

УДК 550.837.311

В.А. Куликов¹, И.Д. Груздева², А.Г. Яковлев³

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ МЕТОДОМ ВЭЗ–ВП В РАЙОНЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ БАЗЫ МГУ (КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Развитие аппаратно-методического комплекса за последние 10 лет позволило дополнительно к кривым кажущегося сопротивления получать кривые кажущейся поляризуемости приемлемого качества на некоторых частотах вплоть до разноса 500 м. Сравнивая между собой частотные характеристики вызванной поляризации (ВП), можно сделать дополнительные выводы о природе аномалий. Описаны методические особенности проведения работ и представлены некоторые результаты измерений методом вертикальных электрических зондирований и вызванной поляризации (ВЭЗ–ВП), выполненных в ходе проведения учебных геофизических практик МГУ.

Ключевые слова: электроразведка, постоянный ток, вертикальное электрическое зондирование, вызванная поляризация, частотная область.

Methodical and instrumentation development during last 10 years has enabled us in addition to the curves of apparent resistivity to get of the apparent chargeability curves of the acceptable quality at some frequencies till electrode spacing $AB/2 = 500$ m (Schlumberger Array). Comparing the frequency characteristics of induced polarization (IP) the additional conclusions about the nature of anomalies can be drawn. The article describes the methodological features and presents some of the results of measurements made by vertical electrical sounding and induced polarization (VES–IP). These measurements were made in the course of the geophysical training of Moscow State University.

Key words: electrical survey, direct current, vertical electrical sounding, induced polarization, frequency domain.

Введение. С 1992 г. в Юхновском районе (Калужская область) существует база геофизических практик геологического факультета МГУ. Одним из основных направлений электроразведки при проведении практик были и остаются методы постоянного тока, из которых базовое, несомненно, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Используя метод вертикальных электрических зондирований, помимо информации об удельном сопротивлении можно получать данные о вызванной поляризации (ВП) горных пород. Такая модификация зондирования носит название ВЭЗ–ВП. Известно, что наиболее интенсивные аномалии ВП наблюдаются над породами, содержащими электропроводящие минералы (сульфиды, оксиды металлов), поэтому метод применяется главным образом для поиска и изучения рудных месторождений. Однако осадочные породы также обладают вызванной поляризацией, которая может иметь как ионный, так и электронный характер. Одновременная интерпретация двух независимых параметров среды — кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости — повышает устойчивость решения обратной задачи, сужает область эквивалентности и упрощает процесс подбора. Вызванная поляризация помогает при решении гидро-

геологических и экологических задач, картировании горизонтов глин.

Информация о вызванной поляризации пород очень важна, но измерить ее сложно, так как напряжение ВП для осадочных пород практически на 2 порядка меньше, чем напряжение пропускания. В результате большинство исследователей ограничиваются получением и интерпретацией кривых кажущегося сопротивления, теряя много важной информации. При проведении первых работ методом ВЭЗ–ВП в Калужской области применялись сложные установки, подключали мощные генераторы, однако при этом редко получали кажущуюся поляризуемость (η_k) на разносах более 100 м. Кривые η_k получались с большой дисперсией, заканчивались крутой восходящей ветвью и не приносили практически никакой информации для интерпретации вертикальных зондирований. По мере накопления опыта работ в аппаратно-методический комплекс вносились изменения, которые привели к тому, что сегодня зондирования выполняются с теми же установкой, скоростью и трудозатратами, что и 20 лет назад, но получают кривые кажущегося сопротивления (ρ_k) и кажущейся поляризуемости идеального качества вплоть до разносов 500 м. Опишем особенности методики работ и некоторые

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; *e-mail:* irinagruzde8a@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* mail@nw-geophysics.ru

