ВСЕСОЮЗНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТРАССЕ БАМ

Одобрены Главтранспроектом

МОСКВА 1978

gost.e-ecolog.ru

ПРЕДИСЛОВИЕ

Снабжение водой населенных пунктов Байкало-Амурской магистрали представляет собой важную и сложную задачу. Для поисков и разведки подземных вод выполняется большой объем гидрогеологических изысканий, в комплекс которых входят и электроразведочные работы.

В настоящих Рекомендациях рассматриваются вопросы методики проведения полевых работ и интерпретации получаемых данных по одному из ведущих методов – вертикальному электрическому зондированию (ВЭЗ).

Рекомендации разработаны на основе результатов опытно-производственных работ, проведенных лабораторией инженерной геологии и геофизики ЦНИИС при участии Мосгипротранса, изучения литературных источников и опыта применения геофизических методов на трассе БАМ.

В разработке Рекомендаций участвовали инженеры В.Я.Пригода и В.С.Буркин, канд.техн.наук А.М.Горелик (ЦНИИС), канд.геол.-минералог.наук В.С.Бабин, инж. В.С.Беляев (Мосгипротранс), канд.геол.-минералог.наук С.А.Бойков и инж. Б.П.Петрухин (МГУ).

Работа предназначена для геофизиков и гидрогеологов проектно-изыскательских институтов.

Зам.директора института
Н.Б.СОКОЛОВ

Руководитель отделения изысканий
и проектирования железных дорог
А.М.КОЗЛОВ

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. По генетическим признакам и условиям циркуляции подземные воды районов трассы БАМ подразделяются на следующие типы:

I) трещинные и трещинно-жильные воды скальных массивов;

2) пластово-поровые воды артезианских бассейнов;

3) воды четвертичных и аллювиальных отложений.

По отношению к многолетнемерзлым породам подземные воды подразделяются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные [I] . Режим каждого типа вод зависит от положения их в мерзлотно-геологическом разрезе.

I.2. Надмерзлотные и межмерзлотные воды верхнего переходного горизонта с локальными таликами, заглубленными в мерзлые породы, обладают свободной поверхностью. Напор приобретается во время сезонного промерзания верхней части разреза (криогенный напор) в случае, когда мерзлые породы в виде "надвига" или "козырька" располагаются над талыми водоносными породами, или в других частных случаях.

Режим этих вод в течение года сильно меняется. Запасы в зимнее время сокращаются до минимальных. Наиболее значительные запасы подземных вод сосредоточены в долинах рек, где они могут быть использованы для небольших водозаборов.

I.3. Межмерзлотные воды залегают между верхней и нижней границами мерзлых пород; к ним относятся также воды сквозных таликов, служащих путями разгрузки и питания подмерзлотных горизонтов. Приурочены они обычно к зонам тектонического дробления скальных массивов, обладают большими динамическими запасами и являются надежными источниками водоснабжения.

I.4. Подмерзлотные, а также подмерзлотно-межмерзлотные воды развивающихся вверх таликов образуют один водоносный горизонт, залегающий непосредственно под нижней границей вечной мерзлоты. В скальных массивах воды этого

горизонта приурочены к зонам повышенной подмерзлотной трещиноватости, образовавшейся в результате вековых колебаний климата и связанных с ними многократными наступлениями и отступлениями мерзлоты, а также к зонам тектонических разломов и контактам пород различного петрографического состава. Подмерзлотные трещиноватые зоны обладают значительными запасами подземных вод и в большинстве случаев являются надежными источниками водоснабжения. Питание подмерзлотных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод по зонам дробления. Кроме того, как показывают наблюдения [2], мерзлота также не является непреодолимым барьером. Вода с поверхности по системе трещин проникает в подмерзлотный горизонт через всю толщу многолетнемерзлых пород.

I.5. В районах прерывистой мерзлоты, по каким в основном проходит трасса БАМ, следует различать талики и талые участки (массивы) пород. К первым надо относить зоны талых пород среди многолетнемерзлых, образованные за счет потоков подземных и поверхностных вод на участках пород значительной проницаемости. При этом талик может захватывать и прилегающие слабопроницаемые породы. К талым участкам относятся массивы с положительными температурами, которые принимают участие в мерзлотном строении района равнозначно с мерзлыми породами. Участки таких пород характеризуются обычными для данной литологии фильтрационными свойствами и своим образованием обязаны закономерностям исторического развития мерзлой зоны. В таком понимании талики всегда являются показателями участков повышенного обводнения пород, тогда как обширные участки талых пород поисковым критерием не служат. С таликами тесно связан характерный для мерзлой зоны процесс наледеобразования.

I.6. Наибольший практический интерес для водоснабжения станций и поселков трассы БАМ представляют межмерзлотные и подмерзлотные трещинные и трещинно-жильные воды скальных массивов, в меньшей мере используются пластово-поровые воды рыхлых отложений и аллювиальных образований

речных долин.

При поисках и разведке подземных вод, а также для выбора мест заложения разведочных гидрогеологических скважин наряду с геологической и гидрогеологической съемками в районах трассы БАМ широко применяют геофизические методы разведки.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

2.1. Эффективность применения геофизических методов и надежность получаемых результатов в большой мере зависят от правильно выбранной методики проведения полевых геофизических наблюдений, особенно при поисках и разведке подземных вод в районах распространения вечной мерзлоты прерывистого характера.

2.2. На стадии технико-экономического обоснования водозаборных участков геофизическую разведку проводят в два этапа.

На первом этапе при поисках подземных вод в скальных массивах широко используют магниторазведку для выявления зон тектонических нарушений и контактов пород различного петрографического состава, к которым зачастую приурочены трещиноватые обводненные породы.

На втором этапе при выявлении перспективных на воду участков применяют электроразведку методами электропрофилирования (ЭП) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

При поисках пластово-поровых вод в рыхлых отложениях межгорных артезианских бассейнов и речных долин как на первом, так и на втором этапе применяют электроразведку преимущественно методом ВЭЗ.

По результатам геофизических исследований с учетом данных гидрогеологической съемки выбирают наиболее перспективные места для заложения разведочных гидрогеологических скважин.

2.3. На стадии технического проекта и рабочих чертежей проводят детальное геофизическое обследование выявленных водоносных горизонтов, уточняют границы их распространения, мощности, глубины залегания и проводят каротаж скважин.

Основными задачами каротажа являются: расчленение пород по составу и степени сохранности, определение нижней границы мерзлоты, выявление мест водопритоков, и определение скоростей фильтрации подземных вод. При проведении наземных геофизических работ перед каротажем возникают также задачи по определению параметрических характеристик исследуемых пород, в частности, по данным каротажа определяют тип разреза, удельные сопротивления и мощности слоев, удельные сопротивления подземных вод и др., которые являются опорным материалом при интерпретации кривых ВЭЗ. Для решения этих задач выполняют боковое каротажное зондирование (БКЗ), резистивиметрию с засолкой воды, измеряют естественную поляризацию (ПС) до и после засолки воды, проводят расходометрию, кавернометрию, магнитометрию и радиоактивный каротаж.

