

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Геологическая интерпретация результатов электроразведки при решении гидрогеологических задач

В. В. Агеев (ЦГЭМИ ИФЗ РАН)

Рассмотрено несколько примеров решения гидрогеологических задач в условиях мерзлоты, когда только комплекс методов и привлечение дополнительных геологических данных позволяют правильно трактовать результаты электроразведочных работ и выполнить их геологическую интерпретацию. Рассмотрены случаи, когда талые песчано-гравийные горизонты характеризовались очень высокими значениями удельного сопротивления и для выделения таких таликов важным был учет минерализации грунтовых вод и проявления специфической быстрой вызванной поляризации. Также учет ВП важен при разбраковке аномалий пониженного удельного сопротивления на связанные с трещиноватыми обводненными зонами и графитизированными областями.

Ключевые слова: электроразведка, метод ЗСБ, мерзлота, гидрогеология, быстрая вызванная поляризация.

Geological interpretation of electrical exploration results in solving hydrogeological problems

V. V. Ageev (GEMRC IFZ RAS)

Several examples of solving hydrogeological problems in permafrost conditions are considered, where only a combination of methods and additional geological data made it possible to correctly interpret the results of electrical exploration work and perform their geological interpretation. Cases are considered where thawed sand and gravel horizons were characterized by very high resistivity values. To identify such taliks, it was important to consider groundwater mineralization and the manifestation of specific fast-decaying induced polarization. Considering the IP is also important for distinguishing low resistivity anomalies between those associated with fractured, water-saturated zones and those associated with graphitized areas.

Keywords: electrical prospecting, TEM, permafrost, hydrogeology, fast-decaying induced polarization.

Введение

Конечная цель любых геофизических исследований — это правильная геологическая интерпретация полученных данных, которая определяет практическую ценность работы. В частности, решая гидрогеологические задачи методами электроразведки, мы сталкиваемся с многофакторностью зависимости удельного сопротивления горных пород от разных характеристик — литологии, трещиноватости, минерализации грунтовых вод, возможной графитизации и рудной вкрапленности, криогенного состояния и т. д. При такой неоднозначности для правильного истолкования результатов измерений важен учет всех известных геологических факторов и понимание того, какое строение и состояние пород участка возможно. В комплексе с другими электрическими характеристиками кроме удельного электрического сопротивления (УЭС) очень полезно получать информацию о быстрой вызванной поляризации (БВП), которая зависит от криогенных параметров и отсутствует в талых областях [1]. Также важно учитывать минерализацию вод для правильных выводов.

В настоящей статье акцент сделан именно на заключительный этап интерпретации — на геологические выводы. На нескольких примерах рассмотрим возникающие сложности при решении гидрогеологических задач при наличии многолетнемерзлых пород в разрезе. Это связано с тем, что в зависимости от разных особенностей участков исследования УЭС мерзлых пород может меняться от первых единиц Ом*м до сотен тысяч.

Проявление БВП при работах на мерзлоте

При описании вызванной поляризации обычно используют феноменологические формулы, описывающие частотно-дисперсные свойства среды, например формулу Cole-Cole, описывающую макропроводимость диспергирующей среды как функцию частоты [1]:

$$\hat{\sigma}(\omega) = \sigma_{\infty} \left(1 - \frac{\eta}{1 + (i\omega\tau)^c} \right).$$

Здесь σ_{∞} — проводимость среды на высоких частотах, а η , τ и c — параметры Cole-Cole (поляризуемость, постоянная времени ВП и показатель затухания). Мерзлые, особенно льдистые разрезы характеризуются специфической БВП с очень малыми значениями τ и показателем c , близким к 1. В методе ЗСБ поле БВП имеет направление, противоположное индукционному становлению, и может приводить к смене знака на кривой ЗСБ. Его интенсивность зависит от геометрии и размеров установки. Для совмещенной установки ЗСБ вклад БВП уменьшается при увеличении размера петли. Но эта закономерность верна, когда мерзлые породы залегают на поверхности или на глубине

первых метров. Если мерзлота на глубине 10–20 метров, то такой линейной зависимости нет. На рисунке 1 приведен пример кривых ЗСБ с установками разного размера на двух точках с разной глубиной до мерзлоты. Для петель размером 50 × 50 м интенсивность экстремума БВП на 100 мкс примерно одинакова. Однако дополнительные измерения с маленькой петлей 25 × 25 м сразу позволяют ответить на вопрос о глубине до мерзлоты. На первой точке интенсивность БВП возросла до смены знака. А на точке с заглубленной мерзлотой изменений нет.