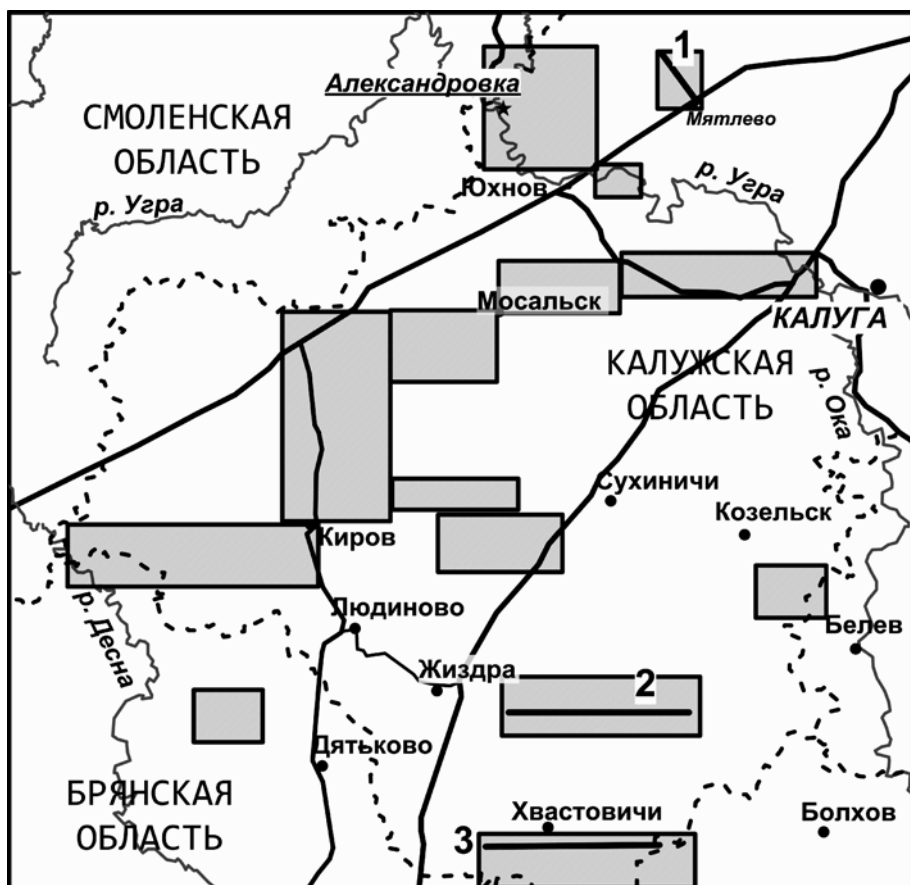


Рис. 1. Обзорная карта работ методом ВЭЗ–ВП в Калужской области. Прямоугольники — примерные границы участков детальных работ методом ВЭЗ–ВП. Положение профилей: 1 — Мятлево, 2 — Жиздра, 3 — Брянск

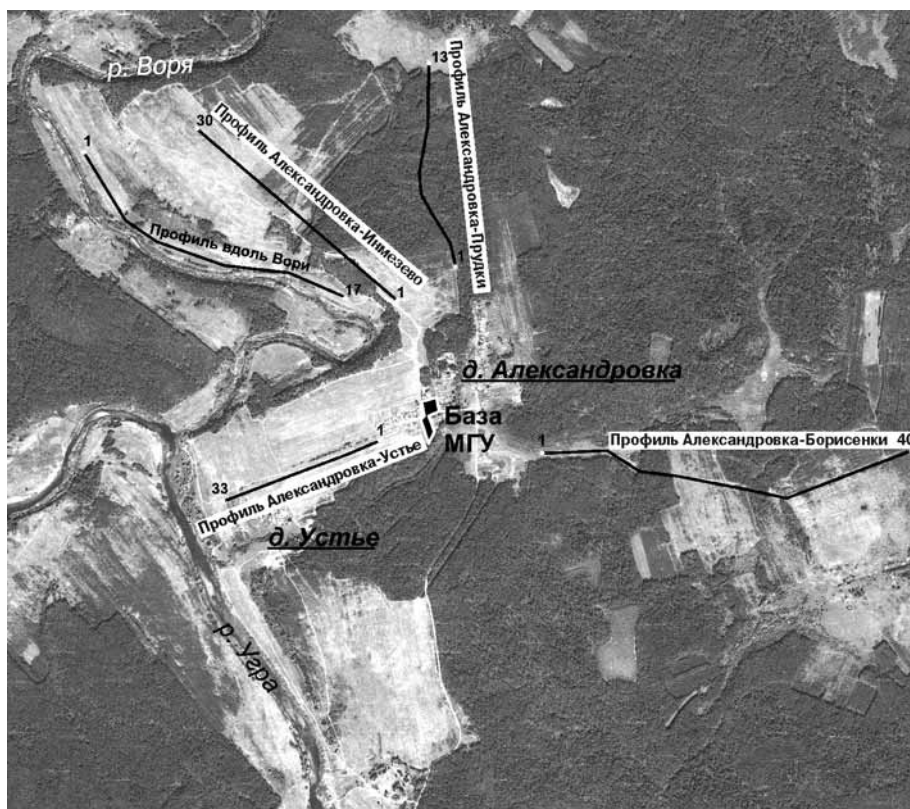


Рис. 2. Положение профилей ВЭЗ–ВП в районе геофизического полигона «Александровка»

результаты зондирований, выполненных в ходе проведения учебно-производственных практик.

География работ. Во время проведения учебных практик для студентов геологического факультета МГУ измерения методом ВЭЗ–ВП выполняли, как правило, в комплексе с другими геофизическими методами как по локальным, так и по региональным профилям. Основные участки и профили работ показаны на картах фактического материала (рис. 1, 2).

Наиболее плотная сеть наблюдений выполнена в окрестностях базы МГУ (д. Александровка, Юхновский район) (рис. 2). Длина профилей ВЭЗ–ВП в окрестностях базы составляет 2–3 км. Расстояние между точками измерения на этих профилях составляет, как правило, 50–100 м. Региональные профили ВЭЗ–ВП выполняли преимущественно вдоль автодорог (рис. 1) с шагом 500–1000 м.

Для всех измерений использована четырехэлектродная симметричная установка Шлюмберже. Диапазон разностей $AB/2$ от 3 до 500 м, приемные линии (MN) — 2, 10 и 50 м. В условиях геоэлектрического разреза, характерного для всей центральной части Восточно-Европейской платформы, эта установка обеспечивает глубинность исследований до 150 м. В качестве опорного горизонта для ВЭЗ повсеместно выступает мощная толща сильно загипсованных верхнедевонских известняков (D_3fm , D_3f , палеозойский фундамент).

Методика работ. Работы проводились с использованием комплекта портативной электроразведочной аппаратуры — измерителя «МЭРИ-24» и генератора «АСТРА-100» [Куликов, Яковлев, 2008].