2.4. Полевые работы по методу ВЭЗ на участках, где эти исследования ранее не проводились, начинают с выполнения небольшого объема рекогносцировочных ВЭЗ, по результатам которых обычно изучают основные элементы рельефа (русло, пойма, террасы, склоны, водоразделы) и участки их пределах, резко различающиеся по геолого-тектоническим условиям, характеру водопроявлений и т.д. Число рекогносцировочных зондирований на участке исследований обычно не превышает 20 точек. Для выбора пунктов постановки ВЭЗ используют имеющийся по району исследований литературный и фондовый материал, материалы аэрофотосъемки, данные съемочных и буровых работ, предшествующих или сопутствующих электроразведке. Цель этих ВЭЗ – получить общее представление о строении геоэлектрического разреза и типах кривых ВЭЗ (числе слоев, ориентировочных мощностях, величинах и соотношениях удельных электрических сопротивлений) на участках с различными мерзлотно-геологическими и гидрогео-

логическими условиями. Кроме того, данные предварительных зондирований облегчают выбор величины разносов установки электропрофилирования (ЭП).

2.5. Параметрические ВЭЗ выполняют вблизи скважин и других горных выработок, а также на обнажениях пород. При этом наибольший интерес представляет постановка зондирований и сравнение их данных на участках, где вскрыты и отсутствуют водоносные горизонты, на участках развития мерзлых пород, таликов и т.п.

2.6. При выполнении параметрических ВЭЗ особое внимание следует уделять возможным искажениям этих кривых за счет влияния негоризонтальных границ раздела, находящихся вблизи пунктов постановки зондирований. Наличие этих границ может быть связано с разломами, тектоническими нарушениями, с изменением состава и свойств пород по площади, а в условиях мерзлых пород - с присутствием сквозных и несквозных таликов, изменением глубины залегания мерзлых пород, их льдистости и мощности.

Существенные искажения кривых ВЭЗ могут вызвать неоднородности, связанные с техногенными процессами, развивающимися за счет нарушения растительного и почвенного покрова, изменения температурного и влажностного режима вблизи горных выработок. По этой причине параметрические ВЭЗ целесообразно выполнять на небольшом удалении от горных выработок, вне пределов площадок с нарушенными поверхностными условиями (обычно в 5–10 м от устья скважин и шурфов). Для обнаружения возможных боковых влияний необходима постановка крестовых, круговых симметричных или двусторонних трехполюсных ВЭЗ, крестовых ВЭЗ по методу двух составляющих. В пестрых геолого-мерзлотных условиях целесообразно проведение всего комплекса этих зондирований.

2.7. Основной объем ВЭЗ выполняют после предварительной обработки данных рекогносцировочных и параметрических зондирований, электропрофилирования, магнитометрии, а при исследованиях по днищам водотоков - и резистивиметрии поверхностных источников, ручьев, рек и водоемов. Размещение точек ВЭЗ по жесткой сети наблюдений, распространен-

мое в практике электроразведочных работ, нельзя признать рациональным. Выбор вида зондирования, пунктов наблюдений и направления разносов должны максимально способствовать исключению боковых влияний, негоризонтальных границ, а в тех случаях, когда боковые влияния неизбежны, - облегчить учет искажений при дальнейшей интерпретации.

Геофизические профили, в том числе профили ВЭЗ, обычно ориентируют вкрест простирания элементов рельефа или границ с определенным комплексом геолого-географических условий. Расстояния между профилями и точками ВЭЗ можно варьировать в широких пределах в зависимости от степени сложности и пестроты мерзлотно-геологических и гидрогеологических условий.

2.8. При площадных исследованиях данными ВЭЗ должны быть охарактеризованы все участки с различным комплексом рыхлых и скальных пород, различной растительностью, характером заболоченности или обводненности, характером микрорельефа и т.д.

Детальные работы по методу ВЭЗ целесообразно приурочить к участкам, которые по данным других методов разведки перспективны в отношении подземных вод. На остальных профилях зондирования можно выполнять по более редкой сети. Минимальные расстояния между ВЭЗ в самых сложных и пестрых условиях могут составлять 10 м, максимальные на относительно однородных по геолого-мерзлотным условиям участках - 200 м и более.

2.9. Пункты ВЭЗ в пределах отдельных профилей размещают в первую очередь в центральных частях исследуемых зон. При пересечении какой-либо зоны несколькими близлежащими профилями точки ВЭЗ ставят на максимальном удалении от контактов на участках, характеризующихся наибольшей горизонтальной однородностью. Точное положение центра зондирования определяется на местности. При этом приемные линии необходимо размещать на участках, наиболее однородных по характеру микрорельефа, обводненности и растительности. Особое внимание уделяют выбору пунктов постановки зондирований на участках, где встречаются мерзлые породы.

При нахождении последних вблизи приемных электродов искажения кривых ВЭЗ наиболее существенны и зачастую не поддаются учету. По этой же причине не рекомендуется выполнять зондирования на старых просеках, тропинках, обочинах дорог, по колеям, проложенным вездеходами, и т.п.

2.10. Объектами первостепенной важности могут быть участки, где наиболее сильно проявляется горизонтальная неоднородность разреза. К ним относятся зоны разломов и тектонических нарушений, сквозные талики различной формы и размеров, локальные участки разгрузки подземных вод и т.д. В этих условиях следует выполнять более сложные и трудоемкие виды зондирований (крестовые и круговые симметричной и двухсторонней трехэлектродной установкой, по методу двух составляющих). Выбирают наиболее рациональный вариант размещения пунктов ВЭЗ с одним направлением разносов.

2.11. Детально исследуют зоны сквозных таликов, через которые может осуществляться питание и разгрузка различных типов подземных вод. Условия талого состояния наиболее благоприятны для определения мощности и строения рыхлых и трещиноватых пород, выявления обводненных зон, определения истинных сопротивлений коренных пород различного состава, степени трещиноватости и обводненности, используемых и для интерпретации кривых ВЭЗ, выполненных в менее благоприятных условиях. Достоверность этих данных во многом предопределяется правильным выбором пунктов постановки и направления разносов ВЭЗ, поскольку боковые влияния мерзлых пород приводят к существенным искажениям кривых зондирований.

2.12. При выполнении ВЭЗ в линейновытянутых толщах, какими часто являются подрусловые талики и талики, связанные с тектоническими нарушениями, целесообразно ось зондирования размещать вдоль простирания таликов. В этом случае боковые влияния мерзлых пород минимальны и при постановке ВЭЗ вблизи контакта увеличение значений кажущихся сопротивлений $\rho_к$ не превышает двукратную величину. Постановка зондирований на расстояниях от границы талика,

превышающих двукратную мощность мерзлых пород, практически исключает боковые влияния. При исследовании узких протяженных таликов ориентировка оси зондирования вдоль таликов также оправдана. При этом, по крайней мере, в интервале разносов, не превышающих расстояние до контакта, можно получить достоверные значения $\rho_к$.

Зондирования аналогичной ориентировки целесообразно выполнять и при изучении строения зон разломов и тектонических нарушений как в условиях талого, так и в условиях мерзлого состояния пород.

Размещение оси зондирования вкрест простирания таликов может приводить к увеличению значений $\rho_к$ в десятки раз, к исчезновению на кривых ВЭЗ минимумов, отвечающих, например, водоносным горизонтам, к ошибочному выделению в разрезе мерзлых пород и т.д. и может быть рекомендовано только при выполнении крестовых и круговых ВЭЗ над таликами сложной конфигурации.