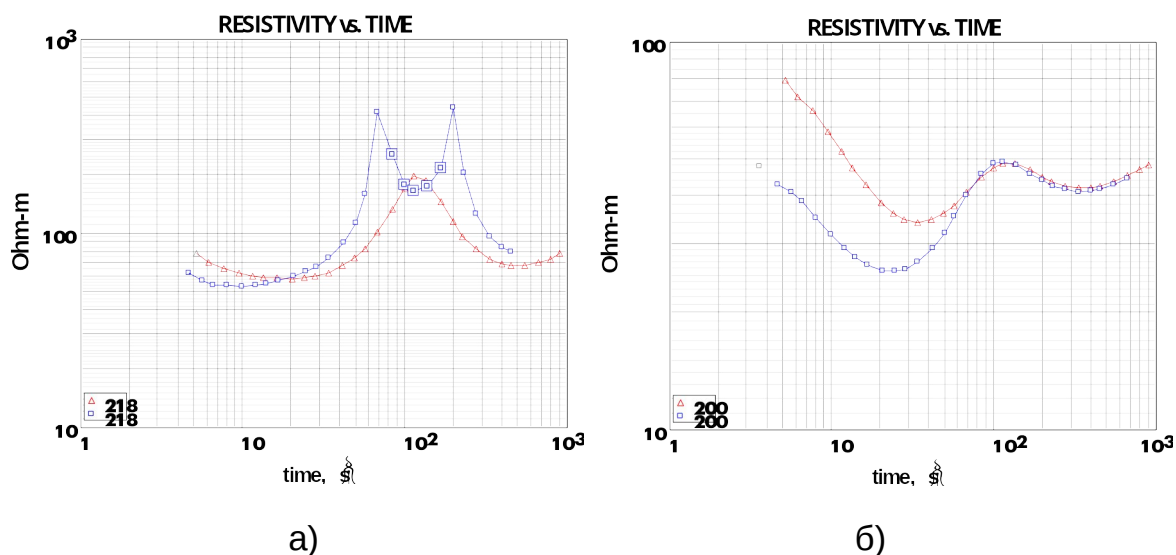


Рисунок 1. Кривые ЗСБ с петлями разного размера (красные кривые для петель 50 × 50 м, синие — для петель 25 × 25 м на двух точках с разной глубиной до кровли мерзлоты: а — мерзлота на глубине менее метра, б — мерзлота на глубине 15 м

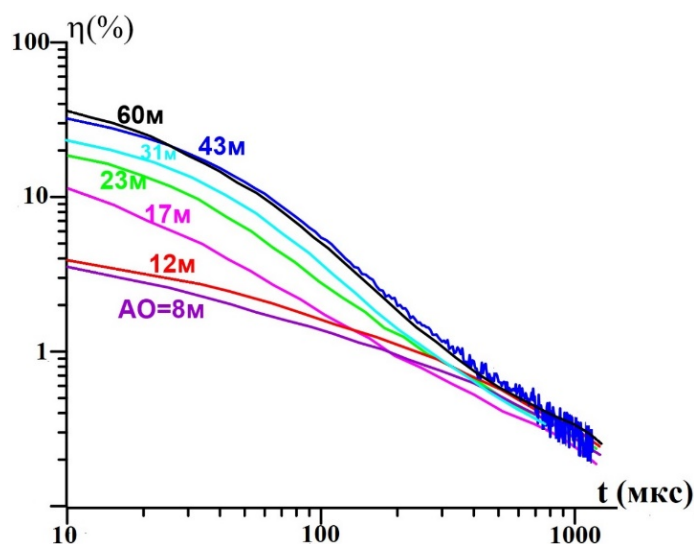


Рисунок 2. Кривые спада ВП в интервале времен 10–1000 мкс для разных разносов с ортогональной гальванической установкой на точке с мерзлотой на глубине 15 м