Рассмотрим особенности методики работ. **Фазово-частотный метод измерения вызванной поляризации.** Измерения вызванной поляризации осуществляются в частотной области. Предпочтение отдается фазово-частотному методу. Суть метода состоит в измерении фазового сдвига между гармониками прямоугольного импульса, заре-

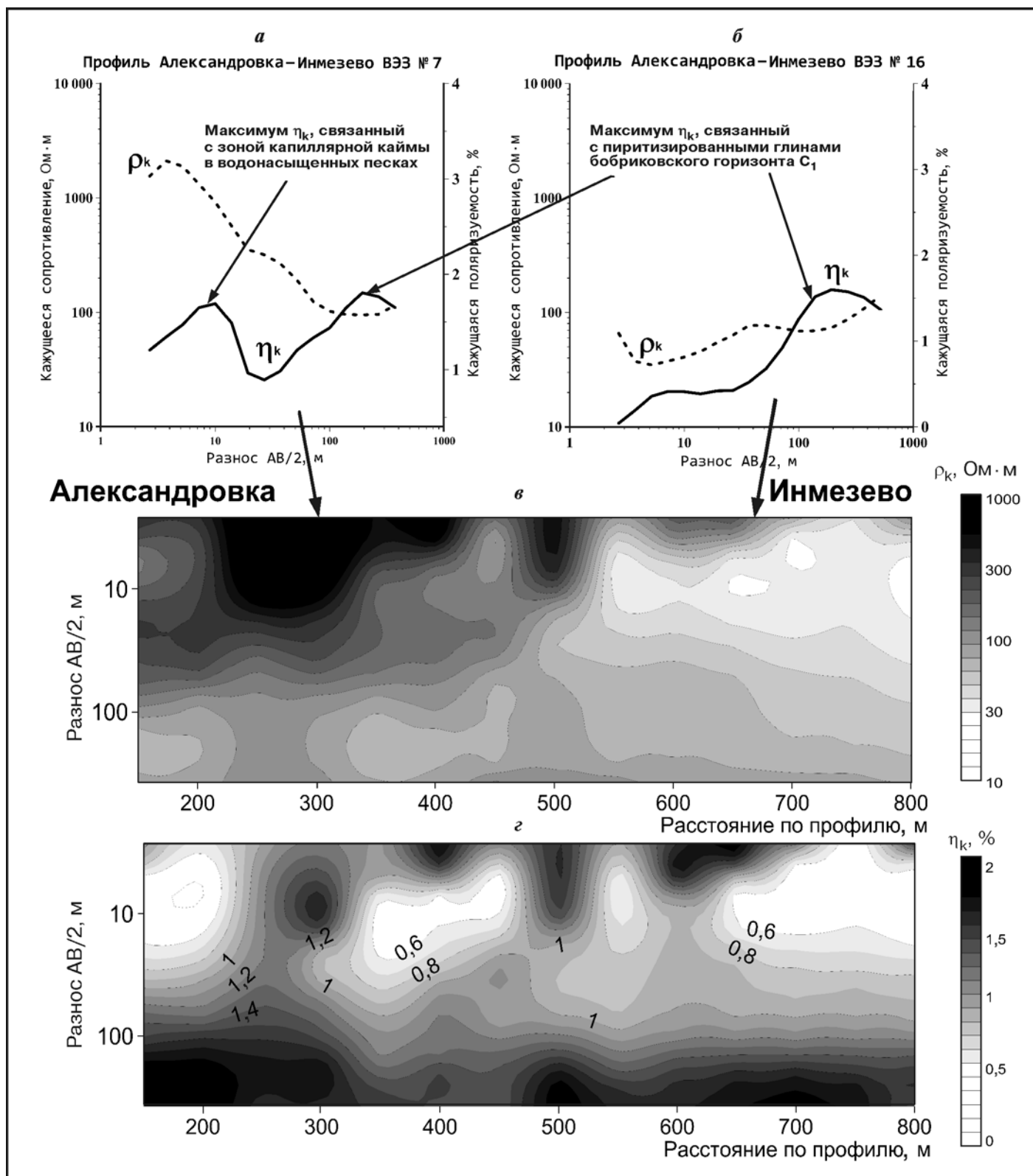


Рис. 3. Профиль Александровка–Инмежево (см. рис. 2): а, б — типичные кривые кажущего сопротивления и кажущейся поляризуемости; псевдоразрезы по профилю: в — кажущего сопротивления, г — кажущейся поляризуемости

гистрированного на приемной линии. Вычисляемый по фазовым сдвигам дифференциальный фазовый параметр

$$\Delta\varphi = [\omega_2 \varphi_1(\omega_1) - \omega_1 \varphi(\omega_2)] / (\omega_2 - \omega_1),$$

где ω_1, ω_2 — низкая и высокая частоты, между разными гармониками измеренного сигнала прямо пропорционален кажущейся поляризуемости $\eta_k = -2,5\Delta\varphi$. Преимущество фазово-частотного метода заключается в высокой помехозащищенности и подавлении фазо-

вых сдвигов, вызванных индукционными эффектами [Куликов, Шемякин, 1978].

Понижение рабочей частоты. Использование низкочастотного переменного тока в методе ВЭЗ, с одной стороны, позволяет существенно повысить точность наблюдений, а с другой — приводит к появлению различных проблем при проведении измерений.

При больших разнотах необходимо контролировать выполнение условий ближней зоны, так как начиная с определенных значений модуля $|kr|$, где k — волновое число, r — расстояние от приемника до источника, на результатах начнет сказываться индукционная составляющая электрического поля.

