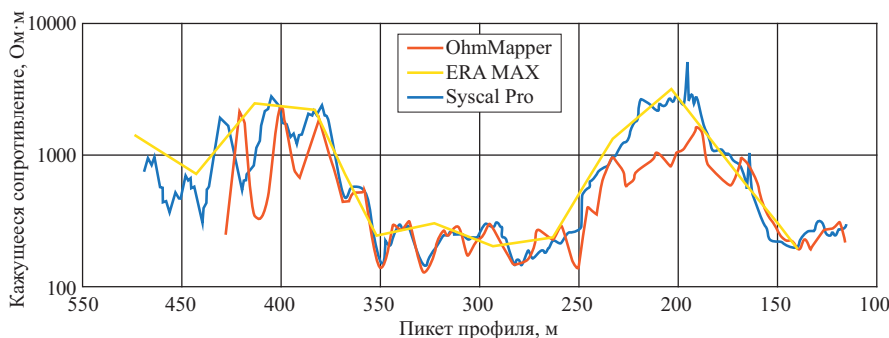


Рис. 8. Графики кажущегося сопротивления по результатам измерений с использованием аппаратуры OhmMapper (при разносе $OO'/2=11,25$ м), Syscal Pro (при разносе $OO'/2=11$ м) и ERA MAX в варианте зондирования (при разносе $OO'/2=11,25$ м)

- достаточно высокая производительность (но медленнее, чем у OhmMapper);
 - необходимость в наличии 4 человек для проведения работ;
 - отсутствие автоматизации привязки.
- Положительным моментом является то, что этот прибор предназначен для более широкого применения (соответственно, он в меньшей степени приспособлен для определенной конфигурации емкостного профилирования).

Электротомография

Работы по электротомографии производились с применением 10-канальной 72-электродной станции *Syscal Pro* (производства французской компании IRIS Instruments) [5]. Были использованы 10 расстановок с 50%-ным перекрытием и шаг между электродами, равный 1 м. Для корректного сравнения полученных результатов с данными измерений другими аппаратурными комплексами применялась дипольная установка. Общая длина профиля составила 395 м. Для проведения работ потребовалось 3 рабочих дня (около 18-20 ч) и 5-6 человек. Параметры выполненных измерений указаны в таблице.

Результаты исследований

Результаты исследований, полученные разными методами, целесообразно сравнивать в два этапа — по значениям кажущегося сопротивления на одинаковых или близких разносах и по геоэлектрическому разрезу, полученному в ходе автоматической инверсии данных (кроме данных профилирования).

На рисунке 7 представлены графики кажущегося сопротивления по данным исследований на близких разносах. Перед тем как сравнивать результаты про-

Таблица

Параметры установок при исследованиях различными методами и аппаратурой				
Параметр	Профилирование ERA MAX	ВЭЗ ERA MAX	Многоразное профилирование OhmMapper	Электротомография Syscal Pro
Разнос OO' мин., м	27,5	13,5	10,0	1,5
Разнос OO' макс., м	27,5	39,0	22,5	52,0
Число разносов	1	15	6	31
Шаг по профилю, м	10	30	2,5	1 (между электродами)
Частота сигнала, Гц	625	625	16600	4*
Сила тока в питающей линии, мА	0,5–1	0,5–2	0,125–0,5	2–20
Сигнал в питающей линии, мВ	0,02–5	0,03–5	0,01–2,5	0,1–20
Количество измерений	100	180	1200	20000
Время полевых измерений, ч	2–3	3–4	3–4	16–20

* Прибор использует форму сигнала «меандр», период колебания составляет 250 мс.