2.13. При исследованиях приконтактовых зон развития мерзлых пород оси зондирования следует ориентировать вдоль контакта, так как боковое влияние талых пород в этом случае проявляется с больших разносов, чем в случае перпендикулярной ориентировки. К тому же при перпендикулярной ориентировке наблюдаются наиболее резкие изменения значений $\rho_к$ кривых ВЭЗ, приводящие, в частности, к появлению дополнительных минимумов, что может быть ошибочно истолковано как признак существования горизонтов межмерзлотных и подмерзлотных подземных вод. Выполнение крестовых и круговых зондирований в значительной степени облегчает обнаружить и учесть боковые влияния талых пород.

2.14. Во всех случаях зондирований в пределах локальных зон точки ВЭЗ следует располагать по возможности симметрично относительно границ этих зон. Нередко границы мерзлых и талых пород имеют криволинейные очертания, что приходится учитывать при исследовании узких протяженных зон. При ориентировке оси зондирования вкрест простирания обычно удается расположить ее симметрично, сохраняя прямолинейность разносов. При размещении оси установки

вдоль простирания соблюдение прямолинейности может быть сопряжено с необходимостью выходов на отдельных разносах с таликов на участки развития мерзлых пород и наоборот. Это вносит дополнительные искажения в кривые ВЭЗ. Исходя из опыта практических работ, для уменьшения искажений иногда следует пренебречь прямолинейностью разносов, чтобы разместить питающие электроды в пределах однородного участка как мерзлых, так и талых пород. При этом допускаются только плавные отклонения питающей линии (до 10^0) от основного направления разносов.

2.15. *В журналах ВЭЗ необходимо составлять детальный* абрис по линии разносов с указанием смены элементов рельефа, гидрографических условий, растительности в обе стороны от центра установки. В частности, необходимо отметить интервалы разносов, на которых пересекаются водотоки, резкие перегибы рельефа и т.д. Это особенно важно, если на участке ВЭЗ по каким-либо причинам не проведены детальные работы по районированию территории, когда зондирование выполняется вне электропрофиля, или питающие линии ВЭЗ разносятся не по линии электропрофиля. Без детального изучения всего фактического материала невозможно провести надежную интерпретацию полевых геофизических материалов.

В районах развития мерзлых пород талики зачастую приурочены к руслам рек, ручьев, к озерам, заболоченным участкам, в ряде случаев труднопроходимым и непроходимым. Поэтому рекомендуемое при исследовании мерзлых зон размещение питающей линии вдоль примыкающих таликов сопряжено с необходимостью дополнительных затрат времени и средств. Еще большие осложнения возникают при выполнении зондирований вкрест таликов. Тем не менее для получения достоверных данных приходится не считаться с подобными трудностями производства работ.

3. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ ВЭЗ

3.1. Метод ВЭЗ из всех наземных геофизических методов, применяемых при поисках подземных вод на трассе БАМ,

несмотря на трудности интерпретации, являются пока единственным методом, позволяющим при благоприятных геоэлектрических условиях проводить количественную интерпретацию результатов наблюдений. С помощью этого метода удается определять глубину залегания кровли и подошвы мерзлых пород, глубину залегания подземных вод и приближенно оценивать их минерализацию. Повышению эффективности метода ВЭЗ способствует правильно выбранная методика полевых работ и учет искажающих факторов при обработке и интерпретации полевых материалов.

3.2. Основными факторами, затрудняющими интерпретацию кривых ВЭЗ, в связи с наличием мерзлоты в верхней части разреза, являются:

непостоянство мощности мерзлых пород, прерывистый характер залегания, наличие вертикальных и наклонных границ раздела между мерзлыми и талыми породами;

экранирующее влияние слоя сезонного протаивания и верхнего высокольдистого горизонта мерзлой толщи;

изменчивость удельного электрического сопротивления (УЭС) по площади и глубине, обусловленная изменением состава, льдистости и температуры пород;

слабая дифференциация пород по УЭС у подошвы мерзлой толщи;

сезонное изменение параметров геоэлектрического разреза и типов кривых ВЭЗ.

К этому следует добавить геоэлектрическую сложность зон тектонических разломов и контактов пород разного петрографического состава, к которым приурочены коллекторы трещинных и трещинно-жильных вод, а также влияние рельефа, особенно в долинах рек с крутыми склонами или сильно пересеченной местности, характерной для трассы БАМ.

Во многих случаях отмечается слабая коррелируемость кривых ВЭЗ по форме и величине УЭС.

3.3. Обработку полевых материалов начинают с группирования кривых ВЭЗ по крупным геоморфологическим элементам (речной долине, коренному склону, водоразделу и т.п.). При разнообразии типов кривых их разбивают по мелким элементам (русло, низкая или высокая пойма, терраса

и т.п.). Если и в этом случае на элементе существенно меняется характер кривых, проводят дальнейшее дробление групп кривых. Затем выполняют качественный анализ: устанавливают типы кривых и геоэлектрических разрезов. Наблюдаемые формы и типы кривых ВЭЗ часто обязаны боковому влиянию вертикальных и наклонных границ раздела мерзлых и талых пород, неровностям кровли мерзлых пород, градиентному изменению сопротивления по глубине, и не всегда отвечают реальному строению геоэлектрического разреза. Все это надо учитывать при анализе кривых.

3.4. Боковое влияние талых пород наблюдается при зондировании вблизи сквозных таликов. Характер этого влияния представлен на рис. I , где показаны кривые, полученные моделированием и графическим построением [3] . При ориентировке оси зондирований вдоль границы раздела мерзлых и талых пород (рис.I,а) боковое влияние последних проявляется по сравнению с исходной кривой для горизонтально однородных сред ($d / h_2 = \infty$) в раннем спаде правой ветви и смещения $\rho_{к,max}$ влево-вниз, что при интерпретации приводит к занижению мощности мерзлых пород. При этом отклонение кривых от исходной возрастает с уменьшением расстояния от центра зондирования до таликов.

При зондировании вкрест границе раздела (рис.I,б) на кривых наблюдается резкий спад значений $\rho_к$. Вид кривых ВЭЗ существенно меняется, и в некоторых случаях кривые типа К трансформируются в кривые типа КНК. Экспериментальные кривые такого типа приведены на рис. 5. Появление элемента Н может быть сопряжено с наличием не только сквозных таликов, но и термокарстовых впадин, заболоченных участков, пересекаемых разносами установки ВЭЗ.

Элемент Н может быть формально истолкован как признак существования межмерзлотного талика или горизонта подземных вод. Истинную причину такого рода аномалий устанавливают по результатам кругового трехполюсного ВЭЗ, помогающего выявить боковые образования.