Процессы БВП, связанные с мерзлотой, наблюдаются не только при работах с индукционными установками ЗСБ, но и с гальваническими установками ВЭЗ-ВП в микросекундном диапазоне. Примеры таких кривых спада БВП для ортогональной установки с разными разносами в той же точке с заглубленной мерзлотой приведены на рисунке 2. Только выполнение ВЭЗ-ВП более трудоемко, а провести эксперимент с малой петлей очень просто, что позволит сразу оценить глубину до мерзлоты.

Примеры проблем при решении гидрогеологических задач

Первый пример работ на Уренгойском месторождении методом ЗСБ. Для перерабатывающего завода требовалось много воды, а все выделяемые подрусловые и подозерные талики попадали в закрытые водоохранные зоны. Фрагмент геоэлектрического разреза приведен на рисунке 3.

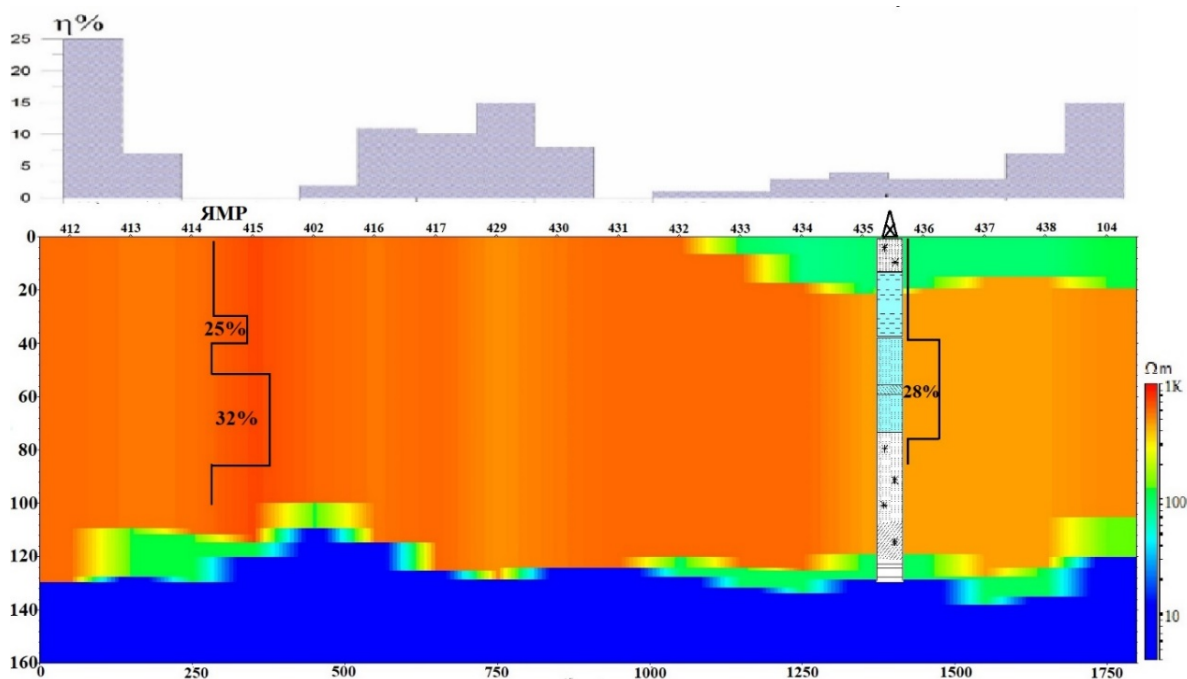


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез по данным ЗСБ на Уренгойском месторождении, и над ним график интенсивности проявления БВП. На разрез наложены выделенные водоносные интервалы с содержанием свободной воды, полученные по результатам ЯМР зондирования

Он интересен тем, что расположен в 500 м от реки, верхние 120–130 м высокоомные с УЭС до 1000 Ом*м без очевидных проводящих зон, указывающих на возможный талик. Однако по графику поляризуемости БВП выделяются участки профиля, на которых на кривых ЗСБ нет проявления БВП, характерной для мерзлых пород. С целью повышения однозначности интерпретации геофизических данных эти области были заверены исследованиями методом ЯМР-зондирования, что позволило расчлнить гидрогеологический разрез по принципу «мерзлые — талые» водоносные интервалы. На приведенной буровой колонке голубым цветом

выделен вскрытый талый очень водообильный горизонт хорошо промытых песков. Таким образом, информация о БВП позволила предположить перспективность участка и после дополнительных исследований и заверки бурением успешно оборудовать водозабор.