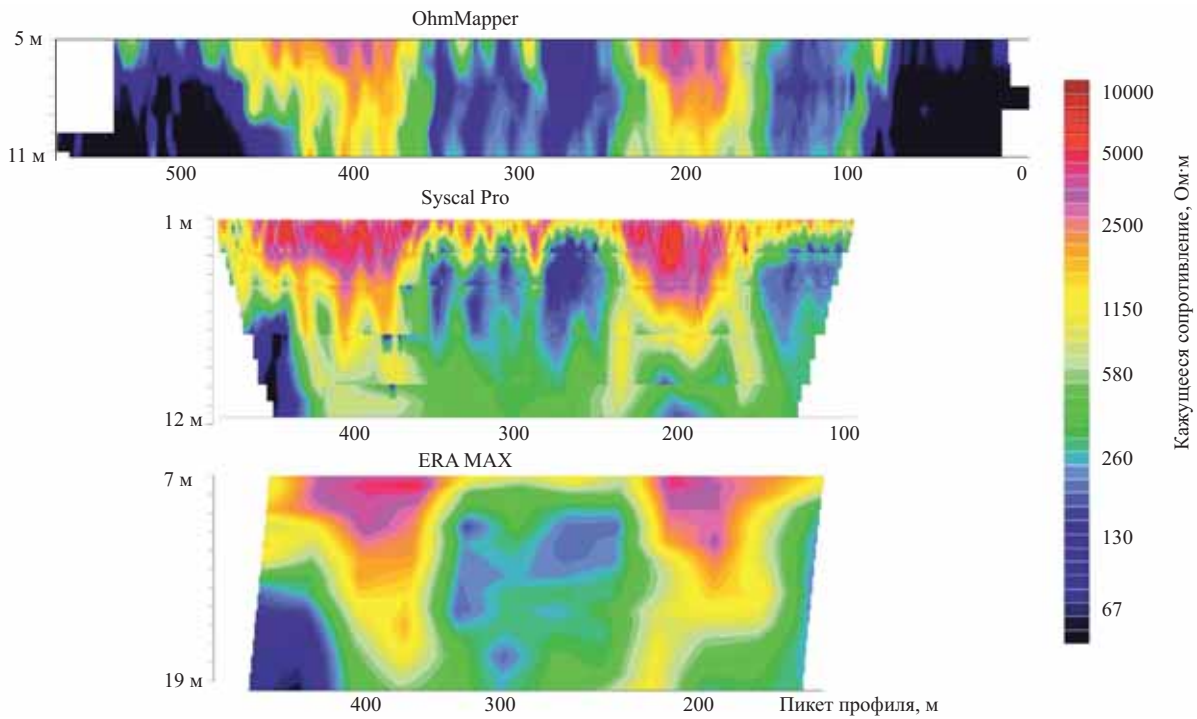


Рис. 9. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления по результатам измерений с использованием аппаратных комплексов OhmMapper, Syscal Pro и ERA MAX

филирования ERA MAX и OhmMapper, отметим, что не удалось добиться одинаковости разносов. С одной стороны, из-за поломки аппаратуры OhmMapper при ее использовании не были выполнены измерения для больших разносов. С другой стороны, меньшие разносы для ERA MAX могли быть получены только в случае замены стелющихся линий заземленными электродами, что не входило в планы работ и сильно уменьшало скорость измерений. Поэтому разносы $OO'/2$ для разных аппаратных комплексов различаются между собой на 2,5 м. Это объясняет различие уровней графиков кажущегося сопротивления (см. рис. 7). В остальном графики похожи друг на друга. График для ERA MAX является более гладким, так как шаг между измерениями в этом случае составлял 10 м (для OhmMapper он был 2,5 м).

На рисунке 8 представлены графики кажущегося сопротивления по результатам измерений тремя аппаратными комплексами. Графики для OhmMapper и Syscal Pro в основном совпадают друг с другом. Расхождение в западной части профиля (ПК 380-480) связано, скорее всего, с возрастанием ошибок привязки: здесь профиль проходил по границе леса, и ошибка привязки по GPS увеличилась. Различия в области ПК 200 объяснить не удалось. Первоначально их связывали с плохими заземлениями аппаратуры Syscal Pro в этом месте, но тогда непонятно, почему ERA MAX показывает идентичный результат.