Другая проблема при использовании переменного тока — это наводки в приемной линии благодаря электромагнитной индукции между проводами, а также емкостные утечки с питающей линии в землю или непосредственно в приемную линию. Все эти искажения особенно негативно сказываются на измерениях дифференциального фазового параметра вызванной поляризации, но так как они пропорциональны частоте используемого тока, то их можно существенно снизить путем понижения рабочей частоты. При проведении работ методом ВЭЗ–ВП в большинстве случаев используется частота не более 1,22 Гц. На разнотах >300 м желателен использовать еще более низкую частоту, например 0,3 Гц. Несколько примеров многочастотных измерений ВЭЗ–ВП в районе работ показывают, что на частоте 9 Гц и выше получить положительный результат можно только на разнотах не более 50 м, на частоте 4,88 Гц — на разнотах до 150 м.

Разнесение приемной и питающей линий. Для установок, где приемная (MN) и питающая (AB) линии пространственно совмещены (в том числе установка Шлюмберже), вопрос о влиянии индукционных наводок и емкостных утечек стоит особенно остро. Из теории известно, что величина ЭДС индукции практически не затухает при увеличении расстояния между приемным и питающим проводами, но на практике видно существенное улучшение качества измерений при разнесенных даже на несколько метров линиях AB и MN.

Сопротивление питающей линии. Величина емкостной утечки прямо пропорциональна сопротивлению питающей линии AB, которое зависит преимущественно от сопротивления заземлений питающих электродов. От полного сопротивления линии AB зависит и уровень тока, который можно создать с помощью генератора.

Сопротивление приемной линии. Заявленное входное сопротивление измерителя «МЭРИ-24» 3 МОм. Формально допустимое сопротивление приемной линии в этом случае составляет несколько десятков кОм. Однако, как показывает практика, уже при сопротивлении линии $MN = 5$ кОм начинаются проблемы с измерением $\Delta\phi$. Желательно, чтобы сопротивление приемной линии не превышало этой

величины. Для измерения сопротивления приемной линии лучше использовать не обычный омметр, а генератор «АСТРА-100», который с помощью специальной встроенной функции можно использовать как омметр.

Величина пропускаемого тока. При работах методом ВЭЗ–ВП необходимо добиваться максимального сигнала на приемной линии, в том числе за счет использования всей мощности генератора. Если на первых 2–3 разнотах для получения устойчивого и надежного результата достаточно использовать ток 20–50 мА, то на всех последующих разнотах необходимо использовать максимально возможный ток с учетом условий заземления питающих электродов. С одиночными стальными электродами (для генератора «АСТРА-100») в подавляющем большинстве случаев удается добиться токов 140–200 мА в линии АВ. Наш опыт показывает, что в местах с невысоким уровнем промышленных помех, чтобы хорошо измерить дифференциальный фазовый параметр ВП, необходимо, чтобы сигнал на приемной линии составлял не менее 2 мВ. В местах с высоким уровнем промышленных помех желательно, чтобы сигнал на MN был не менее 10 мВ.

Типичные кривые ВЭЗ–ВП. На рис. 3–6 приведены типичные кривые кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости для мест проведения практики. Пунктирной линией показаны кривые кажущегося сопротивления, сплошной — кажущейся поляризуемости. Участки и профили, где получены эти кривые, представлены на рис. 1, 2.

В первом приближении геоэлектрический разрез в районе Александровской базы можно представить следующим образом. Опорным горизонтом для метода ВЭЗ (палеозойский фундамент) служит карбонатная верхнедевонская толща — озерский и хованский горизонты ($D_{3os} + hv$). В опорной Александровской скважине девонские известняки хованского горизонта вскрыты на глубине 112 м. На кривых кажущегося сопротивления опорный горизонт проявляется в виде правой восходящей ветви на разнотах $AB/2 > 200$ м.

Выше по разрезу залегает преимущественно терригенная толща бобриковского (C_{1bb}), тульского (C_{1tl}), малевского (C_{1ml}) и упинского (C_{1up}) нижнекаменноугольных горизонтов. Суммарная мощность этой толщи в Александровской скважине составляет 77 м. Малевский (C_{1ml}) и бобриковский (C_{1bb}) горизонты представлены глинами, тульский (C_{1tl}) — переслаиванием песка и глины, упинский (C_{1up}) — известняками. На кривых ρ_k эта терригенная толща проявляется минимумом на разнотах $AB/2 = 100 \div 200$ м.

Над песчано-глинистыми отложениями тульского (C_{1tl}) горизонта залегают карбонатные породы михайловского (C_{1mh}) и алексинского (C_{1al}) нижнекаменноугольных горизонтов. Их суммарная мощность в Александровской скважине составляет