В районах без мерзлоты полезно обращать внимание на классическую ВП. При гидрогеологических исследованиях по выделению ослабленных трещиноватых водообильных зон основной упор делают на анализ УЭС и выделение участков его понижения. Однако в рудных районах, в местах развития черносланцевых пород, в угольных провинциях электронная проводимость пород может оказывать на УЭС большее влияние, чем гидрогеологические условия. Дополнительные оценки ВП в выделенных зонах необходимы для разбраковки типов аномалий. Часто не надо включать в комплекс работ метод ВП по всей площади. Достаточно сделать оценки ВП в аномальных зонах. А если работы выполняются с гальваническими установками с современной измерительной аппаратурой типа «МЭРИ», в которой автоматом выдается результат измерения на нескольких гармониках и фазовая характеристика ВП, надо просто не игнорировать эту оценку ВП.

Второй пример возникающих сложностей содержательных геологических выводов связан с работами в Якутии. Акцентируется внимание на важности учета информации по минерализации подземных вод. На объекте источник, перспективный для добычи подземных вод, — аллювиальные валунно-галечные отложения в долинах рек. Необходимо было определить их мощность и водообильность (материал заполнителя). Территория горная. Удельные сопротивления — единицы и десятки $\text{кОм}\cdot\text{м}$. Основной объем информации был получен с гальванической установкой. На рисунке 4а приведен фрагмент геоэлектрического разреза на первом участке. Долина реки врезана в архейские граниты и гранитогнейсы с УЭС до 10 и более $\text{кОм}\cdot\text{м}$. Талые валунно-галечные отложения, выполняющие долину, имеют УЭС 1–2 $\text{кОм}\cdot\text{м}$ и уверенно выделяются на разрезе, образуя врез мощностью более 60 м.

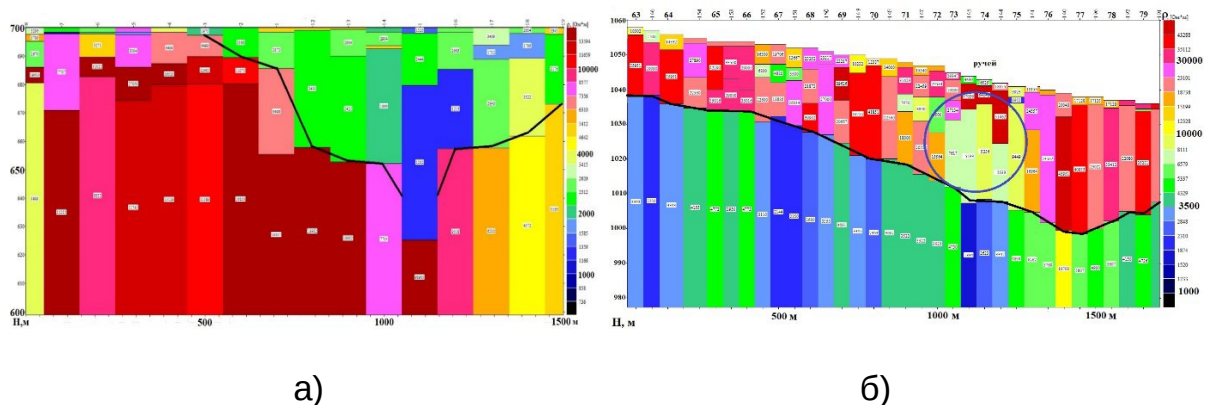


Рисунок 4. Геоэлектрические разрезы по данным ВЭЗ: а) в долине р. Токко; б) вдоль второго ручья

Этот результат был заверен бурением с последующим размещением водозабора. Минерализация воды в реке 0.04–0.07 г/л, что соответствует УЭС воды 150–250 Ом*м и УЭС гравийно-галечных отложений 1000–2000 Ом*м. Если их УЭС становилось более 10000 Ом*м, то делался вывод об их мерзлом состоянии.

