

УДК [550.837.311 + 550.837.81]

В.А. Куликов<sup>1</sup>, С.А. Аношина<sup>2</sup>, А.В. Соловьева<sup>3</sup>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ВЭЗ-ВП ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ МОСАЛЬСКОГО РАЙОНА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Традиционный метод поиска и изучения залежей песчано-гравийных смесей — вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Сегодня перед геофизиками ставится задача не только обнаружить границы залежи песчано-гравийной смеси, но и определить ее основные свойства, например, выделить в пределах залежи участки, характеризующиеся высоким содержанием гравия, или определить содержание глинистых частиц в песках. Для решения этих сложных задач необходимо использовать новые методы, в частности, метод вызванной поляризации.

Приведены результаты электроразведочных работ, выполненных в рамках учебно-научной практики студентов МГУ имени М.В. Ломоносова на территории Мосальского района Калужской области в 2015 г. Работы выполнены как на разрабатываемых месторождениях, так и на новых поисковых площадях, где еще не проводились горно-буровые работы.

Как показали результаты работ, все месторождения песчано-гравийных смесей характеризуются повышенными значениями вызванной поляризации. Совместный подбор кривых кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости существенно сужает границы эквивалентных моделей при интерпретации данных в сложных геологических ситуациях, когда песчано-гравийные залежи мало отличаются от вмещающих пород или перекрыты мощной толщей проводящих суглинков.

*Ключевые слова:* электроразведка, песчано-гравийная смесь, поляризуемость, дифференциальный фазовый параметр.

Vertical electrical sounding is a traditional method of exploration of sand-gravel mix deposits. At present geophysicists are challenged not only to discover of the as-dug gravel, but also to determine its basic properties, allocate within the deposits plots with high percentage of gravel or determine the content of clay particles in the sands. To meet these challenges it is necessary to use new methods, in particular, the method of induced polarization.

The paper presents the results of DC/IP surveys executed in the territory of Mosalsky district of Kaluga region in 2015. The work was carried out as already known, developed fields of sand-gravel mix deposits, as well as new search areas, which have not yet conducted drilling works.

As shown by the results all the deposits of sand-gravels are characterized by high values of induced polarization. The complex selection of the curves of apparent resistivity and apparent polarizability substantially narrows the boundaries of equivalent models in the interpretation of data in complex geological situations where sand and gravel deposits slightly different from the surrounding rocks or covered with a thick layer of conductive loam.

*Key words:* electrical survey, sand-gravels, polarizability, differential phase parameter.

**Введение.** К наиболее востребованным полезным ископаемым в строительной индустрии относятся песчано-гравийные смеси (ПГС). ПГС имеют природное происхождение, так же, как строительный песок, характеризуются весьма обширной областью применения. Природная песчано-гравийная смесь используется для устройства дорожных покрытий, первого слоя основания и других задач дорожного строительства, для выравнивания строительных площадок, для обратной засыпки котлованов и траншей в жилищном и про-

мышленном строительстве, а также при прокладке коммуникаций. Обогащенную песчано-гравийную смесь можно использовать при производстве бетона и заливке фундаментов.

Общие свойства ПГС зависят от всех физико-механических свойств компонентов, входящих состав песчано-гравийной смеси, а также от процентного соотношения гравия и песка [Инструкция..., 1983].

Природная песчано-гравийная смесь должна иметь следующие характеристики: содержание

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, докт. физ.-мат. н.; *e-mail:* vic@nw-geophysics.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, студентка; *e-mail:* anoshinas21@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирантка; *e-mail:* nastya\_soloway@rambler.ru

зерен гравия размером  $\geq 5$  мм от 10 до 95%, содержание глинистых частиц в песке  $\leq 10\%$ .

Среднее значение содержания гравия находится в пределах 10–20%, в некоторых карьерах могут добывать ПГС с содержанием гравия до 35–50%.

Стоимость ПГС зависит от процентного соотношения гравия и песка, поэтому при расчетах запасов месторождений важно знать не только общий объем ПГС, но и процентное содержание богатой фракции с высоким содержанием гравия и валунов.

