

УДК 550.837.3

А.И. Груздев¹, А.А. Бобачев², В.А. Шевнин³**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕТОДА СОПРОТИВЛЕНИЙ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Одна из модификаций метода сопротивлений — бесконтактная технология, которая позволяет проводить измерения без гальванического контакта электродов и грунта. К таким условиям можно отнести наличие промерзшего верхнего слоя, снежный покров, выходы скальных пород, а также наличие техногенных объектов (асфальтированные и бетонные дороги, ж/д насыпи и др.). Отсутствие заземлений используемых электродов существенно ускоряет процесс измерений и уменьшает число участников полевых измерений.

В то же время расчет прямой задачи для высокочастотного переменного поля электрического поля возможен только для самых простых геоэлектрических разрезов. Поэтому условия применения бесконтактной технологии недостаточно изучены. Авторы определили допустимые разносы и электрические свойства изучаемого разреза, позволяющие применять теорию постоянного тока для интерпретации бесконтактных зондирований.

Ключевые слова: метод сопротивлений, бесконтактное измерение электрического поля, OhmMapper, ERA MAX, бесконтактные аппаратные комплексы, электротомография, ВЕГА, БИКС.

Resistivity method is widely used in shallow surface geophysics. Capacitive resistivity is one of techniques which help to extend usage of resistivity method for environments where galvanic coupling of electrodes is difficult, for instance, frozen ground, hard rocks and engineered structures (roads, railways and others). This technique allows fast field work without galvanic coupling electrodes. The main problem is complicated calculation of forward resistivity for simple model. In results, the limitations to the usage of the technique are not clear in theoretical and practical aspects.

The authors determinate the limits of electrical properties and distances for capacity resistivity.

Key words: resistivity method, capacity resistivity, OhmMapper, resistivity imaging, ERT.

Введение. Электрическое сопротивление пород — важная характеристика, которая зависит от множества факторов (пористость, влажность, литология и др.). Метод сопротивлений, позволяющий определить электрическое сопротивление, используется для решения широкого спектра задач: инженерных, разведочных, структурных, археологических и многих других. Для выполнения столь разноплановых исследований часто требуются специальные модификации метода сопротивлений, наиболее подходящие для решения конкретной задачи. Одна из таких модификаций — бесконтактные измерения, разработанные в середине 1970-х гг. специально для исследований в северных районах и сейчас стремительно развивающиеся. С помощью этой модификации можно проводить исследования в отсутствие гальванического заземления, при этом

существенно упростив и ускорив процесс измерений (по сравнению со стандартными вариантами метода сопротивлений).

Типичные практические ситуации, при которых возникает необходимость применять бесконтактные методы, — исследования в зонах преобладания многолетнемерзлых или скальных грунтов, при наличии снежного покрова, непроводящего искусственного покрытия (асфальт, бетон) или сыпучих непроводящих грунтов (сухой песок).

Пока методы решения прямой задачи для бесконтактных вариаций метода сопротивлений исследованы недостаточно. Кроме того, современные аппаратно-методические комплексы часто обладают сильно различающимися характеристиками. Сочетание этих факторов приводит к существенному снижению эффективности использования бесконтактных измерений. Поэтому разработка

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических исследований земной коры; канд. техн. н.; аспирант; *e-mail*: workagru@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических исследований земной коры; канд. физ.-мат. н.; доцент; *e-mail*: bobachev@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических исследований земной коры; докт. физ.-мат. н.; профессор; *e-mail*: shevninvlad@yandex.ru