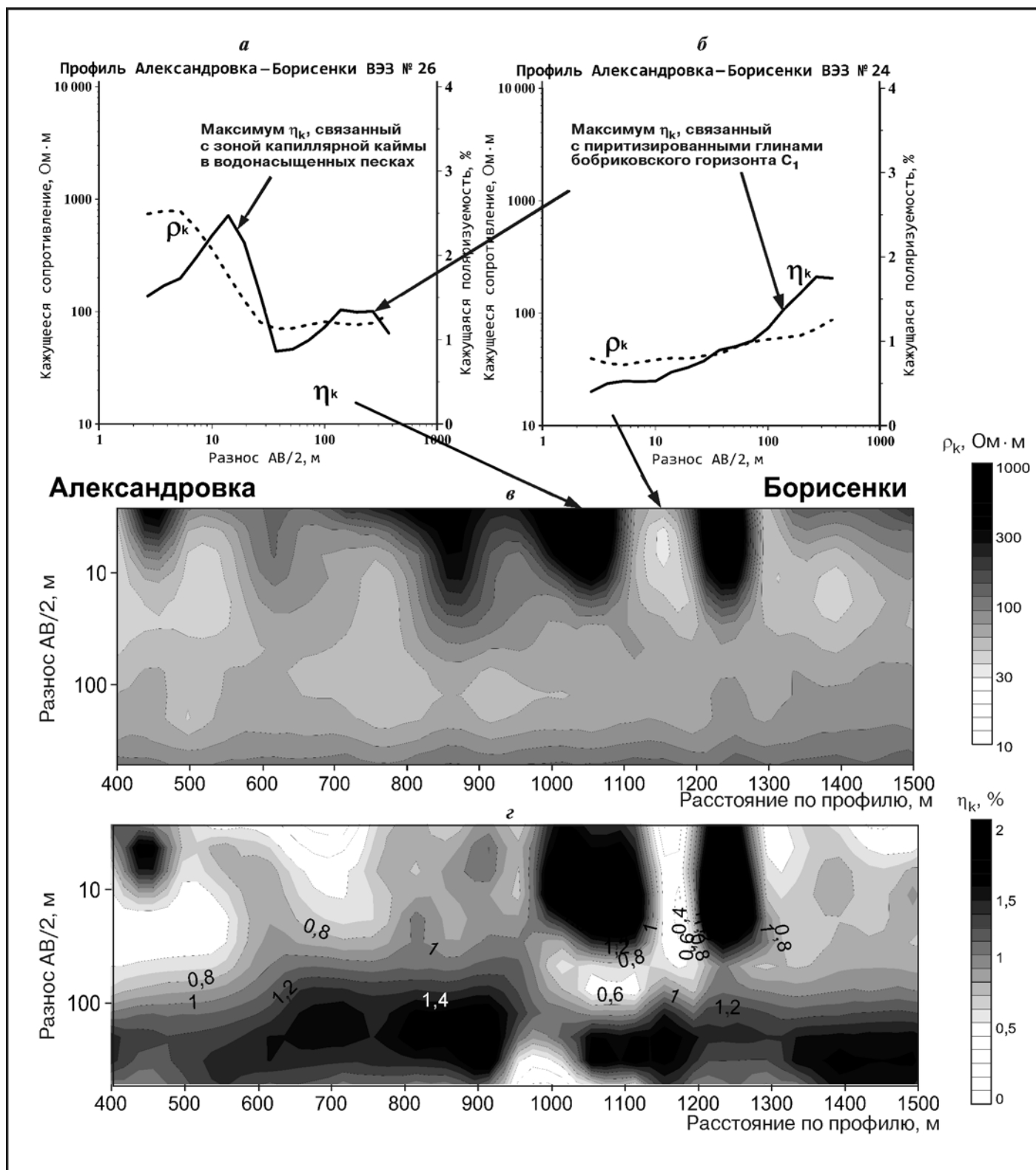


Рис. 4. Профиль Александровка–Борисенки (см. рис. 2): а, б — типичные кривые кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости; псевдоразрезы по профилю: в — кажущегося сопротивления, з — кажущейся поляризуемости

24 м. На кривой ρ_k этим карбонатным породам отвечает максимум в центральной части кривой на разносах до 100 м.

Четвертичные отложения верхней части разреза представлены преимущественно моренными

суглинками и супесями. Мощность моренных отложений максимальна на водоразделах (до 30–40 м) и уменьшается до нескольких метров в долинах рек. Удельное сопротивление моренных отложений в среднем составляет 30–50 Ом·м. В некоторых местах