К традиционным методам поиска и изучения залежей ПГС относится вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Сегодня перед геофизиками ставится задача не только обнаружить границы залежи ПГС, но и определить ее основные свойства, например, выделить в пределах ПГС участки, характеризующиеся высоким процентным содержанием гравия, или определить содержание глинистых частиц в песках. Для решения этих сложных задач необходимо использовать новые методы, в частности, метод вызванной поляризации.

В статье приведены результаты электроразведочных работ, выполненных на нескольких поисковых участках на территории Мосальского района Калужской области. Работы выполнены как на разрабатываемых месторождениях ПГС, так и на новых поисковых площадях, где еще не проводились горно-буровые работы.

**Геологическая характеристика четвертичных отложений в районе работ.** Песчано-гравийные смеси, пригодные для строительных работ, на территории Калужской области связаны с четвертичными отложениями. Четвертичные отложения распространены практически повсеместно. Рельеф дочетвертичной поверхности сформировался в позднекайнозойское время под влиянием неотектонических движений, дочетвертичных денудационно-аккумулятивных процессов, на которые существенно влияли литологический состав пород и экзарационная деятельность плейстоценовых ледников.

Наиболее перспективны на обнаружение промышленных запасов гравия в пределах Калужской области озо-камовые отложения московской и донской морен, а также флювиогляциальные межморенные отложения времени отступления ледника.

Водно-ледниковые отложения озоз и камов (*f*, *lgoz*, *kmIm*s, *dns*) приурочены к краевым и конечно-моренным образованиям, где они концентрируются в цепочки четко выраженных в рельефе гряд и холмов. Озы и камы наиболее обильны в пределах Мосальской гряды, где их мощность может достигать до 15–25 м. Сложены они разнозернистыми песками, песчано-гравийными образованиями с прослоями супесей и глин.

Отложения озоз и камов характеризуются сравнительно небольшим объемом горной массы при высоком содержании гравия, гальки и валунов (до 50%). Заполнитель представлен глинистыми песками и супесями. Тела озоз характеризуются резким выклиниванием, они залегают среди моренных отложений с видимым угловым несогласием.

Флювиогляциальные межморенные отложения имеют значительную мощность (15–25 м), часто перекрыты суглинками. Как правило, толща имеет двучленное строение: верхняя часть представлена среднезернистыми песками, в различной степени глинистыми, а нижняя — песчано-гравийными смесями. Содержание гравия в нижней части не превышает 25–30%.

Отложения донской морены (*gIdns*) представлены суглинками серыми, бурыми и красно-коричневыми с гравием, галькой и валунами, с линзами песков и глин, а также с отторженцами коренных пород.

Отложения московской морены (*gIIm*s) сложены суглинками бурыми, красновато-бурыми, грубопесчанистыми с гравием, галькой и валунами, с линзами и прослоями песков, глин, супесей и гравийно-галечного материала.

В гравийной фракции в низах морены отмечается высокое содержание осадочных пород (до 70%), вверх по разрезу оно снижается до 25–15%. Среди осадочных пород преобладают кремни и известняки, среди дальноприносных — красные и серые граниты. Вверху увеличивается содержание сланцев и гнейсов.

**Методы исследований.** Традиционные методы поиска и изучения залежей ПГС — методы электроразведки на постоянном токе — вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электропрофилеирование (ЭП). Как правило, залежи ПГС выделяются на фоне вмещающих пород высоким удельным электрическим сопротивлением — от нескольких сотен до нескольких тысяч омметров.

В 2015 г. на территории Мосальского района Калужской области в рамках проведения научно-учебной геофизической практики для студентов геологического факультета МГУ выполнены электроразведочные измерения методом ВЭЗ-ВП (вертикальное электрическое зондирование с измерением вызванной поляризации). Измерения проводились с помощью четырехэлектродной симметричной установки Шлюмберже AMNB. Расстояние между точками зондирования составляло 100–200 м. Измерения проводились на переменном токе (частота 0,6 Гц). Для определения вызванной поляризации использовалась методика фазово-частотных измерений [Куликов и др., 2013]. Кажущаяся поляризуемость рассчитывалась через дифференциально-фазовый параметр (ДФП) по приближенной формуле:  $\eta_k = -2,5 \cdot \text{ДФП}$ .