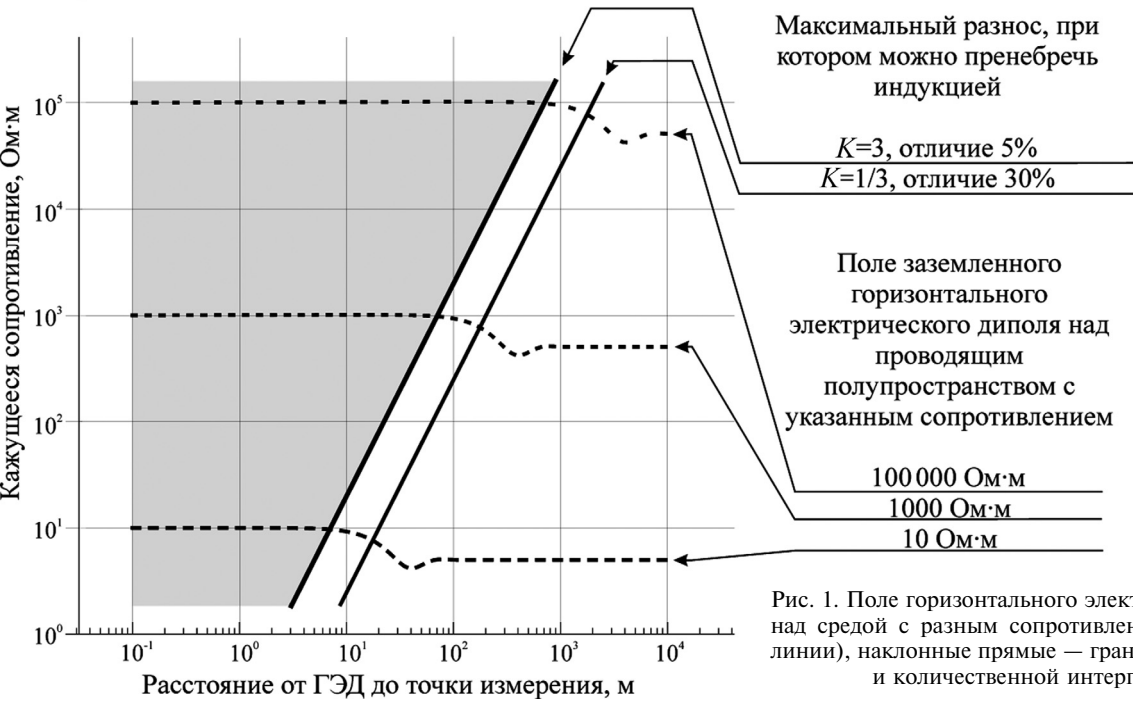


Рис. 1. Поле горизонтального электрического диполя над средой с разным сопротивлением (пунктирные линии), наклонные прямые — границы качественной и количественной интерпретации

методических рекомендаций применения бесконтактной технологии метода сопротивлений — актуальная задача.

Начало бесконтактным исследованиям в нашей стране было положено в 1970-х гг. Можно выделить две группы ученых, которые занимались этой задачей параллельно и практически независимо.

В работах В.М. Тимофеева [Тимофеев, 1977, 1979; Timofeev, 1973] описывается метод высокочастотного измерения электрического поля (ВЧЭП). Метод разработан специально для инженерно-геокриологических изысканий, поэтому в нем используются установки, состоящие только из незаземленных линий.

Параллельно, приблизительно в то же время, группой ученых разрабатывалась методика бесконтактных измерений кажущегося сопротивления (БИКС) [Сапожников, 1978, 1982; Нахабцев и

др., 1985]. Методика БИКС предполагает более широкое применение. В ней задействованы различные комбинации установок с заземленными и незаземленными электродами.

Развитие теории бесконтактной методики происходило и за границей. Так, можно выделить работу [Kuras et al., 2006], в которой исследуются возможности применения бесконтактной аппаратуры, чувствительной к изменению фазы.

Основные направления в развитии теории и аппаратных комплексов бесконтактной технологии приведены в таблице.

Теоретическое обоснование метода. Основная часть аппаратных комплексов, используемых для бесконтактных исследований, имеет рабочую частоту ~16 кГц (OhmMapper, БИКС, «ВЕГА», CRI system), при этом мы рассматриваем бесконтактные измерения как модификацию метода постоянного тока. Такой подход позволяет использовать хорошо разработанную теорию метода ВЭЗ и соответствующее программное обеспечение для работы с данными, полученными на высоких частотах. Чтобы такой подход был оправдан, необходимо определить область, в которой можно пренебречь влиянием индукции. Для этого было рассмотрено поле заземленного горизонтального электрического диполя (ГЭД) с частотой 16 кГц; штриховыми линиями на рис. 1 показаны графики кажущегося сопротивления для моделей полупространства с разным удельным сопротивлением. Можно выделить три зоны: зона, в которой не заметно влияние индукции (отмечена серым), переходная зона, где поле зависит от индукционной и кулоновской составляющих поля, и зона, где преобладает влияние индукции. Для расчета правой границы зоны, в которой индукционные