3.5. Боковое влияние мерзлых пород имеет место при зондировании на сквозных таликах. На рис. 2 показаны кри-

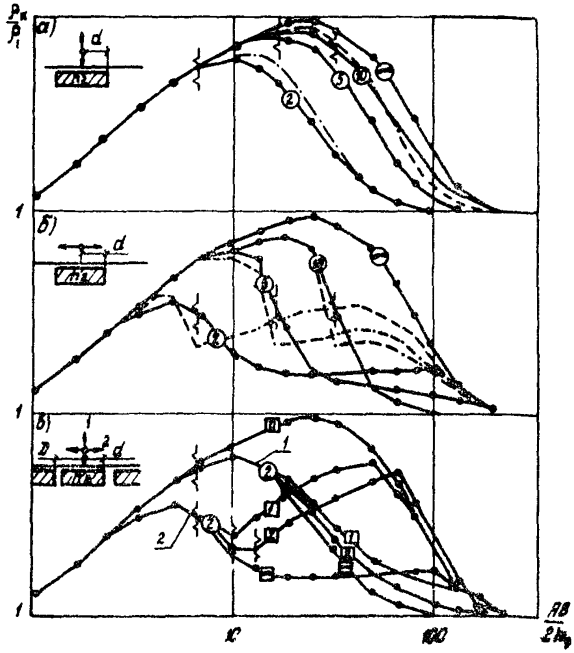

Рис. I. Кривые ВЭЗ моделирования и графические кривые для случая зондирования над пластом мерзлых пород при боковом влиянии таликов (по С.А.Бойкову): а – вдоль границы; б – вкрест границы; в – вдоль (I) и вкрест (2) двух симметрично расположенных ограниченных таликов; ——— – кривые моделирования; – – – – графические кривые; ②, ⑤, ⑩ и ⑳ – значения $\frac{d}{h_2}$; [2] – значения $\frac{D-d}{h_2}$; –∿–∿– положение контакта мерзлых и талых пород; ▨ – мерзлые породы

вые, полученные путем моделирования на трехслойном разрезе [3]. При отсутствии мерзлых пород кривая ВЭЗ практически имела бы вид прямой. Боковое влияние мерзлых пород сказывается в плавном увеличении значений $\rho_к$ и появлении максимума на кривых тем большего, чем ближе мерзлые породы к центру зондирования. При направлении разносов вкрест талика (а) искажения более значительные, чем при разносах вдоль талика (б).

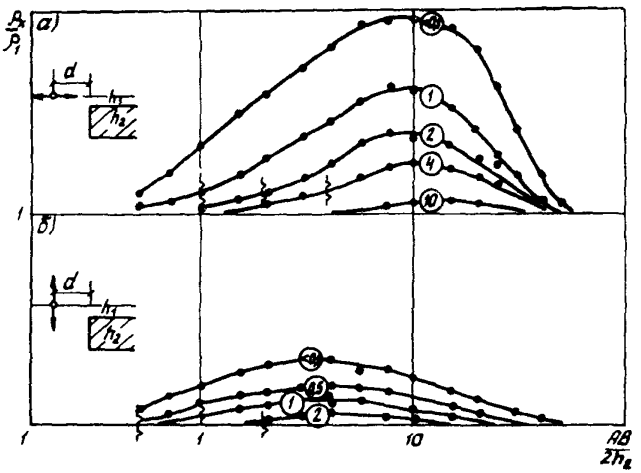

Рис. 2. Кривые ВЭЗ, полученные над моделью талика при боковом влиянии мерзлых пород (по С.А.Бойкову): ① – значения d/h_2; ~~~ – положение контакта талых и мерзлых пород; ▨ – мерзлые породы: а – перпендикулярно контактам; б – параллельно контактам

Полевые кривые крестовых ВЭЗ, полученные на протяженных сквозных таликах, показаны на рис. 3. Боковое влияние мерзлых пород выражается в существенном деформировании кривых ВЭЗ. Появившийся элемент К может быть приписан наличию мерзлых пород в толще талика. При интерпретации таких кривых можно получить искаженное представление о разрезе. В этом случае также необходимо исключить возможность боковых влияний постановкой кругового трехполюсного зондирования.

3.6. Значительные трудности вызывает учет влияний поверхностных неоднородностей, в частности, неровности кровли мерзлых пород, которые выражаются в появлении дополнительных перегибов на кривых ВЭЗ и изменении крутизны восходящих ветвей.

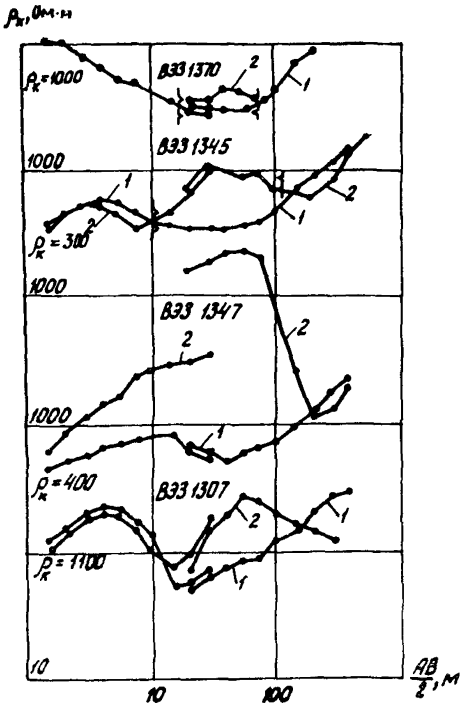

Рис. 3. Кривые крестовых зондирований на сквозных таликах в условиях бокового влияния мерзлых пород:
I – линии разносов АВ вдоль талика; 2 – то же вкрест талика; ⌒⌒ – положение контакта мерзлых и талых пород

При интерпретации подобных кривых возникают ошибки в определении глубины залегания кровли мерзлых пород и их мощности, а также в оценке разреза в целом. Наличие перегиба приводит к выделению в разрезе фиктивных слоев. Если искажения, обусловленные единичными уступами и впадинами, имеют четкий и локальный характер (рис. 4,а), то при перпендикулярной ориентировке оси установки к неровностям интерпретация кривой ВЭЗ не вызывает особых затруднений.

Влияние неровностей кровли мерзлых пород может выразиться также в изменении формы кривых ВЭЗ. На рис. 4,б

приведены такие полевые кривые крестового зондирования, полученные для случая узкого несквозного талика. Здесь при интерпретации более достоверные данные о мощности мерзлых пород и мощности трещиноватых и обводненных зон были получены по кривой ВЭЗ 375, снятой при направлении разносов вкрест талика.

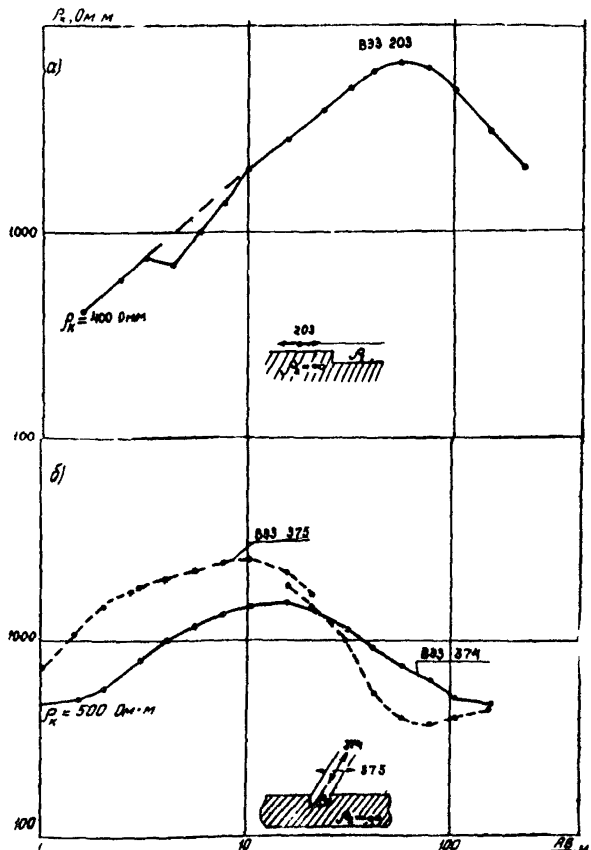

Рис.4. Кривые ВЭЗ, иллюстрирующие влияние неровностей рельефа кровли мерзлых пород:
а - над единичным уступом; б - над узким несквозным таликом

3.7. Весьма трудно интерпретировать кривые ВЭЗ, полученные в условиях узких протяженных или замкнутых таликов небольшой площади. В этих условиях метод ВЭЗ можно использовать только для разделения таликов на сквозные и несквозные. Для этой цели следует применять крестовые зондирования.