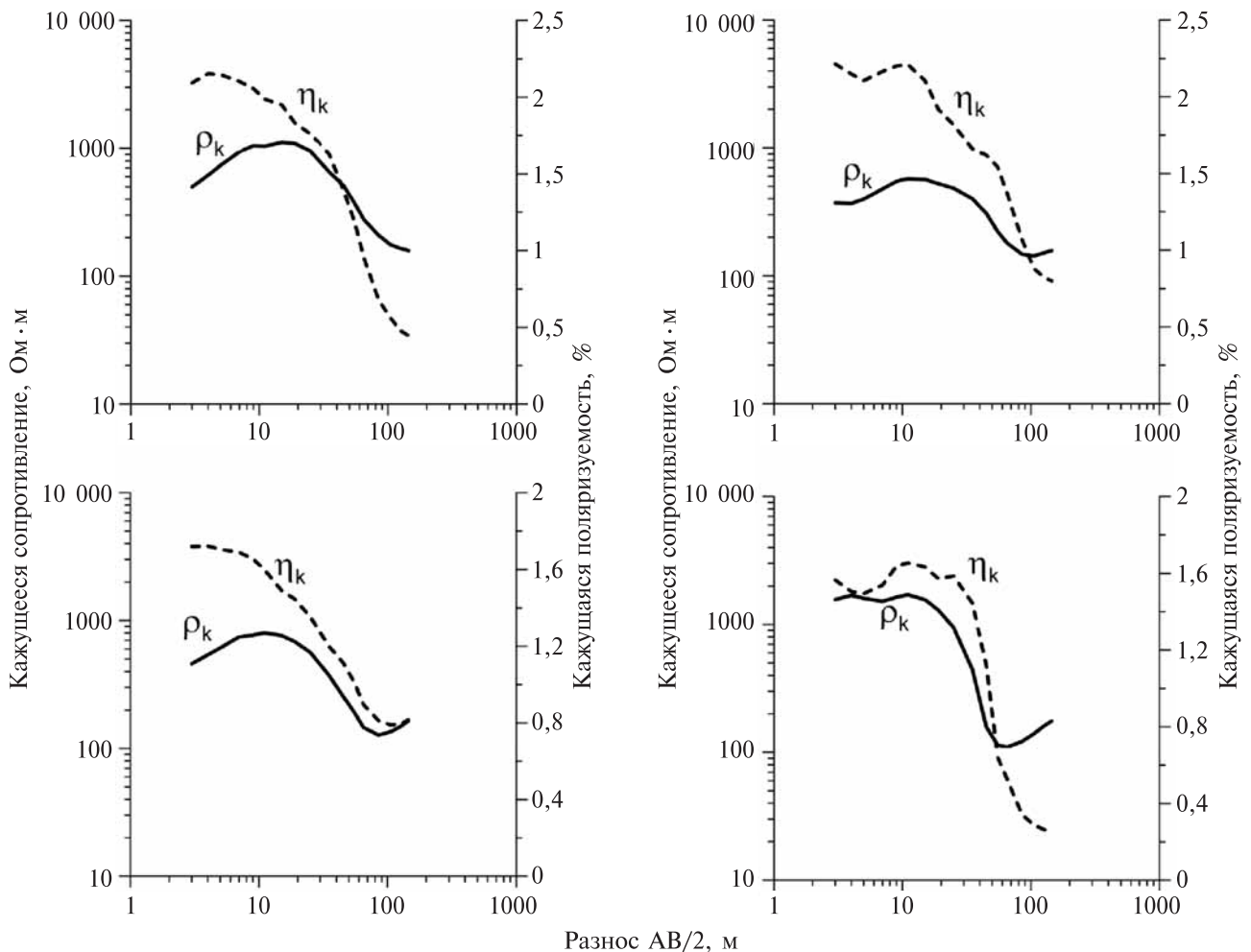


Рис. 1. Примеры характерных кривых кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости над залежами ПГС