Неожиданной оказалась ситуация на втором обследованном ручье, расположенном всего в 10 км от первого участка. Там геоэлектрическая ситуация зеркальная (рис. 4б). Коренным основанием являются более низкоомные рифейские красноцветные песчаники с УЭС около 1000–2000 Ом*м, а аллювиальные гравийно-галечные отложения мощностью от 20 до 40 м высокоомные с УЭС 8–40 кОм*м. Первоначальный вывод — все мерзлое.

Долина ручья узкая, ограничена достаточно крутыми склонами, покрытыми курумником (рис. 5). Площадь водосбора невелика, количество осадков ограничено. Курумы обладают собственными весьма специфичными свойствами. Они аккумулируют в своем «теле» атмосферную влагу, и в куруме может круглогодично образовываться и сохраняться лед и фирн. Курум является аккумулятором холода. В Бурятии и Читинской области, по данным Н. А. Вельминой [2], до 20 % подземных вод образуется за счет конденсации атмосферной влаги в курумах. От таяния снега и фирна в «теле» курума и образуются водные потоки и обеспечивается подрусловой сток практически дистиллированной воды.

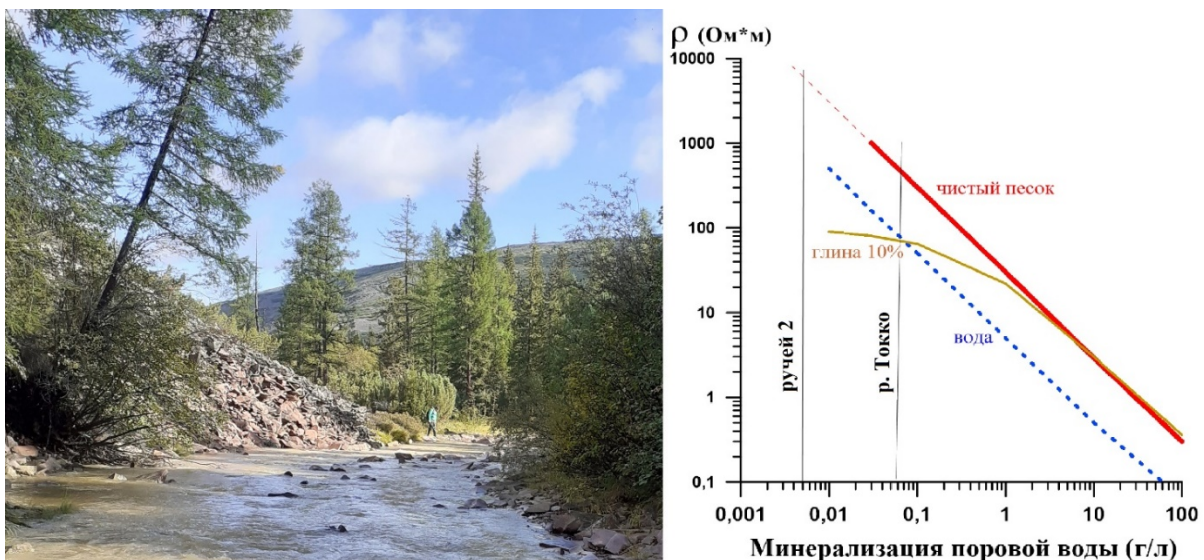


Рисунок 5. Вид на ручей в окружении курумника и зависимость УЭС песка от минерализации поровой влаги (по Рыжову А. А.)