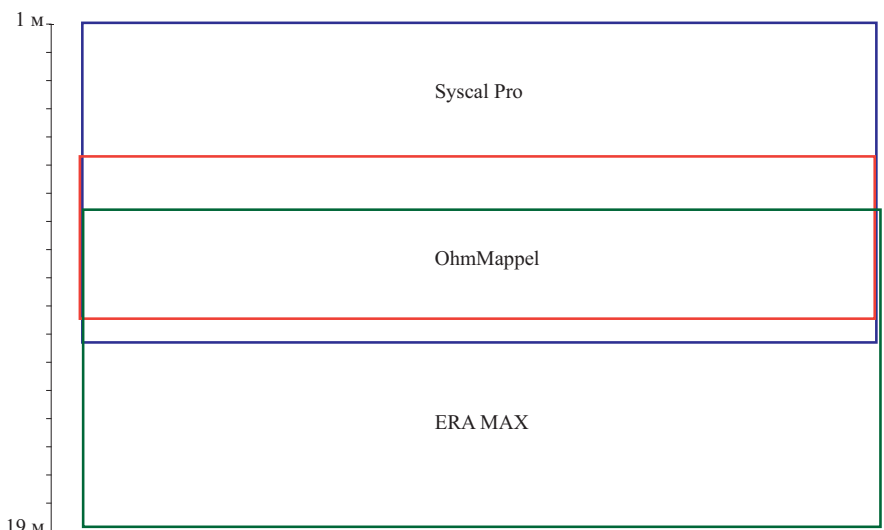


Рис. 10. Соотношение разносов для методов OhmMapper, Syscal Pro и ERA MAX

На рисунке 9 представлены псевдоразрезы кажущегося сопротивления по результатам измерений тремя аппаратными комплексами. Соотношения разносов для этих разрезов показаны на рис. 10.

Как видно из приведенных псевдоразрезов, полученные данные в целом хорошо совпадают. Различия связаны с их объемами. Поскольку объем данных при измерениях методом ERA MAX был самым маленьким, то и выглядят они хуже остальных. Итоги же использования методов OhmMapper и Syscal Pro практически не различаются между собой.

На рисунке 11 представлены результаты автоматической двумерной инверсии на основе всех трех групп измерений. Полученные геоэлектрические разрезы в целом похожи друг на друга. Геоэлектрические разрезы, полученные с помощью 2D-инверсии данных ВЭЗ [12], практически сопоставимы с результатами гальванических электротомографических измерений. Несколько хуже оказался разрез по данным OhmMapper, что, скорее всего, объясняется малым количеством использованных разносов. В целом же полученные результаты не противоречат друг другу и схожи между собой.

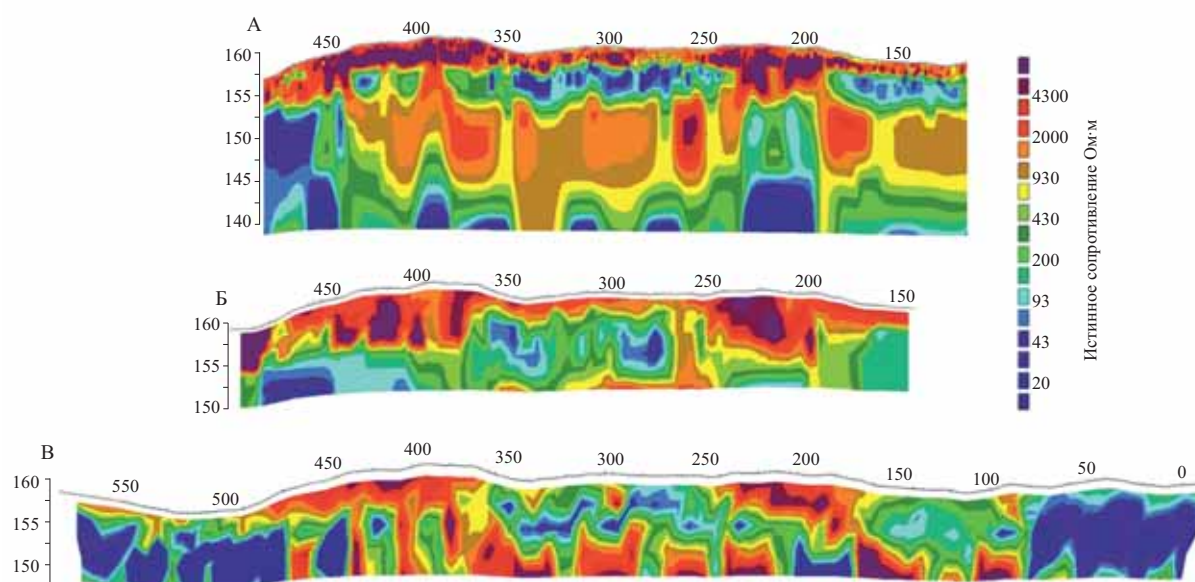


Рис. 11. Геоэлектрические разрезы по результатам автоматической двумерной инверсии данных: А — электротомографии, Б — зондирования аппаратурой ERA MAX, В — многоразностного зондирования аппаратурой OhmMapper. Вдоль линии дневной поверхности указано расстояние, м. Вертикальные оси — глубина, м

Заключение

Приведенные в статье результаты показывают, что при правильном использовании технологии бесконтактных измерений как высокочастотная, так и низкочастотная аппаратура позволяет полу-

чать данные, сопоставимые с данными традиционных измерений с гальваническим заземлением электродов. При этом сопоставимыми оказываются и результаты бесконтактных измерений на высоких и низких частотах.