Основные направления развития бесконтактных измерений

Характеристики	Автор методики, название метода		
	В.М. Тимофеев, ВЧЭП	Б.Г. Сапожников, БИЭП	О. Kuras, CR
Год	1970-е	1970-е	1990-е
Частота	8–32 кГц	625–2500 Гц	16 кГц
Установка	только незаземленные линии	незаземленные линии, активные электроды, заземленные линии	пластины
Характерные разности	OO' 10–70 м	OO' 30–150 м	OO' 5–30 м
Пример аппаратных комплексов	OhmMapper, БИКС, «ВЕГА»	ERA MAX	CORIM, CRI system

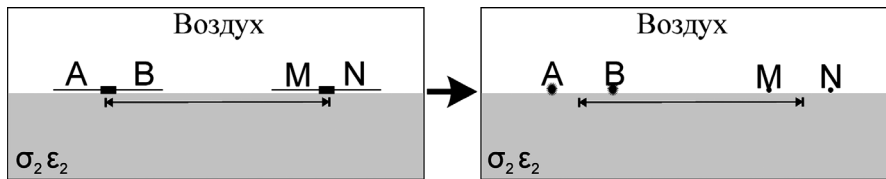


Рис. 2. Схема электроразведочной установки

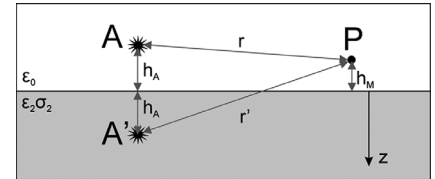


Рис. 3. Использование отраженного источника для расчета поля в верхнем полупространстве

эффекты не проявляются, можно использовать следующую формулу:

$$R_{\text{правой границы}} = (K\omega\mu_0 R^2)/2, \quad (1)$$

где R — разнос OO' , а K — коэффициент; $K=3$ для количественной интерпретации, $K=1/3$ для качественной интерпретации. Различие границ характеризуется величиной отклонения рассчитанной кривой от сопротивления однородного полупространства. Для границ качественной интерпретации нами принято отклонение, равное 30%, для границ количественной интерпретации — 5%. Максимальный разнос, для которого можно пренебречь индукцией, зависит от удельного сопротивления изучаемого района следующим образом:

$$r_{\text{максимальный разнос}} = \sqrt{\frac{2\rho}{K\omega\mu_0}}. \quad (2)$$

Это формула с точностью до коэффициента K совпадает с формулой, определяющей толщину скин-слоя.

Основные подходы к теоретическому обоснованию бесконтактной технологии. Напрямую из уравнений Максвелла может быть получено численное решение только для однородного полупространства, но, если пренебречь влиянием индукции (стационарный подход), можно анализировать более сложные модели.

Существует два подхода: через *квазистатическое приближение* (комплексная проводимость) [Бобачев, 2002; Сапожников, 1978, 1982; Нахабцев и др., 1985] и через *электростатическое приближение* (комплексная диэлектрическая проницаемость) [Тимофеев, 1977, 1979; Kuras et al., 2006; Timofeev, 1973], эти подходы численно идентичны. Далее рассматривается квазистатическое приближение, позволяющее учесть токи проводимости и токи смещения, в котором используется комплексная проводимость (σ_k):

$$\Sigma_k = \sigma - i\omega\epsilon. \quad (3)$$

Реальная часть комплексной проводимости — удельная проводимость для постоянного тока (σ), а мнимая часть — проводимость для токов смещения, которая зависит от частоты тока (ω) и диэлектрической проницаемости (ϵ).

Обычно при бесконтактных измерениях применяется дипольно-осевая установка с незаземленными линиями. Это установка удобна тем, что

индукционная наводка между проводами [Вешев, 1980] практически отсутствует. Для расчетов незаземленные линии можно заменить точечными электродами в верхнем непроводящем полупространстве (рис. 2). Для однородного полупространства поле для незаземленного электрода можно рассчитать методом отражений, аналогично задаче о вертикальном контакте (рис. 3).

Коэффициент отражения с учетом токов смещения равен

$$K_{12} = \frac{\sigma_{k1} - \sigma_{k2}}{\sigma_{k1} + \sigma_{k2}}, \quad (4)$$

где σ_{k1} и σ_{k2} — комплексная проводимость в верхнем (в воздухе) и в нижнем полупространстве соответственно.