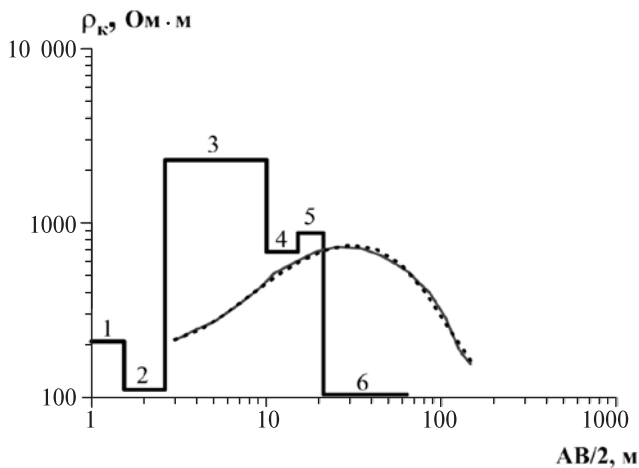


Рис. 2. Пример подбора кривой кажущегося сопротивления над озо-камовыми отложениями. Цифрами 1–6 обозначены слои, выделенные по результатам интерпретации. По результатам бурения получены следующие интервалы: 0–2 м — песок глинистый, иногда с редким гравием и галькой (содержание гравия 1,4%, глинистость 5,6%); 2–10 м — песчано-гравийная смесь (содержание гравия 30%); 10–21 м — песок мелкозернистый, иногда с гравием (содержание гравия 5%); 21–24 м — суглинок моренный

При проведении работ использовалась аппаратура производства ООО «Северо-Запад» (г. Москва): портативный генератор «АСТРА» и многофункциональный электроразведочный измеритель «МЭРИ» [Куликов и др., 2013].

**Результаты исследований.** Кривые кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ), полученные над телами озв и камов, имеют характерно выраженный элемент «К» (рис. 1). Максимум значений кажущегося сопротивления, как правило, приходится на разности  $AB/2=10\div 30$  м и составляет от 500 до  $n\cdot 1000$  Ом·м. Кроме того, горизонтам ПГС, обогащенным гравием, в большинстве случаев отвечают максимумы на кривых кажущейся поляризуемости ( $\eta_k$ ). Значения  $\eta_k$  могут достигать 2–2,5%. Высокая электрическая поляризуемость, по нашему предположению, связана с гравием магматического происхождения, для которого характерно высокое содержание магнетита и других электропроводящих минералов. Примеры характерных кривых  $\rho_k$  и  $\eta_k$  для месторождений этого типа, полученных на разных участках, приведены на рис. 1.

На рис. 2 приведен пример подбора кривой кажущегося сопротивления в программе IPI (А.А. Бобачев, г. Москва), полученной над ме-

сторожением ПГС озо-камового типа. Серым показана полевая кривая  $\rho_k$ , пунктирной линией — модельная кривая  $\rho_k$ , черным — геоэлектрическая модель по результатам одномерного подбора. Цифрами обозначены слои, выделенные по результатам интерпретации. Для графика геоэлектрической модели на оси абсцисс отложены значения сопротивления (Ом·м), по оси ординат — глубина. По результатам бурения слой песчно-гравийных отложений мощностью 8 м залегает на глубине 2 м. Среднее содержание гравия на этом интервале составляет 30%. УЭС слоя ПГС по результатам интерпретации кривых ВЭЗ составило 2300 Ом·м. На интервале глубины 10–21 м вскрыт слой песков с незначительным содержанием гравия. Удельное электрическое сопротивление этого слоя по результатам ВЭЗ — 800–900 Ом·м.

Флювиогляциальные межморенные отложения, которые представлены на территории работ среднезернистыми песками и песчано-гравийными смесями, менее ярко проявляются на результатах ВЭЗ-ВП, особенно, если они перекрыты суглинками. Примеры интерпретации кривых кажущегося сопротивления, полученных над залежами межморенных ПГС, приведены на рис. 3, 4.

Кривая  $\rho_k$  (рис. 3) получена на участке, где после геофизических работ проводилось заверочное бурение. По результатам бурения межморенные отложения, представленные песчано-гравийной

смесью мощностью 7 м, залегают на глубине 11 м и перекрыты суглинками московской морены. Сопротивление горизонта ПГС составляет около 150 Ом·м, горизонт практически не выделяется на кривой кажущегося сопротивления. Уровень грунтовых вод в представленной скважине находится на глубине 16 м, поэтому нижняя часть ПГС обводнена и по уровню УЭС сливается с подстилающим горизонтом — суглинками донецкой морены.