Результаты полевых экспериментов показывают, что технология бесконтактных емкостных методов может эффективно работать для расчленения верхней части геологического разреза в зимних условиях в средней полосе России.

Список литературы

1. Аппаратура электроразведочная для методов сопротивления и естественного поля «ERA_MAX»: техническое описание и инструкция по эксплуатации, СПб.: ООО «НПП ЭРА», 2008.
2. Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // Разведка и охрана недр. 2002. № 10. С. 36-40.
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. Бобачев А.А., Ерохин С.А. Результаты многолетнего применения электротомографии на Александровском геофизическом полигоне в Калужской области // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 1. № 31. С. 10-15.
5. Ерохин С.А., Бобачев А.А. Практика применения станции Syscal Pro в северной Якутии // Тезисы Петербургского геофизического научно-практического семинара, г. Санкт-Петербург, 14-16 октября 2009 г.
6. Нахабцев А.С., Сапожников Б.Г., Яблучанский А.И. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра, 1985. 96 с.
7. Павлова А., Шевнин В. 3D-электротомография при исследованиях ледниковых отложений // Материалы 9-й Международной научно-практической конференции «Инженерная геофизика», г. Геленджик, Россия. Электронное издание EAGE, 2013. С. 1-7.
8. Сапожников Б.Г. Опыт наблюдений составляющих электрического поля в воздухе при электропрофилировании на переменном токе. Л.: НПО «Геофизика», 1978. С. 1-24.
9. Сапожников Б.Г. Рекомендации по методике полевых наблюдений и методике расчета кажущегося удельного электрического сопротивления при электропрофилировании с установками срединного градиента и незаземленными рабочими линиями. Л.: ВИРГ НПО «Рудгеофизика», 1982. С. 1-69.
10. Тимофеев В.М. Применение электропрофилирования с линейными емкостными антеннами для целей инженерно-геокриологической съемки: автореф. дис. ... канд. тех. наук, ВСЕГИНГЕО, 1979. 36 с.
11. Тимофеев В.М. Состояние и перспективы инженерно-геологического картирования и съемок // Тезисы Всесоюзного научно-технического семинара в п. Зеленый Московской обл. 11-12 октября 1983 г. Зеленый Московской обл.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1983. С. 108-109.
12. Шевнин В., Бобачев А. 2D инверсия данных, полученных по обычной 1D технологии ВЭЗ // Георазрез: электронный журнал. 2009. № 3. С. 1-13.
13. Cook J.C. An electrical crevasse detector // Geophysics. 1956. V. 21. P. 1055-1070.
14. Kuras O., Beamish D., Meldrum P.I., Ogilvy R.D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // Geophysics. 2006. V. 71. № 3. P. G135-G152.
15. OhmMapper TR1: operation manual. San Jose, Ca, USA: GEOMETRICS INC., 2001. 147 p. [fip://geom.geometrics.com/pub/GeoElectric/Manuals/OhmMapper-Manual-TRN-2004.PDF](http://geom.geometrics.com/pub/GeoElectric/Manuals/OhmMapper-Manual-TRN-2004.PDF).
16. Shima H., Texier B., Kobayashi T., Hasegawa N. Fast imaging of shallow resistivity structures using a multichannel capacitive electrode system // Expanded Abstracts of the 65-th Annual International Meeting of the SEG. 1995. P. 377-380.
17. Тимофеев В.М. Experience in the use of high frequency electrical geophysical methods in geotechnical and geocryological field studies // Proceedings of the 3-d International Conference on Permafrost. Ottawa, Canada: National Research Council of Canada, 1978. P. 238-247.
18. Тимофеев В.М. Some peculiarities of surface capacitive antennas used in electrical geophysical techniques / Gosstroj USSR Reference Information. 1978. Issue 8/73.