Проводимость воздуха можно считать равной проводимости вакуума

$$\sigma_{k1} = -i\omega\epsilon_0,$$

где ω — круговая частота, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Потенциал незаземленного точечного электрода в вакууме ($V_0(P)$) будет равен

$$V_0(P) = \frac{-I}{4\pi\sigma_{k1}} \frac{1}{r} = \frac{-I}{4\pi i\omega\epsilon_0} \frac{1}{r},$$

где r — расстояние от точки P до незаземленного источника.

С учетом проводящего полупространства потенциал ($V(P)$) для верхнего и нижнего полупространства можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} V(P) = \frac{-I}{4\pi i\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} + K_{12} \frac{1}{r'} \right) - \text{верхнее непроводящее полупространство} \\ V(P) = \frac{-I}{4\pi i\omega\epsilon_0} \frac{1}{r} (1 + K_{12}) - \text{нижнее проводящее полупространство} \end{cases} \quad (5)$$

где r' — расстояние до отраженного источника (рис. 3).

Если предположить, что в нижнем полупространстве (в земле) токи проводимости преобладают над токами смещения, то комплексная проводимость в нижнем полупространстве совпадет с проводимостью для постоянного тока:

$$\sigma_{k2} = \sigma_2.$$

Тогда можно упростить выражение для коэффициента отражения:

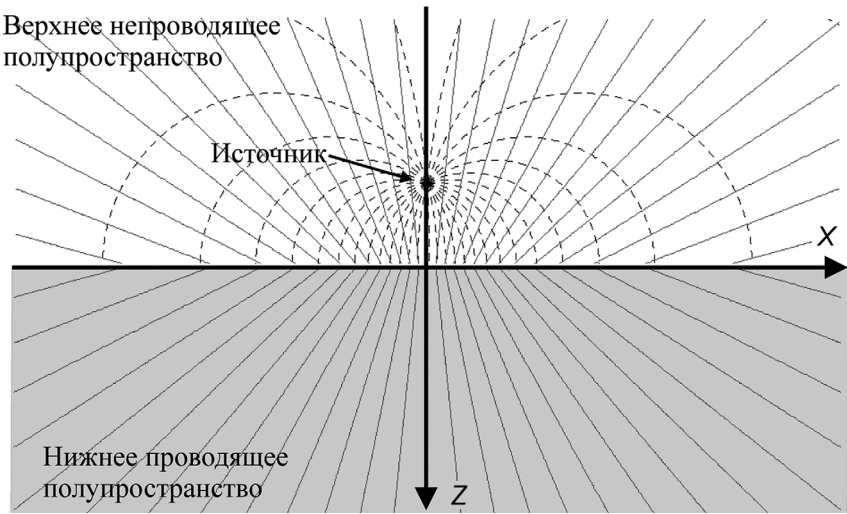


Рис. 4. Структура потенциала точечного источника для расчета поля в верхнем полупространстве

$$K_{12\sigma} = \frac{\sigma_{k1} - \sigma_{k2}}{\sigma_{k1} + \sigma_{k2}} = \frac{-i \omega \epsilon_0 - \sigma_2}{-i \omega \epsilon_0 + \sigma_2} = \frac{-(\epsilon_0 \omega)^2 + \sigma_2^2 - 2i \epsilon_0 \omega \sigma_2}{-(\epsilon_0 \omega)^2 + \sigma_2^2} \approx -1 - \frac{2i \epsilon_0 \omega}{\sigma_2}, \quad (6)$$

что позволяет существенно упростить выражение для потенциала:

$$\begin{cases} V(P) = \frac{I}{2\pi r' \sigma_2} + i \frac{I}{\omega \epsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) - \text{верхнее полупространство} \\ V(P) = \frac{I}{2\pi r \sigma_2} - \text{нижнее проводящее полупространство.} \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, электрическое поле в нижнем проводящем полупространстве стремится к полю заземленного точечного источника. Поле в верхнем полупространстве состоит из двух слагаемых: первое — связано с токами проводимости и зависит от удельного сопротивления нижнего полупространства (рис. 4, сплошные линии), второе

(штриховые линии) — связано с токами смещения в воздухе, не зависит от удельного сопротивления проводящего полупространства (земли) и не несет полезной информации. По сути, это помеха, мешающая определить удельное сопротивление грунта.