3.8. При качественном анализе кривых прежде всего рассматривают кривые ВЭЗ, полученные в центральных частях исследуемых участков, характеризующихся, с наибольшей вероятностью, горизонтальной однородностью и отсутствием образований, обусловливающих боковые влияния. Особое внимание должно быть уделено отбору параметрических кривых, отличающихся высокой надежностью, поскольку данные их интерпретации являются основой для истолкования всего массива кривых.

Из кривых ВЭЗ, полученных на каждом участке, сначала отбирают и анализируют кривые крестовых, а затем круговых симметричных и трехполюсных ВЭЗ для определения имеющихся боковых влияний и их характера. Для этого сравнивают упомянутые кривые с кривыми, полученными на участках с однородным строением разреза, а также между собой.

3.9. При зондировании нередко наблюдаются существенные различия значений $\rho_к$ при переходе с одной приемной линии на другую. Эти различия обусловливаются горизонтальной неоднородностью разреза в связи с изменением состава, влажности, льдистости пород и глубины залегания кровли мерзлых пород, наличием негоризонтальных границ раздела мерзлых и талых пород.

Не рекомендуется простое осреднение кривых $\rho_к$ в интервале перекрытия, поскольку оно часто приводит к значительному изменению крутизны ветвей кривых ВЭЗ, появлению дополнительных перегибов. Параллельный сдвиг кривых до их совпадения в интервале перекрытия в целом позволяет получить кривую, интерпретация которой дает меньшие погрешности при определении мощности слоев, но приводит к неправильной оценке величины УЭС отдельных слоев разреза. Последнее недопустимо, когда абсолютная величина УЭС слу-

жит критерием обводненности, трещиноватости пород и т.п. В этих случаях при наличии больших разрывов в величинах $\rho_к$ значения УЭС выделенных геоэлектрических слоев устанавливают по соответствующим отрезкам кривых ВЭЗ до их совмещения.

3.10. Количественную интерпретацию начинают с опорных ВЭЗ; ее проводят с помощью трехслойных палеток, используя величины h_i, найденные по данным бурения. Если полученные значения ρ_i совпадают со средними сопротивлениями, определенными для каждого пласта по каротажным данным, можно считать, что градиентность сопротивлений отсутствует или незначительна и, следовательно, проводить интерпретацию кривых ВЭЗ обычными методами, как и для немерзлотных разрезов.

Когда анализ опорных кривых указывает на наличие градиентности, необходимо по каротажным данным оценить характер изменения сопротивления с глубиной. Если зависимость ρ от глубины имеет экспоненциальный характер, то для интерпретации кривых ВЭЗ пользуются палетками Б.А.Боровинского [4]. В том случае, когда эта зависимость имеет линейный характер ($\rho=\kappa h$), необходимо использовать теоретические кривые, параметры которых соответствуют величинам μ и ν, встречающимся в районе работ. Теоретические градиентные кривые могут быть построены графическим способом [5] или путем решения прямой задачи ВЭЗ на ЭВМ, причем градиентный пласт заменяется несколькими слоями, сопротивления которых дискретно меняются в порядке, аппроксимирующем нужную зависимость.

3.11. При отсутствии опорных сведений о характере изменения сопротивления пород применяют метод А.Т.Акимова [6]. Толща вечномерзлых пород заменяется двумя слоями с сопротивлениями ρ'_2 и ρ''_2. Для районов БАМ в большинстве случаев ρ'_2 отвечает мерзлым рыхлым породам, а ρ''_2 – скальным породам. Величину ρ'_2 получают из опорных ВЭЗ, поставленных у неглубоких скважин, а ρ''_2 – по кривым, снятым у скважин, прошедших всю толщу вечной мерзлоты. При отсутствии скважин значение ρ''_2 следует найти по ре-

зультатам интерпретации ВЭЗ, полученным на обнажениях скальных пород. После того, как найдены значения ρ_2' и ρ_2'', кривые интерпретируют с помощью обычных палеток.

В районах, где развита низкотемпературная мерзлота, где сопротивление мерзлых пород во много раз больше сопротивления талых ($\mu \gg 40$), рекомендуется пользоваться методом дискретных значений В.С.Якупова [7], причем величины дискретных значений подбирают на основании результатов предшествующих работ в исследуемом районе.

В тех случаях, когда на участке работ получено большое количество опорных данных, интерпретацию кривых ВЭЗ рекомендуется проводить методом сопоставлений [8]. Следует использовать корреляционную связь мощности вечномерзлых пород с абсциссой точки максимума для кривых типа К или с абсциссой точки перегиба для кривых типа Q.

3.12. При анализе кривых ВЭЗ необходимо учитывать следующее: если кривая многослойная, а точное число слоев определить трудно, то предпочтителен вариант с наибольшим количеством слоев [9].

Для интерпретации кривых рекомендуется применять программу "Вертикаль-2", разработанную в ЦНИИСе [10].

3.13. Наибольшую сложность представляет интерпретация кривых, полученных на горизонтально неоднородных разрезах. Как уже указывалось, необходим учет боковых влияний. Одним из приближенных способов учета боковых влияний талых пород является совместная интерпретация кривых $\rho_к$ крестовых зондирований, выполненных вдоль и вкрест простирания контактов мерзлых и талых пород. В этом случае палеточная кривая в левой части совмещается с кривой, соответствующей параллельной ориентировке, и в правой части – с кривой, соответствующей перпендикулярной ориентировке. Перегибы в средней части кривых, обусловленные боковыми влияниями таликов, при интерпретации не учитываются (рис. 5). Этот прием, хотя и не позволяет полностью исключить боковые влияния, все же уменьшает ошибку в определении мощности мерзлых пород и позволяет избежать неверных выводов о строении разреза.

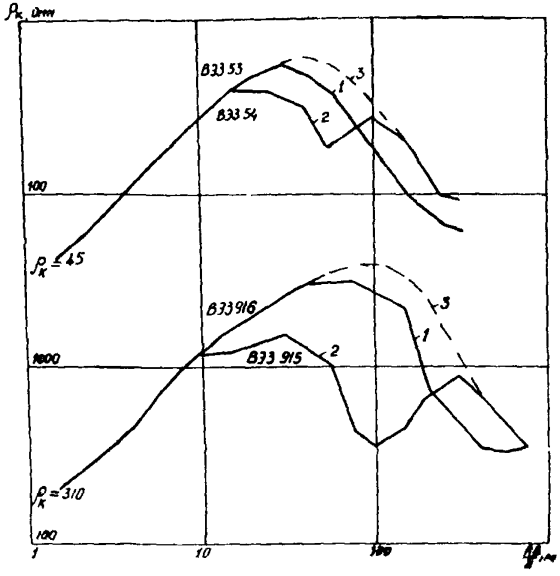

Рис. 5. Интерпретация кривых крестовых ВЭЗ по огибающей для случая бокового влияния талых пород:
I - экспериментальная кривая, полученная при разносах АВ вдоль границы раздела; 2 - то же при разносах АВ вкрест границы раздела; 3 - огибающая кривая

Для разрезов типа вертикального контакта и пласта более точные исправления кривых ВЭЗ дает графический способ учета искажений. Используются палетки теоретических кривых ВЭЗ для случая контакта двух сред [II] и пласта в однородной среде [I2] .