В определенных геологических ситуациях с помощью традиционного метода ВЭЗ можно определять мощность горизонтов, представленных ПГС, с высокой точностью и без привлечения дополнительных методов и априорной информации. Это возможно над месторождениями, представленными мощными горизонтами ПГС, с высоким содержанием гравия и низкими значениями глинистости (рис. 2). Однако не всегда метода ВЭЗ бывает достаточно для решения поставленной задачи.

Например, как показано на рис. 3 и 4, флювиогляциальные межморенные отложения слабо отличаются по уровню УЭС от вмещающих песков, а обводненная часть ПГС, находящаяся ниже уровня грунтовых вод (УГВ), может сливаться с подстилающими суглинками. Это значительно затрудняет определение мощности песчано-гравийного слоя по кривым кажущегося сопротивления.

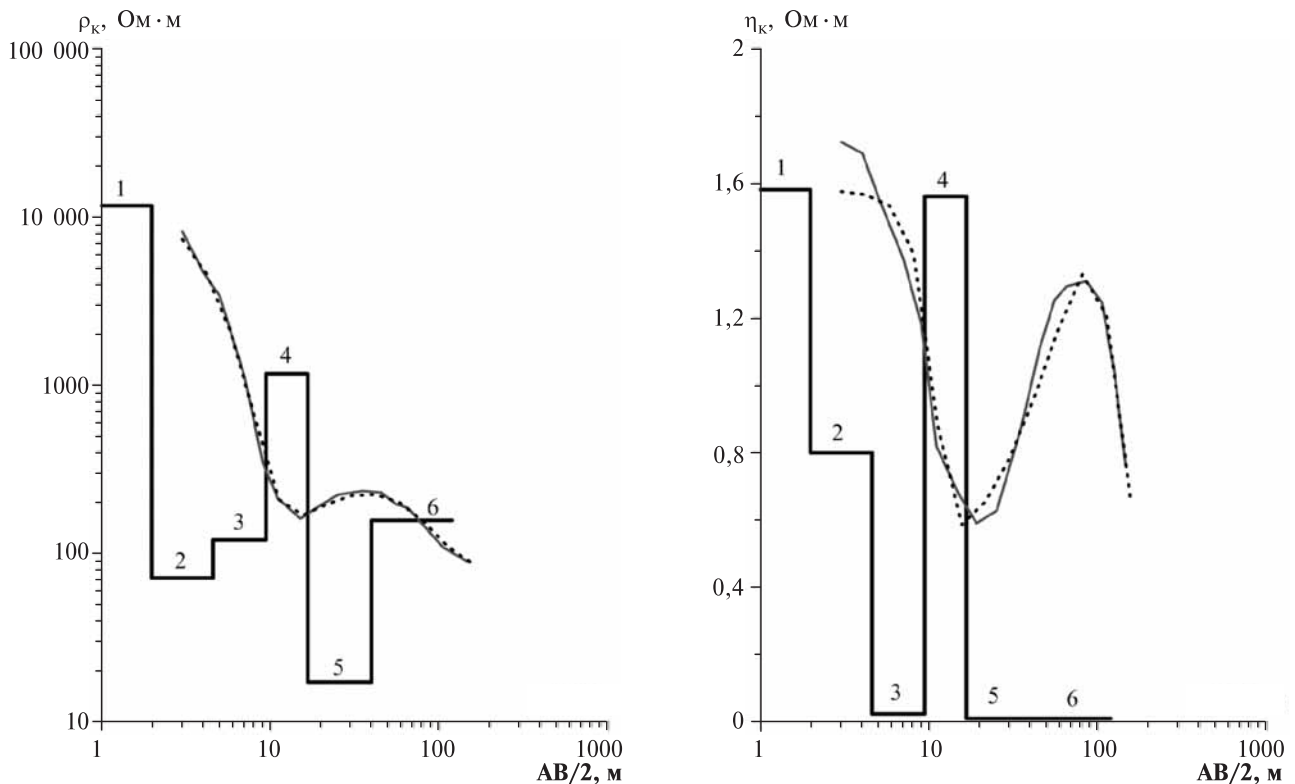


Рис. 3. Пример подбора кривой кажущегося сопротивления над межморенными отложениями ПГС. Цифрами обозначены слои, выделенные по результатам интерпретации. По результатам бурения получены следующие интервалы: 0–2 м — почвенно-растительный слой; 2–11 м — московская морена, суглинок красно-коричневый с прослоями песка; 11–18 м — межморенные отложения, щебенистый грунт с включениями валунов, песок крупнозернистый (содержание гравия 22%); 18–21 м — донецкая морена, суглинок коричневый