Поле второго слагаемого численно совпадает с полем вертикального электрического диполя (ВЭД). Оно определяется зарядами на поверхности токового электрода и зарядами на поверхности земли. Соотношение между реальной и мнимой компонентами поля зависит от величины разности, удельного сопротивления нижнего полупространства, высоты электродов над землей и рабочей частоты.

Учет влияния поля мнимого вертикального электрического диполя. Описанные выше компоненты поля в верхнем полупространстве имеют разные фазы. Но большинство измерительных систем измеряет модуль электрического поля, поэтому важно оценить соотношение между компонентами. Компонента поля, связанная с токами смещения,

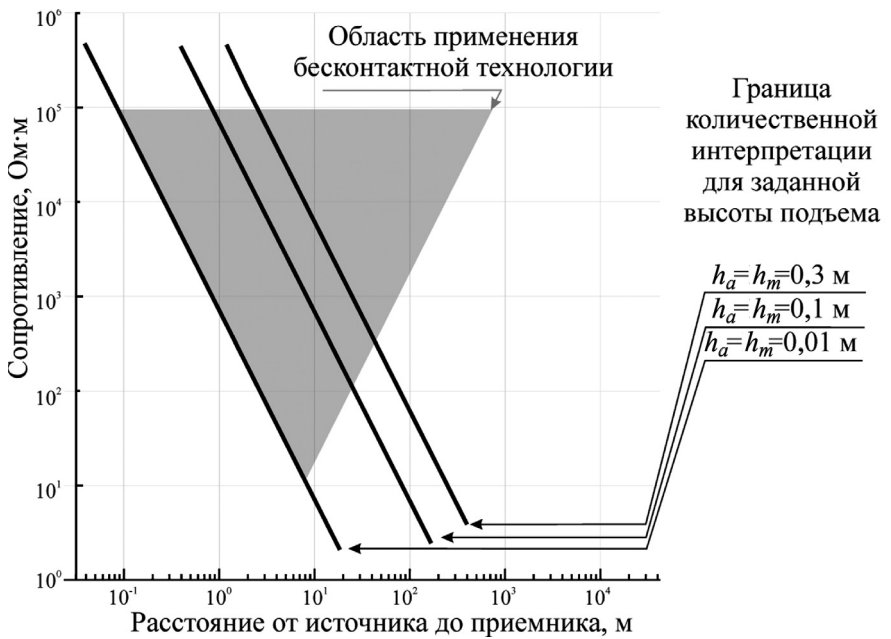


Рис. 5. Граница влияния вертикального электрического диполя на бесконтактные измерения при разной высоте электродов

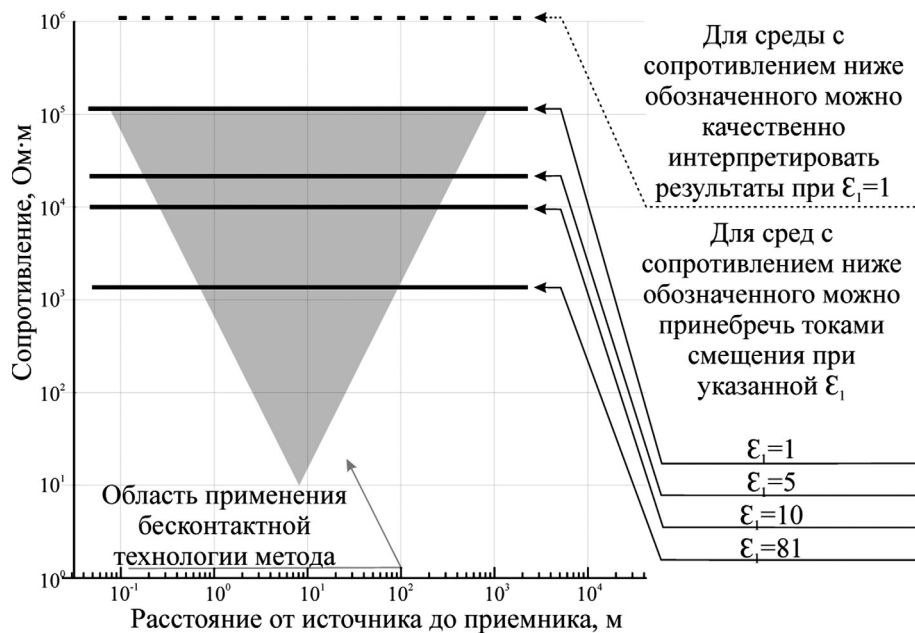


Рис. 6. Граница области влияния токов смещения на определение проводимости грунта