Исходными параметрами для учета искажений является сопротивление $\rho_т$ талых пород, оцениваемое по данным зондирования таликов, и расстояние d от центра зондирования до контакта, определяемое по данным электропрофилирования. Способ применим для разреза типа вертикального контакта мерзлых и талых пород в талой среде. При интерпретации кривых ВЭЗ, соответствующих параллельной контакту оси зондирования, способ позволяет в значительной степени

уменьшить ошибку интерпретации. Его можно использовать и при многослойном строении толщи мерзлых пород. Величина поправки зависит от параметров d и $\rho_т$. Первый из них трудно определить при криволинейном контакте (в плане) и близком расположении к нему центра зондирования, а второй – при многослойном строении таликов (за величину $\rho_т$ приходится принимать сопротивление более мощных слоев или значение $\rho_к$ кривой ВЭЗ, полученной на талике).

3.14. Интерпретацию кривых ВЭЗ, выполненных в условиях талого состояния пород, проводят по стандартной методике, за исключением случаев боковых влияний мерзлых пород. Несмотря на то, что влияние мерзлых пород в целом намного существенно, чем талых, количественный и качественный учет этого влияния представляет большие трудности.

Возможность получения достоверной информации здесь во многом зависит от правильного выбора участков и направления разносов ВЭЗ. Более надежную информацию дают кривые ВЭЗ, выполненные с разносами вдоль таликов, поскольку искажения здесь намного слабее (и проявляются с большим разносов)(см.рис.2,3),чем в случаях перпендикулярной ориентировки. Так же, как и при интерпретации ВЭЗ, полученных на участках развития мерзлых пород, на кривых ВЭЗ полученных на таликах, надо отмечать положение границ раздела мерзлых и талых пород, чтобы оценить интервал разносов, на которых искажения отсутствуют.

3.15. При поисках подземных вод критерий перспективности по кривым ВЭЗ определяют на основе анализа данных, полученных в районах, прилегающих к участку работ. Для территории центрального участка БАМ в районах развития кристаллических пород характерно распространение локальных водоносных зон, обычно приуроченных к тектоническим нарушениям. Проведенные каротажные исследования показывают, что водоносные породы отмечаются пониженными сопротивлениями. Поэтому низкоомные слои, выделяемые при интерпретации ВЭЗ, следует рассматривать как возможные горизонты обводненных пород. Подобная закономерность была отмечена для Северо-Восточных районов, где электроразведка методо

ВЭЗ является эффективным средством при поисках подмерзлотных вод [13]. Однако следует учитывать, что в ряде случаев низкоомным отложениям могут соответствовать не только водоносные зоны, но и разрушенные породы с глинистым заполнителем по трещинам.

3.16. Иногда при гидрогеологических изысканиях бывают такие ситуации, когда зоны протаивания в подошве мерзлых пород обусловлены отепляющим действием потока подземных вод. Такого рода изменения в подошве мерзлых пород не всегда отчетливо устанавливаются по данным ЭП. Более успешно эта задача решается методом ВЭЗ.

По ряду признаков, таких, как величина $\rho_{к,max}$, наличие элементов К или Q, крутизна левой ветви и т.д. кривые ВЭЗ классифицируются на "мерзлотные" и "безмерзлотные". Анализ типов кривых позволяет выделить зоны талых и мерзлых пород и на основании интерпретации этих кривых - участки, где проявляется отепляющее влияние вод подземных разломов [14].

Участки, характеризующиеся пониженными значениями мощности многолетней мерзлоты, следует рассматривать как перспективные для поисков подземных вод.

3.17. В районах распространения гранитоидов протерозойского возраста наиболее водообильные породы (при минерализации подземных вод порядка 0,15 г/л) характеризуются удельными сопротивлениями от 1000 до 3500 Ом·м. Гранитоиды с УЭС менее 1000 Ом·м разрушены, каолинизированы и обладают очень слабой водоотдачей.

В гранитоидах более молодого юрского возраста корреляционная зависимость между обводненностью и удельным электрическим сопротивлением пород выражена слабее.

Анализ большого количества параметрических ВЭЗ показывает, что спектр сопротивлений как слабообводненных, так и водообильных горизонтов меняется в этих районах от 600 до 4000 Ом·м.

На всех участках скальные породы с удельным сопротивлением более 5000 Ом·м можно считать практически безводными.

3.18. Для выявления маломощных обводненных зон, залегающих на значительной глубине при слабой дифференцированности геоэлектрических разрезов в целях повышения эффективности метода ВЭЗ, следует трансформировать кривые $\rho_к$ в кривые ρ_t зондирования по методу вычитания полей (ЗМВП). Кривые ρ_t более дифференцированы, чем кривые $\rho_к$. На них сильнее отражаются неоднородности в строении геологического массива. Для сравнения на рис. 6 показаны кривые опорных ВЭЗ и ЗМВП, полученные у скважины №3 на западном участке БАМ [15] . В правой части кривых ρ_t при разносах 50-95 м наблюдается глубокий минимум, который по данным бурения соответствует нескольким маломощным трещиноватым зонам в гнейсо-гранитах с напорными подземными водами.

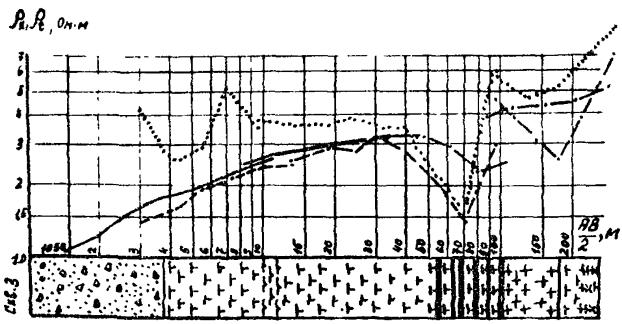

Рис. 6. Кривые $\rho_к$ и ρ_t, полученные у скважины № 3 (по В.Я.Пригоде):
– моренные отложения; – биотитовые гнейсо-граниты; – граниты; – гранитизированные гнейсы; – роговики; – зоны повышенной трещиноватости и обводненности; ——— – кривая $\rho_к$; – – – – кривая ρ_t; ····· – кривая ρ_t, полученная в результате пересчета кривой $\rho_к$

Минимум, выраженный слабее, наблюдается при разносах 150-200 м. На кривой $\rho_к$ эти минимумы фиксируются менее четко, в особенности последний. В силу большой изрезанности кривые ρ_t трудно поддаются палеточной интерпрета-

ции, но они дают более точное представление о характере изменения геоэлектрического разреза. По форме кривой ρ_t можно установить тип геоэлектрического разреза и, следовательно, более точно произвести количественную интерпретацию.

3.19. Информацию о наличии трещиноватости в скальных массивах и преобладающем направлении получают по результатам круговых ВЭЗ. Установлено, что экзогенная трещиноватость в верхней части скального массива и зоны мерзлотного выветривания характеризуется коэффициентом кажущейся анизотропии $\xi \leqslant 1{,}4$. Трещиноватость в зонах тектонических нарушений более ориентирована и характеризуется значениями $\xi \geqslant 1{,}5$.