Разрез контрастный, мощность аллювия определяется надежно. Вода ультрапресная с минерализацией 0.001–0.005 г/л (УЭС более 2000 Ом*м). При такой воде УЭС аллювиальных гравийно-галечных отложений может

даже в талом состоянии быть порядка 10 КОм*м. Это следует из рассмотрения зависимости УЭС песка от минерализации, взятой из работы Рыжова А. А. [3] и показанной на рисунке 5. С учетом этих рассуждений мы уже не можем уверенно утверждать, что весь ручей проморожен. Выделенный на геоэлектрическом разрезе овалом (рис. 4б) участок в районе бокового распада и впадения ручья-притока с относительно пониженными значениями УЭС аллювия до 8–9 КОм*м может оказаться талым. Это предположение было подтверждено разведочным бурением. Правда, «резервуар» был заполнен водой полностью только во время исследований летом и дренировался зимой.

Третий пример тоже иллюстрирует важность учета минерализации воды, только на этот раз поверхностной. Работы методом ЗСБ выполнялись зимой со льда Финского залива в районе Санкт-Петербурга для поиска песка на дне для намыва на берег. Контрастный геоэлектрический разрез по одному из профилей представлен на рисунке 6.

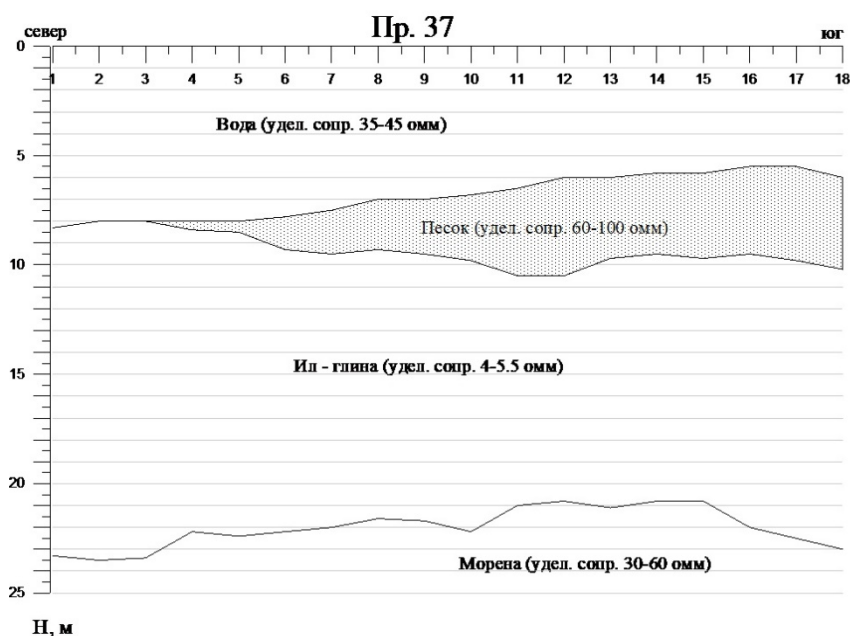


Рисунок 6. Геоэлектрический разрез по одному из профилей на акватории Финского залива

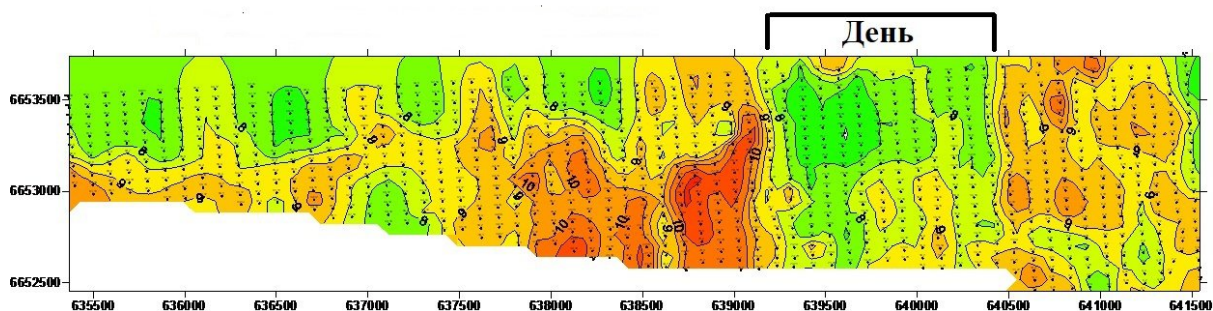


Рисунок 7. Фрагмент карты глубины до подошвы песка

По результатам работ была построена карта глубины подошвы слоя песка, приведенная на рисунке 7. Там же отмечены точки измерений ЗСБ.