не несет никакой геологической информации и является помехой. Она быстро затухает с разном, но может искажать измерения на малых разностях. Нами была определена формула для левой границы области применения бесконтактной технологии метода сопротивления (рис. 5):

$$\rho_{\text{левой гр}}(r) = \frac{h_A h_M}{\varepsilon_0 f \pi L (h_A^2 - 2h_A h_M + h_M^2 + r^2)}, \quad (8)$$

где h_A и h_M — высота питающих и приемных электродов над землей. Высота электродов обычно не равна нулю, так как на поверхности земли может быть снег, растительный покров и т.п. плюс толщина изоляции провода, f — рабочая частота. Коэффициент L равен 0,3 для количественной интерпретации или 0,8 для качественной интерпретации.

Эта формула определяет минимальный допустимый разнос в зависимости от параметров установки (частота тока и высота электродов) и удельного сопротивления изучаемого разреза, для которого можно пренебречь искажением поля, связанным с мнимой компонентой поля.

Если предположить, что $h = h_A = h_M$, то формулу (8) можно упростить:

$$\rho_{\text{левой гр}}(r) = \frac{h^2}{\varepsilon_0 f \pi r^2}. \quad (9)$$

Токи смещения и токи проводимости. Для определения удельного сопротивления грунтов необходимо, чтобы токи проводимости преобладали над токами смещения. Следовательно, должно выполняться такое условие:

$$\sigma \gg \omega \varepsilon_0 \varepsilon_2, \quad (10)$$

где ε_2 — относительная диэлектрическая проницаемость грунта.

Тогда границы для качественной и количественной интерпретации можно обозначить таким образом:

$$\rho \omega \varepsilon_0 \varepsilon_2 < 0,90 \quad (11)$$

для качественной интерпретации и

$$\rho \omega \varepsilon_0 \varepsilon_2 \leq 0,05 \quad (12)$$

для количественной интерпретации.

На рис. 6 показан диапазон значений относительной диэлектрической проницаемости и сопротивлений, для которых необходимо учитывать токи смещения.

Построение области применения бесконтактной технологии. Результат построения трех описанных выше границ вместе — область применения бесконтактной технологии, которая слева ограничена влиянием вертикального электрического диполя (ВЭД), справа — влиянием индукции, сверху — влиянием токов смещения (рис. 7).

Такую область можно построить для любой частоты, например для частоты 625 Гц (рис. 8). Как



Рис. 7. Область применения бесконтактной технологии метода сопротивления для частоты 16 600 Гц

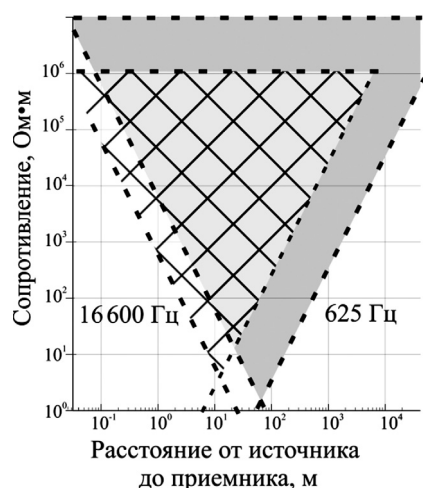


Рис. 8. Сравнение областей применения для частот 16 600 и 625 Гц



Рис. 9. План-схема места проведения полевого эксперимента

видно на рис. 8, при понижении частоты область применения смещается вправо и вверх. Электростатические явления усиливаются, а электромагнитные эффекты ослабевают.

Полевой эксперимент. На полигоне МГУ имени М.В. Ломоносова в Калужской области (рис. 9) недалеко от дер. Александровка во время проведения зимних студеских практик 2014 и 2015 гг. проводились измерения по одному и тому же профилю разными бесконтактными аппаратурными комплексами [Груздев, 2014], а именно: OhmMapper (16 600 Гц) [OhmMapper..., 2001], ERA MAX (625 Гц) [Аппаратура..., 2008], БИКС (16 600 Гц) [Электроразведочная..., 2012] и «ВЕГА» (16 000 Гц) [Станция..., 2012]. Для заверки результатов была проведена электротомографическая съемка на постоянном токе (станция «Syscal Pro», Франция).