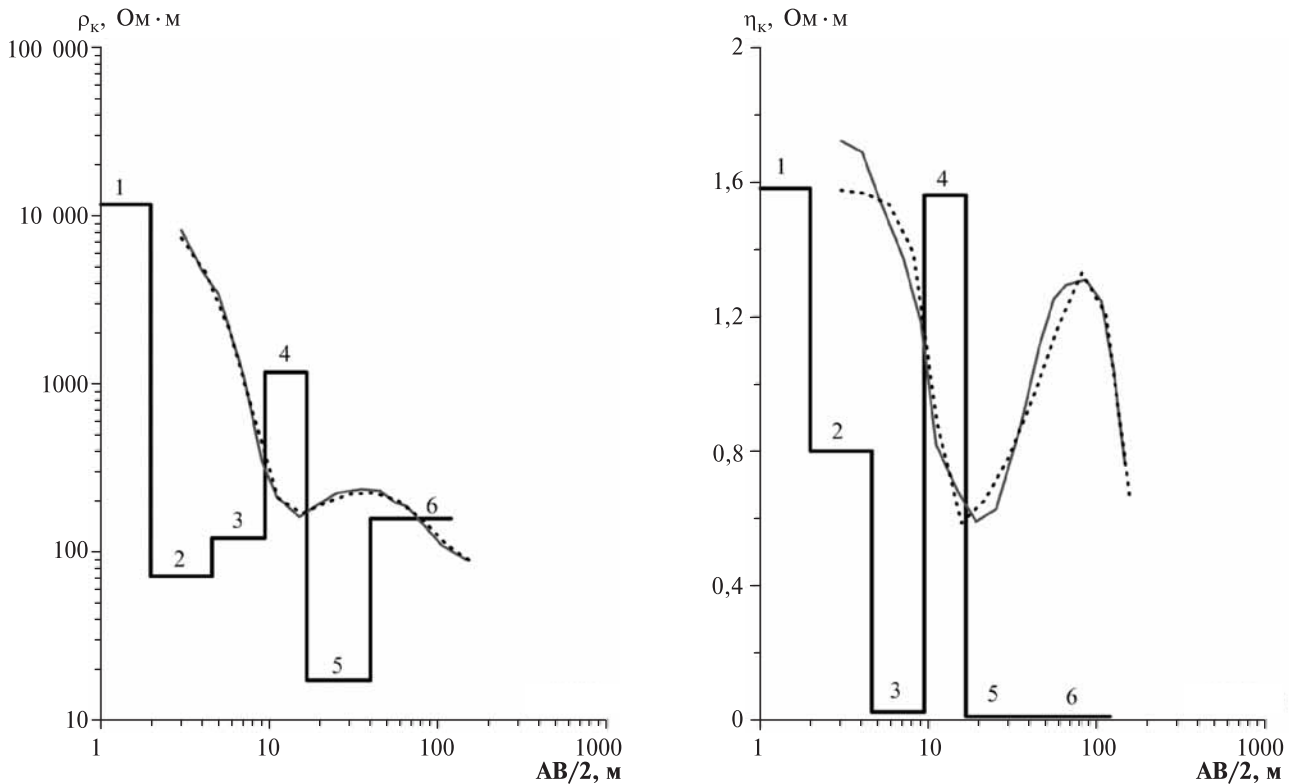


Рис. 4. Пример подбора кривой кажущегося сопротивления (слева) и кажущейся поляризуемости (справа) над межморенными отложениями ПГС. Цифрами обозначены слои, выделенные по результатам интерпретации. По результатам бурения получены следующие интервалы: 0–4 м — супесь светло-коричневая песчанистая; 4–9 м — гравийный грунт светло-бурый, с песчаным заполнителем, мелким гравием и галькой (содержание гравия 16%); 9–20 м — гравийный грунт светло-бурый, с включением мелких и крупных валунов (содержание гравия 25%); с 20 м — глина серая. Уровень грунтовых вод залегает на глубине 17 м

В таких сложных геологических ситуациях дополнительную информацию можно получить с помощью метода вызванной поляризации. Горизонты с высоким процентным содержанием гравийного материала магматического происхождения создают аномалии ВП (рис. 1), которые при современных аппаратурно-технических возможностях можно измерять с высокой точностью. Аномалии ВП создаются гравийной смесью, находящейся как выше, так и ниже УГВ. Совместный подбор кривых кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости может существенно сузить границы эквивалентных моделей при интерпретации данных в сложных случаях, когда отложения ПГС мало отличаются от вмещающих пород или перекрыты мощной толщей проводящих суглинков (рис. 4).