Важная деталь заключается в том, что в начале работ было пробурено несколько лунок и измерено УЭС воды порядка 40 Ом*м и при интерпретации оно фиксировалось. При рассмотрении этой карты настораживал факт приуроченности резкого изменения определяемой глубины к завершению одного рабочего дня и началу следующего. На рисунке 7 отмечен участок, отснятый за один день. Объяснение этого факта было получено позже при работах летом, когда измерение УЭС воды выполнялось регулярно. Оказалось, что день ото дня УЭС воды менялось в разы от 25 Ом*м до 60–80 Ом*м в зависимости от ветра. Если ветер нагонял солоноватую воду с залива, УЭС падало. В противном случае пресная нельская вода повышала УЭС.

С изменением солености воды в зависимости от нагонных явлений мы сталкиваемся при работах на акватории морей вблизи впадения рек. Контраст в УЭС, конечно, меньше, но достаточный, чтобы выполняемые по инструкции контрольные измерения ЗСБ в разные дни отличались от рядовых гораздо больше допустимой погрешности. И это не точность наших измерений, а изменение разреза во времени.

Выводы

На нескольких примерах решения гидрогеологических задач показано, как важно для геологически содержательных выводов выбирать достаточный комплекс методов и параметров, дающих независимую информацию о свойствах пород. При работах на мерзлых разрезах, учитывая многофакторность зависимости УЭС горных пород от разных характеристик, кроме УЭС очень полезно получать информацию о БВП, которая зависит от криогенных параметров. Обычно она берется из данных ЗСБ. Но с гальванической установкой, если проводить измерения методом ВЭЗ-ВП в микросекундном диапазоне или в частотной области на частотах от 1 кГц до 10 кГц, можно получать ту же информацию о БВП, иногда более полную. Проблема в аппаратных разработках в этом направлении, которую предстоит решить.

Обязательной составляющей любых электроразведочных работ на воду является учет минерализации подземных вод. Это позволяет обоснованно делать геологические заключения, а стоимость этих дополнительных работ ничтожна. В специфических прибрежных условиях работ на акватории, связанных с изменением солености, мы фактически изучаем разрез с изменяющимся во времени УЭС верхнего слоя, что необходимо контролировать и учитывать при производстве работ.

В этом же ряду незначительного усложнения при работах методом ВЭЗ можно рекомендовать фиксировать и информацию о ВП. Это легко

сделать с имеющейся современной измерительной аппаратурой типа «МЭРИ», которая измеряет несколько гармоник и рассчитывает фазовый параметр ВП. Это позволяет разбраковать аномальные проводящие зоны на трещиноватые и графитизированные.

Важно все возможные дополнительные измерения и эксперименты продумывать и выполнять на этапе полевых работ.

Список литературы

1. Агеев В. В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач / Агеев В. В. // Разведка и охрана недр. — 2012. — № 11. — С. 45–49.
2. Вельмина Н. А. Гидрогеология центральной части Южной Якутии / Вельмина Н. А., Узембло В. В. // М.: Изд-во АН СССР, 1959.
3. Рыжов А. А. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач / Рыжов А. А., Судоплатов А. Д. // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. — 1990. — С.27–41.

References

1. Ageev V. V. Induced polarization processes study for geocryological tasks solution / Ageev V. V. // Exploration and protection of mineral resources. — 2012. — № 11. — P. 45–49.
2. Vel'mina N. A. Hidrogeologiya tsentral'noi chasti Yuzhnoi Yakutii / Vel'mina N. A., Uzemblo V. V. // M.: Izd-vo AN SSSR, 1959 (in Russ.).
3. Ryzhov A. A. Raschet udel'noi elektroprovodnosti peschano-glinistykh porod i ispol'zovanie funktsional'nykh zavisimostei pri reshenii gidrogeologicheskikh zadach / Ryzhov A. A., Sudoplatov A. D. Raschet // Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt v oblasti geologii i razvedki neдр. — 1990. — P. 27–41 (in Russ.).