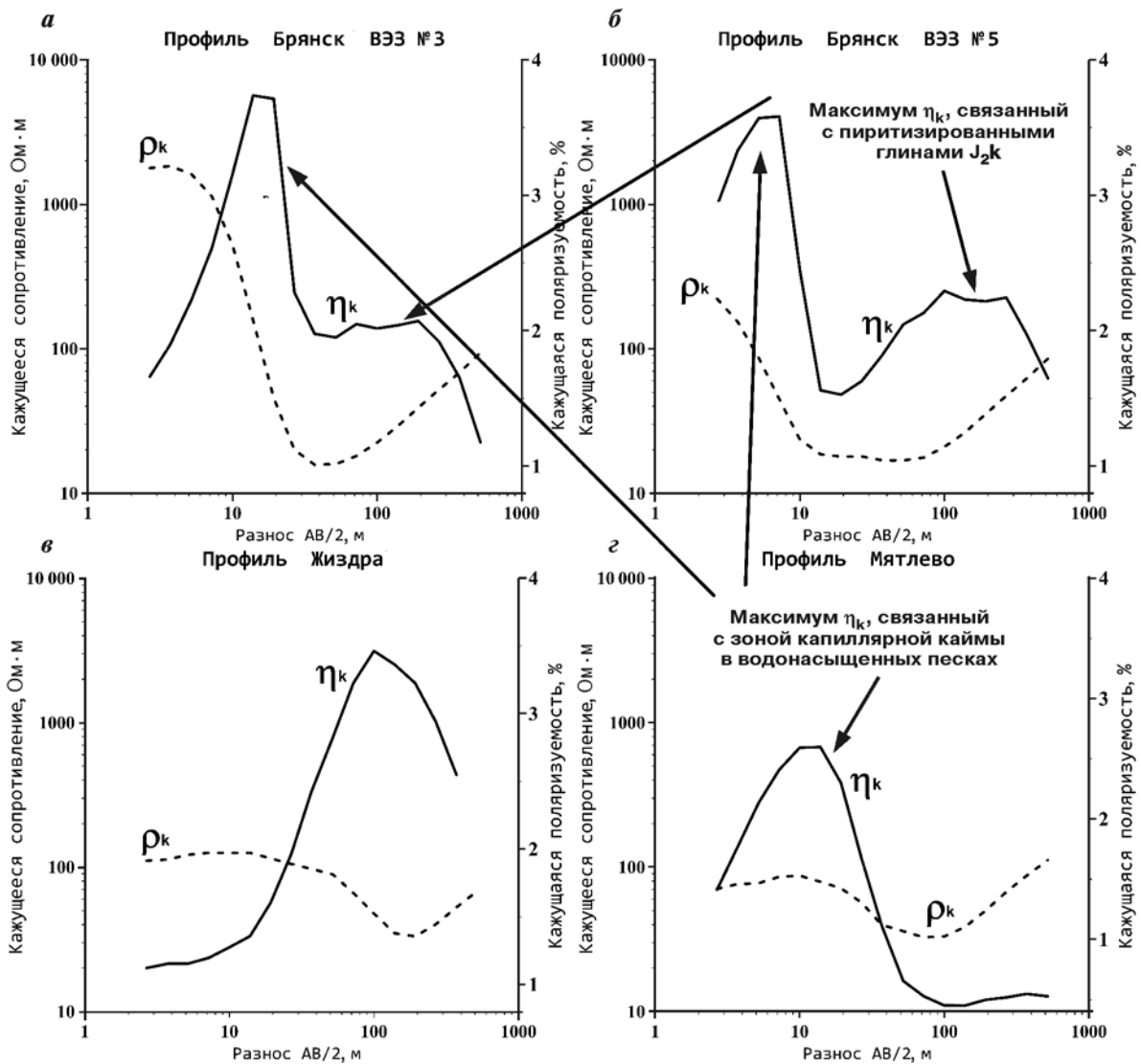


Рис. 5. Типичные кривые кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости для разных участков работ на территории Калужской области (см. рис. 1)

моренные песчано-глинистые отложения выходят непосредственно на поверхность, иногда они перекрыты песками аллювиального либо моренного происхождения. На тех участках, где моренные суглинки выходят непосредственно на поверхность, кривые кажущегося сопротивления начинаются с субгоризонтальной асимптоты $\rho_k \sim 40\text{--}50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 4, б). Там, где на поверхность выходят высокоомные пески, кривые ρ_k начинаются с нисходящей ветви, сильно меняющей форму всей кривой (рис. 3, а; 4, а).

Таким образом, для района Александровской базы можно выделить два основных типа кривых ρ_k — НКН и КНКН. Тип НКН наблюдается там, где проводящие моренные отложения выходят на поверхность, а тип КНКН характерен для участков, где моренные суглинки перекрыты более высокоомными песками (рис. 3, 4, а, б).

Среди кривых кажущейся поляризуемости также можно выделить два основных типа. Как и для кривых ρ_k , различия между ними связаны с присутствием

в приповерхностной части разреза высокоомных песков.

Первый — наиболее распространенный тип кривой η_k — кривая с одним максимумом на больших разносах (рис. 3, б; 4, б). При этом значения кажущейся поляризуемости на малых разносах отвечают фоновым и не превышают 1%. Максимум η_k (1,5–2%) проявляется на разносах более 140 м и связан, по нашему мнению, с пиритизированными глинами тульского (C_{1t1}) и бобриковского (C_{1bb}) нижнекаменноугольных горизонтов. Этот поляризуемый слой имеет широкое распространение и хорошо прослеживается на псевдоразрезах η_k (рис. 3, г; 4, г).

При наличии в приповерхностной части разреза песков с высоким сопротивлением выявлен второй тип кривых η_k — кривые с двумя максимумами (рис. 3, а; 4, а). Первый максимум кажущейся поляризуемости в этом случае отвечает глубине 2–5 м и связан с зоной капиллярной каймы верхнего водоносного горизонта, образующегося в песках. Факт по-