3.20. Важным параметром для оценки водообильности пород является относительное сопротивление F. На рис. 7,а показано распределение величины F в зависимости от изменения удельного дебита скважин в гранитоидах протерозойского возраста. Совокупность точек F аппроксимируется кривой нормального распределения случайных величин с максимумом, соответствующим наиболее обводненным породам. Согласно характеру распределения водообильность гранитов и гранодиоритов постепенно увеличивается при изменении F от 5 до 30. Затем наблюдается спад водообильности, и при значениях F более 50 породы являются практически безводными. На благоприятные условия (водообильность) указывают значения в пределах между 10 и 45, что соответствует удельным сопротивлениям обводненных пород от 1000 до 3500 Ом·м при удельном сопротивлении подземных вод равном 80 Ом·м. В указанных пределах сопротивления пород в наибольшей мере зависят от водонасыщения трещиноватых зон.

Таким образом, величина относительного сопротивления может быть использована как поисковый критерий.

Однако оценка водообильности водоносных горизонтов по параметру F имеет приближенный характер. Это обусловлено прежде всего несопоставимостью данных об удельном дебите скважин, так как в них не учтена мощность водонос-

ных горизонтов, а также большой неоднородностью обводненных пород, представленных чередованием крепких безводных и трещиноватых обводненных слоев, которые на кривых ВЭЗ выделяются как единый мощный водоносный горизонт. В зависимости от количественного соотношения мощностей этих слоев, условий и формы их залегания при одной и той же водоносности горизонтов, по данным ВЭЗ могут быть получены различные величины их удельных сопротивлений.

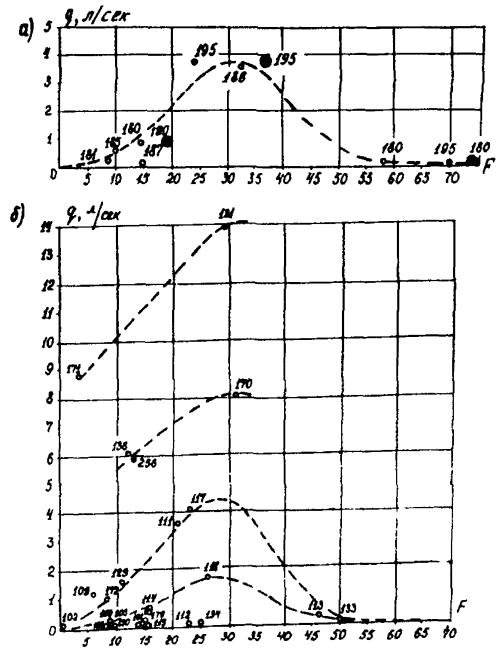

Рис. 7. Распределение величин относительного сопротивления F обводненных гранитоидов протерозойского (а) и юрского (б) возрастов в зависимости от удельного дебита скважин q на центральном участке трассы БАМ:
○ – по данным ВЭЗ; ◉ – по данным каротажа;
цифры у точек – номера скважин

В районах распространения гранитоидов более молодого орского возраста зависимость F от ϱ выражена слабее (рис. 7,б).

Одним и тем же значениям F могут соответствовать как сильно, так и слабо обводненные породы. Это можно объяснить эквивалентным воздействием на электропроводность интрузивных пород, как их обводненности, так и наличия глинистого заполнителя по трещинам. В некоторых случаях аномально низкие сопротивления могут быть обусловлены включениям электропроводящих минералов (пирита, халькопирита и др.).

4. ПРИМЕРЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

4.1. *Водозаборный участок* в геологическом отношении представлен комплексом интрузивных пород протерозойского возраста: гранитами, гранодиоритами и гнейсами. Подземные воды, в основном, приурочены к контактам пород различного петрографического состава и зонам тектонических разломов. На участке почти повсеместно распространена вечная мерзлота, преимущественно высокотемпературная, мощностью от 10 до 45 м. Встречаются талики, приуроченные к выходам подземных вод. Зимой здесь образуются наледи.

Для выбора мест заложения разведочных на воду скважин наряду с геологической и гидрогеологической съемками широко применяли геофизику. На стадии технико-экономического обоснования проводили магниторазведку. На стадии технического проекта выполняли электроразведку методами ВЭЗ и ЭП и проводили каротажные исследования в скважинах.

Основная задача зондирования заключалась в выявлении в толще гранитов и гранодиоритов трещиноватых обводненных зон и определении глубины их залегания и мощности.

С к в а ж и н а 195. Глубина 150 м. Самоизливающаяся. По данным каротажа УЭС пород меняются от 1000 до 20000 Ом·м (рис. 8). Низкие значения удельных сопротивлений от 1000 до 4000 Ом·м наблюдаются в интервалах 24–39

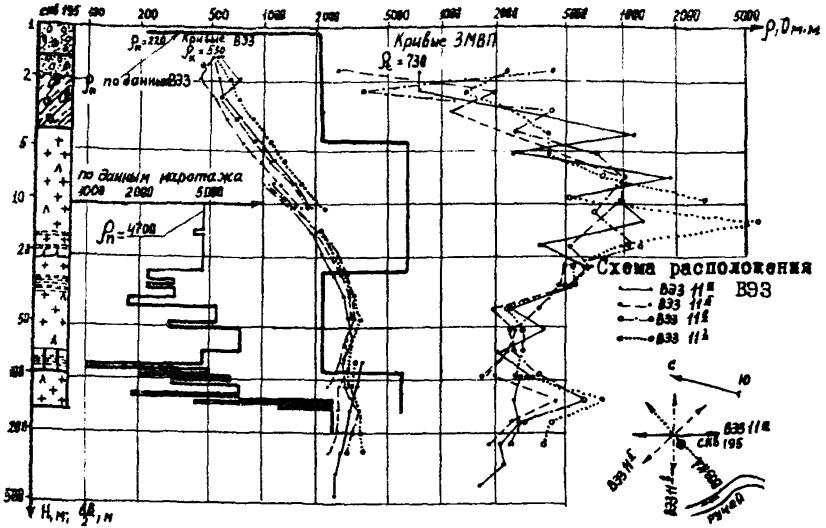

Рис. 8. Кривые $\rho_к$ и ρ_t круговой ВЭЗ-II, полученные у скважины № 195: – супесь с включением гравия и дресвы; – песок с галькой; – суглинок с дресвой и валунами коренных пород; – гнейсовидный гранодиорит; – наиболее трещиноватые породы по данным бурения; – зона максимального водопритока по данным каротажа; – верхняя (а) и нижняя (б) границы вечной мерзлоты

и 72-95 м, высокие от 10000 до 20000 Ом.м в интервалах 35-72 и 107-150 м. По этим данным можно было ошибочно считать, что обводненные породы имеются в обоих интервалах. Однако резистивиметрия с засолкой скважины показала, что значительный водоприток наблюдается только в интервале 70-90 м. Очевидно, низкие значения УЭС в верхнем интервале обязаны наличию в трещинах гидроокислов железа или глинистого материала.

Установлено, что приток воды происходит из четырех слоев с удельными сопротивлениями 4500 , 1000, 4000 и 2000 Ом•м и мощностью 13; 3,5; 3,5 и 3 м соответственно; УЭС воды 80 Ом м.

На основании этих данных для указанной пачки слоев получили среднеквадратичное значение УЭС ρ_m = 2950 Ом•м и F = 37.