На графиках профилирования (рис. 10) представлены результаты измерений различными бесконтактными комплексами и данные съемки

Syscal Pro. Как видно на графиках, только данные комплекса ERA MAX в относительно низкоомных зонах отличаются от остальных данных.

Если отобразить диапазоны разносов и измеренных сопротивлений на области применения метода (рис. 11), то заметно, что результаты, полученные с использованием станций, работающих на более высоких частотах, не должны практически отличаться от данных электротомографии, а данные аппаратурного комплекса ERA MAX, работающего на частоте 625 Гц в области малых разносов и низких сопротивлений, должны быть искажены влиянием ВЭД (рис. 10).

Закключение. Предложен способ определения области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений. Область определяется для однородного полупространства в зависимости от частоты, на которой работает бесконтактный аппаратурный комплекс, от сопротивления полупространства, над которым проводятся измерения,

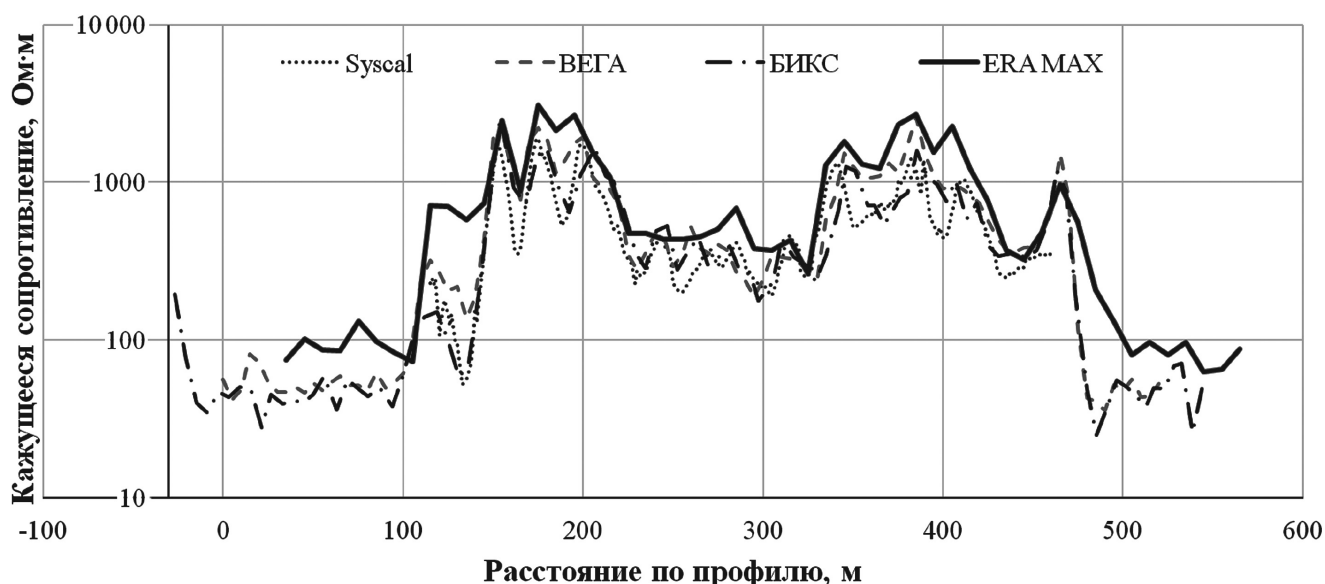


Рис. 10. Сравнение результатов измерений разными бесконтактными комплексами, а также аппаратурным комплексом Syscal Pro