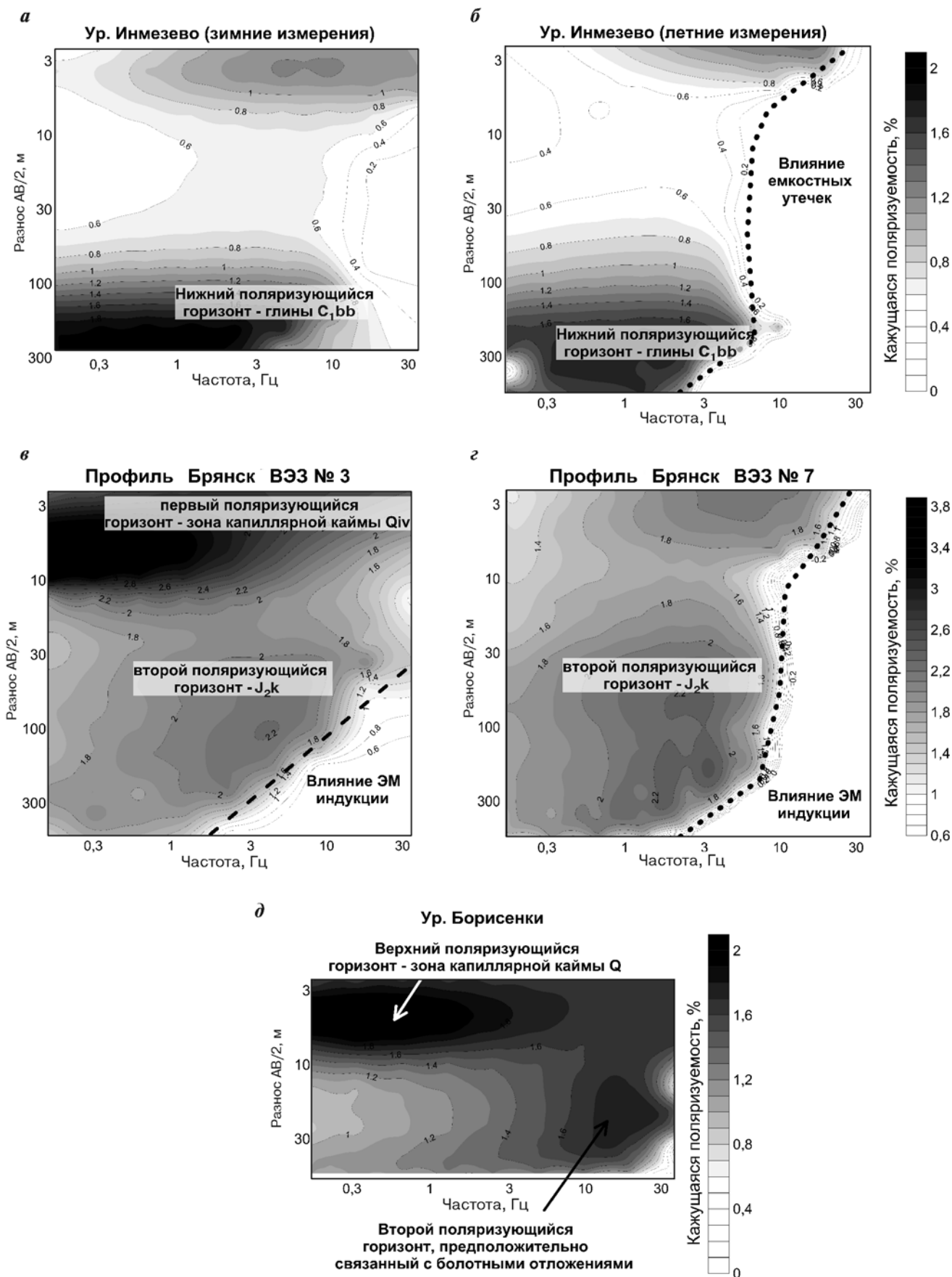


Рис. 6. Зависимость кажущейся поляризуемости (по дифференциальному фазовому параметру) от разноса и частоты на отдельных точках ВЭЗ–ВП (а–д)

вышения вызванной поляризации в зонах частичного водонасыщения в песчано-глинистых отложениях доказан и описан во многих работах предшественников [Огильви, 1990; Комаров, 1980]. Верхний максимум кривых η_k выражен ярче и в некоторых местах может достигать 2,8–3%.

Принципиально картина не меняется и на других участках работ, расположенных в удалении от Александровской базы. Первый максимум на кривых η_k всегда связан с высокоомными отложениями в приповерхностной части разреза (рис. 5, а, б, з), максимум, как правило, очень узкий, по нему точно восстанавливается кровля верхнего водоносного горизонта.

Нижний максимум на кривых η_k связан либо с пиритизацией в отложениях бобриковского горизонта, либо с электропроводящими включениями, которые присутствуют в мезозойских отложениях и появляются в разрезе южнее г. Калуга. Наиболее поляризующиеся горизонты мезозоя — глины келловейского яруса юры (J_{2k}) и готеривского–барремского (K_{1g-br}) ярусов нижнего мела с конкрециями пирита и сидерита [Бобров, 2006]. Вызванная поляризация в этих горизонтах по результатам подбора иногда превышает 4–5%.

Частотные зависимости вызванной поляризации.

Применяемая нами методика ИНФАЗ–ВП, когда измерения вызванной поляризации проводятся в частотной области, а расчет кажущейся поляризуемости осуществляется по фазовому параметру вызванной поляризации, позволяет, с одной стороны, избавиться от влияния индукционной составляющей на результаты измерений, а с другой — получить значения η_k на нескольких частотах. Сравнивая между собой частотные характеристики (ЧХ) η_k , можно делать выводы о различии природы аномалий вызванной поляризации. Форма частотной характеристики η_k зависит от многих факторов: минерального состава, размера и текстуры (структуры) электропроводящих включений, минерализации и химического состава пластовых вод и т.д., поэтому частотные характеристики η_k для каждого участка будут уникальны.

Измерение ЧХ требует много времени, поэтому проводится только на отдельных, самых аномальных точках ВЭЗ–ВП. Приведем несколько примеров снятия ЧХ как на точках, расположенных вблизи Александровской базы, так и для измерений, выполненных на юге Калужской области.

Частотные разрезы кажущейся поляризуемости обычно представляют в виде карт изолиний η_k от разноса по оси ординат и от частоты по оси абсцисс (рис. 6), масштаб осей логарифмический.

На рис. 6, а, б показаны результаты измерений ЧХ η_k для двух точек ВЭЗ–ВП, в ур. Инмезево (рис. 2, 3, в, з). Точки ВЭЗ–ВП расположены на незначительном расстоянии одна от другой. Тип кривой кажущейся поляризуемости — НК, с одним максимумом на больших разносах. Поляризующийся горизонт в верхней части разреза, связанный с зоной

капиллярной каймы, отсутствует. Отличие этих двух измерений состоит в том, что одно (рис. 6, а) проводилось зимой 2012 г. при температуре -20°C , а второе (рис. 6, б) — летом 2012 г. в сырую погоду после дождя. Принципиально картины частотной зависимости кажущейся поляризуемости для обоих измерений не различаются. Поляризующийся горизонт, связанный с пиритизацией отложений бобриковского горизонта (C_{1bb}), начинает проявляться с разноса 80 м, имеет максимум на разносе 300 м и пологую низкочастотную частотную характеристику η_k с максимумом на низких частотах.