На рис. 5 приведены карты распределения кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости, полученные на одном из месторождений озо-камового типа. Аномалия кажущегося сопротивления на разnose  $AB/2=25$  м, связанная с линзой ПГС, имеет четко выраженное северо-западное простирание, которое отвечает направлению отступления ледника. Значения кажущегося сопротивления над центром линзы ПГС составляют 700–750 Ом·м (при фоновых значениях  $\rho_k=50\div 70$  Ом·м, рис. 5, А).

Границы аномалии кажущейся поляризуемости ( $\eta_k$ ) несколько отличаются от границ высокоомной зоны (рис. 5, Б). Максимальные значения  $\eta_k$  наблюдаются в восточной и юго-восточной частях залежи и предположительно связаны с участками, обогащенными гравием магматического происхождения, а также с увеличением мощности водонасыщенной части ПГС.

Для уточнения природы аномалии ВП мы провели детальные работы по методике электротомографии на профиле длиной 630 м. При измерениях использована четырехэлектродная симметричная установка Шлюмберже; параметры установки — размеры приемных линий, разности питающих электродов, шаг по профилю между зондированиями подобраны таким образом, чтобы при перемещении установки для питающих и приемных электродов использовались одни и те же места заземления. Это позволило использовать при интерпретации двумерную инверсию данных с разделением эффектов от глубинных объектов и приповерхностных неоднородностей разреза. Подобный подход применяется в методике электротомографии со специальными многоканальными станциями. Положение профиля детальных работ показано на рис. 5.

Инверсия данных электротомографии проводилась в программе ZONDRES2D (Е.А. Ка-

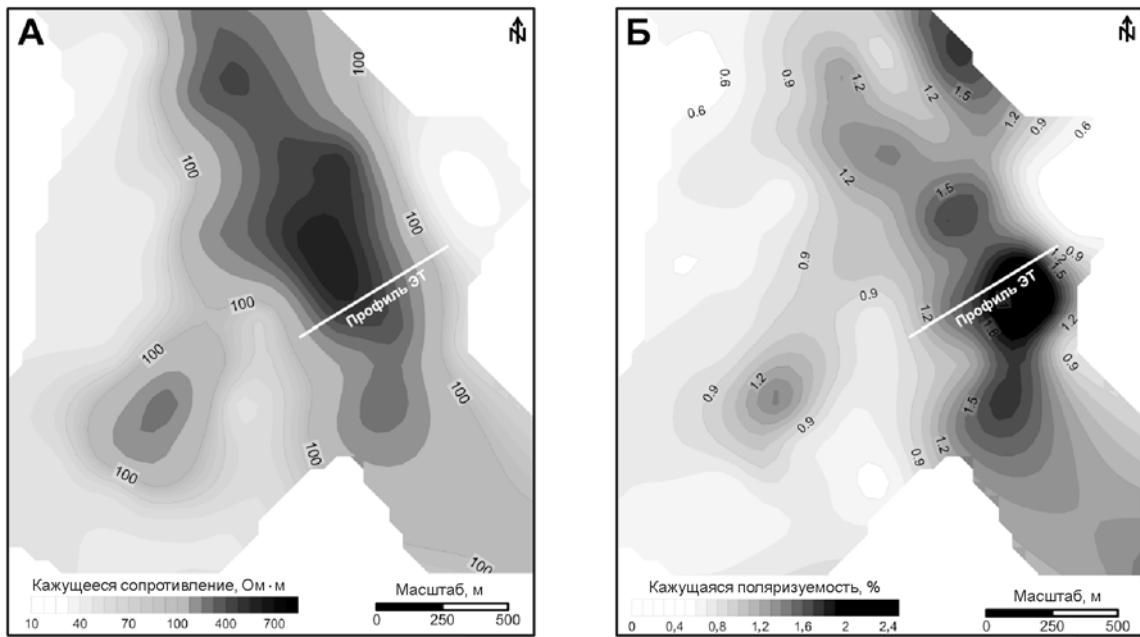


Рис. 5. Месторождение ПГС. Карта распределения значений кажущегося сопротивления (А) и кажущейся поляризуемости (Б) по результатам ВЭЗ-ВП на разносе АВ/2=25 м