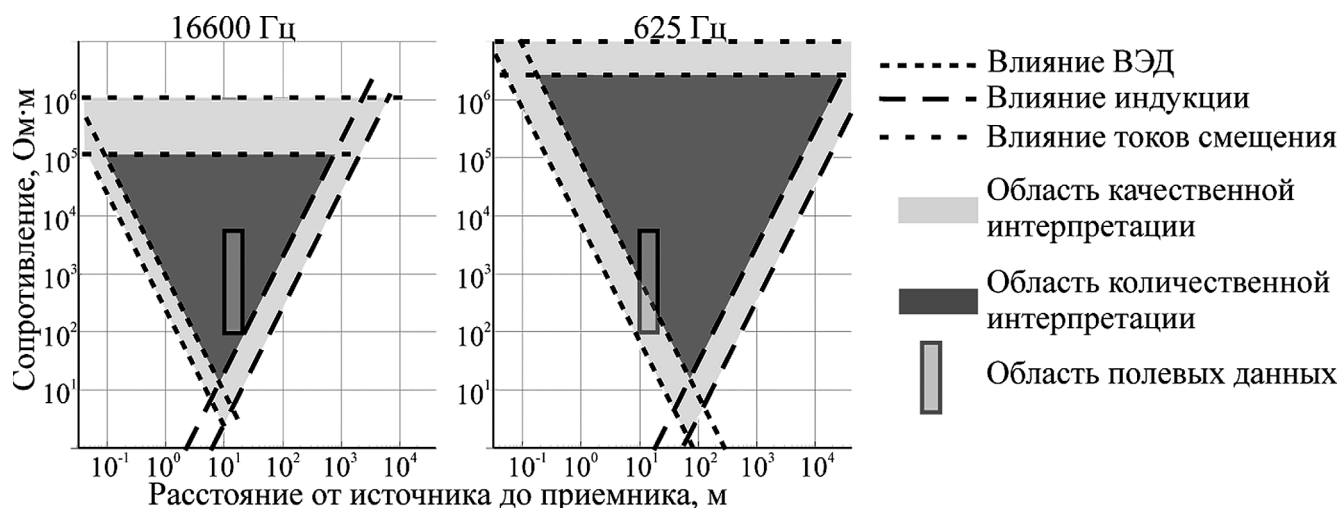


Рис. 11. Области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений. Прямоугольником показана область распределения реальных данных, полученных во время полевого эксперимента

высоты подъема измерительного и генераторного диполя, а также от диапазона разносов геофизической установки. Теоретические выводы подтверждены полевыми исследованиями. Показано, что аппаратные комплексы с одной рабочей

частотой имеют ограниченный диапазон разносов в зависимости от удельного сопротивления изучаемого разреза. Разработка многочастотных комплексов позволит создать системы, работающие в широком диапазоне разносов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аппаратура электроразведочная для методов сопротивления и естественного поля «ERA MAX», Техническое описание и инструкция по эксплуатации. СПб.: ООО Научно-производственное предприятие «ЭРА», 2008.

Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // Разведка и охрана недр. 2002. № 10. С. 36–40.

Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л.: Недра, 1980.

Груздев А.И. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // Инженерные изыскания. 2014. № 9, 10. С. 32–37.

Нахабцев А.С., Сапожников Б.Г., Яблучанский А.И. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра, 1985. 96 с.

Сапожников Б.Г. Опыт наблюдений составляющих электрического поля в воздухе при электропрофилировании на переменном токе. Л.: Мингео СССР, НПО «Геофизика», 1978.

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.: Мингео СССР, ВИРГ НПО «Рудгеофизика», 1982.

Станция электроразведочная высокочастотная «Вега» // Руководство по эксплуатации. М.: НПО Геотех, 2012.

Тимофеев В.М. О некоторых способах оценки электрических свойств многолетнемерзлых пород в переменных электромагнитных полях // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1977. Вып. 116. С. 27–30.

Тимофеев В.М. Применение электропрофилирования с линейными емкостными антеннами для целей инженерно-геокриологической съемки: Автореф. канд. дисс. Л., 1979.

Электроразведочная аппаратура «БИКС». Руководство по эксплуатации. Саратов: ОАО «СКБ сейсмического приборостроения», 2012.

Kuras O., Beamish D., Meldrum P.I., Ogilvy R.D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // Geophysics. 2006. Vol. 71, N 3. P. 135–152.

OhmMapper TR1 Operation Manual // Geometrics, INC, 2001.

Timofeev V.M. Experience in the use of high frequency electrical geophysical methods in geotechnical and geocryological field studies // 3rd Intern. Conf. on Permafrost, NAUKA, Proceed. 1973. P. 238–247.

Поступила в редакцию 04.03.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020