На последних разносах выделяется область отрицательных значений η_k , граница которой характеризуется линейной зависимостью между разносом и частотой. Эти искажения мы связываем с влиянием электромагнитной индукции. В частотной области при помощи дифференциального фазового параметра ВП не удается полностью избавиться от индукционного фазового сдвига в сигнале. Лучше всего это проявилось в результатах, полученных на профиле Брянск в 2012 г. (рис. 6, в, з).

Две точки ВЭЗ–ВП получены на одном профиле на расстоянии примерно 1 км одна от другой. Измерения на ВЭЗ № 3 проводились в сухую погоду, на ВЭЗ № 5 — после дождя. На кривых η_k выделяются два поляризующихся горизонта. Верхний максимум кажущейся поляризуемости ($AB/2 = 5 \div 7$ м) предположительно связан с зоной капиллярной каймы. На кривой ρ_k ему отвечает крутая нисходящая ветвь (рис. 5, а). Значения η_k на разносе 14 м достигают 3,8% (рис. 5, а, б), а максимум кажущейся поляризуемости приходится на самые низкие частоты измеряемого диапазона — 0,15 Гц (рис. 6, в). Второй поляризующийся горизонт связан с отложениями келловейского яруса средней юры (J_{2k}) и проявляется на разносах 70–140 м. Максимум менее интенсивный (~2,2%), а по частотам наибольшие значения приходятся на диапазон 2–4 Гц. В точке ВЭЗ № 7 профиль выходит за пределы крупной линзы песка, здесь на кривых η_k отсутствует верхний максимум, связанный с кровлей первого водоносного горизонта. Таким образом, два поляризующихся горизонта хорошо разделяются по положению максимума η_k в частотной области, и, проводя измерения ВП по фазовому параметру, например, на частоте ниже 0,3 Гц, можно пропустить нижний поляризующийся горизонт, а на частоте >3 Гц — верхний.

Еще один пример разделения двух поляризующихся горизонтов приведен на рис. 6, д. Этот результат получен нами в ур. Борисенки, в 2 км на восток от Александровской базы (рис. 2). Верхний, низкочастотный максимум $\eta_k > 2\%$ на разносах 4–6 м по аналогии с другими результатами связан с верхней кромкой грунтовых вод в четвертичных песках. Второй максимум η_k , зафиксированный на разносах 20–26 м, максимально проявляется на очень высоких частотах (>10 Гц). Наличие максимума на

этих разнотах не характерно для кривых кажущейся поляризуемости в районе Александровской базы. Природа этого поляризующегося горизонта пока до конца не ясна. В результате бурения скважины глубиной 8 м вскрыта и до конца не пройдена мощная толща черных болотных отложений. Возможно, эти осадочные породы содержат вкрапления магнетита, так как аномалии ВП сопутствует заметная аномалия в постоянном магнитном поле.

Заключение. За 20 лет проведения электроразведочных практик для студентов геологического факультета МГУ на полигоне около Александровской базы в Калужской области нами накоплен богатый опыт проведения и интерпретации вертикальных электрических зондирований с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ–ВП). За счет незначительного совершенствования методики измерений сегодня удастся получить данные одинаково хорошего качества как по сопротивлению, так и по поляризуемости вплоть до разностей ~500 м без существенного увеличения времени измерения относительно простого ВЭЗ. Разнос $AB/2 = 500$ м в условиях этого геоэлектрического разреза обеспечивает глубинность 120–140 м, т.е. зондирование вплоть до кровли палеозойского фундамента.

При интерпретации данных ВЭЗ–ВП наличие кривых кажущейся поляризуемости в дополнение к кривым ρ_k значительно упростит процесс подбора и позволит сузить область эквивалентных решений обратной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобров С.П. Тектоника и минерагения Калужской области и прилегающих к ней территорий. Калуга: Эйдос, 2006. 336 с.

Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1980.

Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978.

По данным ВЭЗ–ВП в наддевонской части разреза выделяются два горизонта с высокой поляризуемостью. Нижний горизонт распространен на всей изучаемой территории и связан с пиритизированными глинами тульского (C_{1tl}) и бобриковского (C_{1bb}) нижнекаменноугольных горизонтов на глубине 60–100 м.

Верхний поляризующийся горизонт появляется только над обширными линзами песков в приповерхностной части разреза и связан, по нашим предположениям, с зоной капиллярной каймы первого водоносного горизонта.

Методика ИНФАЗ–ВП, когда измерения вызванной поляризации проводятся в частотной области, а расчет кажущейся поляризуемости осуществляется по фазовому параметру ВП, позволяет получить значения η_k на нескольких частотах. Сравнивая между собой частотные характеристики ЧХ η_k , можно сделать выводы о природе аномалий ВП. По результатам многочастотных измерений η_k в районе геофизической базы МГУ установлено, что нижний поляризующийся горизонт пиритизированных углей бобриковского горизонта (C_{1bb}) имеет частотную характеристику с пологим широким максимумом и хорошо проявляется во всем диапазоне рабочих частот. Максимум η_k , связанный с кровлей грунтовых вод, носит низкочастотный характер и может быть уверенно измерен только на частотах меньше 2,44 Гц.

Куликов В.А., Яковлев А.Г. Применение новой аппаратуры производства ООО «Северо-Запад» при гидрогеологических и инженерных электроразведочных работах // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 8–10.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990.

Поступила в редакцию
03.09.2012