минский, г. Санкт-Петербург) с одновременным подбором кривых кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости. Невязка подбора по кажущемуся сопротивлению составила 0,6%, по кажущейся поляризуемости — 1,6%. Глубинные разрезы, полученные по результатам двумерной инверсии, представлены на рис. 6. Песчано-гравийная толща в верхней части разреза проявляется как горизонт высокого сопротивления (УЭС=500÷1500 Ом·м). Уровень грунтовых вод в районе работ находится на отметке ~197 м. Ниже этой отметки сопротивление резко уменьшается за счет обводненности пород.

Слой ПГС характеризуется также повышенными значениями поляризуемости. В западной части профиля (пикеты 0–320) границы поляризуемого и высокоомного горизонтов практически совпадают. В восточной части профиля (пикеты 350–500) мощность поляризуемого горизонта увеличивается с 10 до 20 м, а значения поляризуе-

мости увеличиваются до 2%, причем приповерхностная часть разреза (0–5 м) на этом интервале профиля характеризуется низкими значениями поляризуемости, что может свидетельствовать об отсутствии или об уменьшении процентного содержания гравийной составляющей в ПГС.

**Заключение.** При поисках и оценке месторождений песчано-гравийных смесей метод вызванной поляризации в комплексе с вертикальными электрическими зондированиями или электротомографией позволяет решать такие сложные задачи, как выделение в пределах месторождений ПГС участков, обогащенных гравийной фракцией; определение глинистости песка; установление мощности обводненной песчано-гравийной смеси, находящейся ниже уровня грунтовых вод. Для определения природы аномалий вызванной поляризации желательно учитывать временные (частотные) характеристики поля ВП, фиксируя их полный спад или проводя многочастотные измерения.

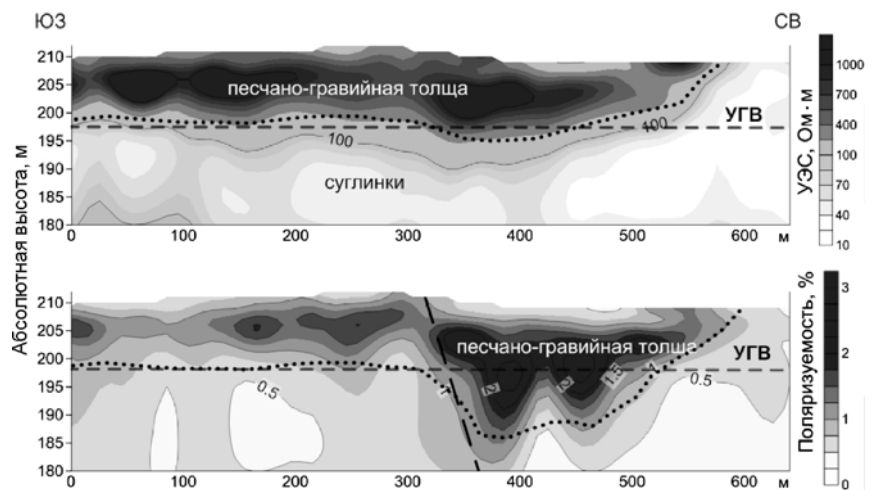


Рис. 6. Детальный профиль. Модели УЭС и поляризуемости по результатам двумерной инверсии данных электротомографии

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Инструкция по применению классификации запасов к месторождениям песка и гравия. М.: ГКЗ СССР, 1983.

*Куликов В.А.* Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // Геофизика. 2013. № 6. С. 23–31.

*Куликов В.А., Груздева И.Д., Яковлев А.Г.* Результаты работ методом ВЭЗ-ВП в районе полигона «Александровка» Калужской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 3. С. 53–61.

Поступила в редакцию  
01.09.2015