У скважины выполнили круговое зондирование по 4 азимутам. Кривые(см.рис.8)можно отнести к типу АКН, они проинтерпретированы с применением двухслойных и вспомогательных палеток. Нетрудно заметить, что по кривой ВЭЗ отмечается горизонт пониженных удельных сопротивлений, обусловленных совокупностью водоносных слоев, фиксированных и на каротажной диаграмме. Среднее значение УЭС по четырем кривым равно 2200 Ом•м, относительное сопротивление F = 28. Следовательно, оба параметра указывают на наличие обводненных пород. На этом же рисунке показаны кривые ρ_t , полученные путем трансформации полевых кривых по формуле

$$\rho_t = \frac{l_2 - l_1}{\frac{l_2}{\rho_{к_2}} - \frac{l_1}{\rho_{к_1}}} ,$$

где: $\rho_{к_1}$ и $\rho_{к_2}$ – значения кажущегося сопротивления, соответствующие полуразносам питающих линий l_1 и l_2 .

По кривым ρ_t в интервале 23-90 м выделяется горизонт пониженных удельных сопротивлений. Однако здесь в отличие от кривых ВЭЗ наблюдается участок с повышенными удельными сопротивлениями, что в большей степени корре-

лируется с данными каротажа. Таким образом, кривые ρ_t позволяют уточнить данные интерпретации ВЭЗ.

С к в а ж и н а 180. Глубина 78 м. Удельный дебит составил 0,9 л/с. Вода пресная, по составу гидрокарбонатно-кальциево-натриевая. Сухой остаток 0.15 г/л. Диаграмма УЭС пород в разрезе скважины, определенная по данным каротажа, показана на рис. 9. Толщу гранодиоритов можно разделить на два блока. Первый в интервале 7,5-30 м с УЭС от 1200 до 3600 Ом·м представлен, очевидно, разрушенными породами. Второй в интервале 30-55 м имеет удельное сопротивление 10000 Ом·м в верхней части и 14000 Ом·м в нижней.

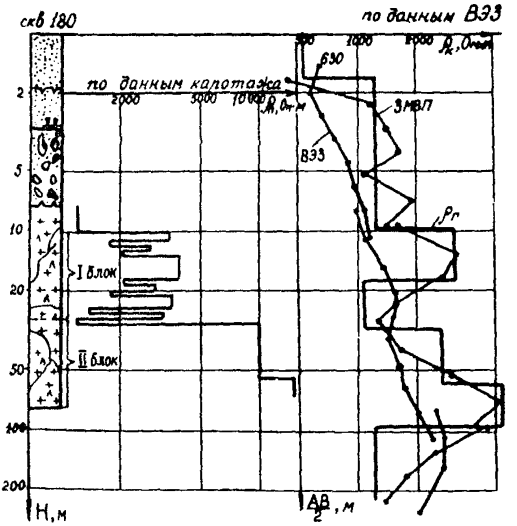

Рис. 9. Кривая ВЭЗ-13б, полученная у скважины № 180:
- песок мелкозернистый; а - валуны гранита с песчаным заполнителем; - гранодиорит; - трещиноватость; - верхняя (а) и нижняя (б) границы мерзлых пород

По данным разистивиметрии с засолкой воды максимальный водоприток наблюдается в интервале 10–30 м от слоев с пониженным сопротивлением. Блок в целом характеризуется следующими значениями параметров:

$$\rho_m = 2580 \text{ Ом·м}; \quad F = 30,$$

а среднее значение УЭС пачки слоев пониженных сопротивлений в блоке, соответственно

$$\rho_{ср} = 1700 \text{ Ом·м}; \quad F = 20.$$

В основу интерпретации кривой ВЭЗ-13 положен принцип выделения возможно большего числа геоэлектрических слоев. В данном случае выделили 7 слоев. Для проверки кривую $\rho_к$ пересчитали в кривую ρ_t . Выяснилось, что в интервале 7,5–10 м следует выделить еще один слой пониженного сопротивления. Это вытекает и из каротажной диаграммы. Таким образом, по данным ВЭЗ и ЭМПВ можно выявить зону трещиноватых обводненных пород. Самый водообильный горизонт, очевидно, находится на глубине 25–30 м, где породы имеют УЭС около 1100 Ом·м.

Скважина 181. Кривые ВЭЗ (рис. 10) можно отнести к типу КН; они проинтерпретированы с помощью двухслойных и вспомогательных палеток. Как видно из графика в гранитах наблюдается анизотропия по электрическому сопротивлению. При измерениях вкрест склона (12б) получено 3350 Ом·м, а вдоль (12а) – 750 Ом·м.

По данным ВЭЗ наиболее разрушенные граниты следует ожидать в интервале глубин 35–85 м, где УЭС колеблется от 440 до 650 Ом·м, но при таких УЭС граниты каолинизированы и обладают слабой водоотдачей. Действительно, удельный дебит скважины не превышает 0,27 л/с.

Скважина 188 (рис. 11). Пробурена на водоразделе. Удельный дебит – 0,001–0,002 л/с. У скважины выполнено крестовое зондирование. По кривой 14а удельное сопротивление гранита с глубины 20 м равно 600 Ом·м, а $F = 9$, по кривой 14б – 1230 и 3400 Ом·м. Очевидно, зона сильно разрушенных гранитов имеет узколокальное распро-

странение, а в перпендикулярном направлении на некотором расстоянии от центра зондирования на глубине 75 м и ниже, залегают крепкие трещиноватые породы (ρ = 3400 Ом•м).

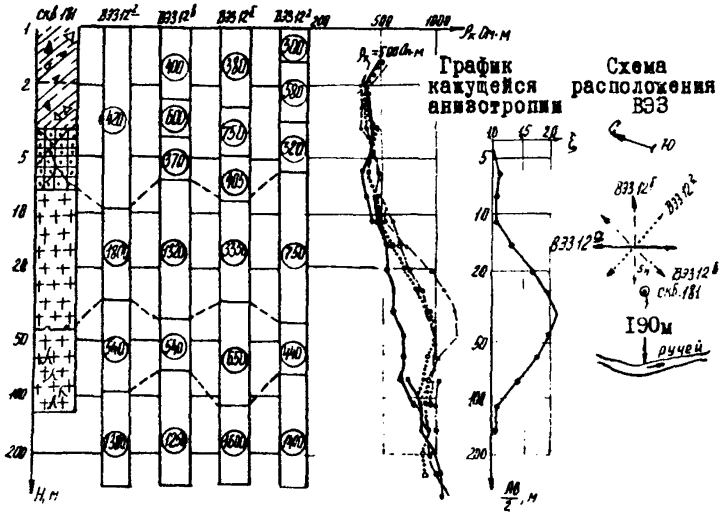

Рис.10. Кривые круговой ВЭЗ-12 и график кажущейся анизотропии, полученные у скважины № 181:
- суглинок с дресвой и щебнем; - кварцит; - гранит; - трещиноватость; - верхняя (а) и нижняя (б) границы мерзлых пород; (440) - УЭС пород по данным ВЭЗ

Узколокализованное распространение сильно разрушенных гранитов подтверждается также большими "воротами" на кривой ВЭЗ 14а, полученными при переходе с одной приемной линии на другую на разносах 80 и 110 м.

Имеющаяся в скважине небольшая мерзлая пробка на глубине 14,6 м указывает на присутствие многолетнемерзлых пород. Но наличие глинистых частиц в рыхлых отложениях и каолина в сильно разрушенных гранитах снижают величину электрических сопротивлений мерзлых пород, и поэтому на кривых ВЭЗ они не выделяются. Мерзлота также не

была зафиксирована и по данным бурения. Вероятно, она в районе скважины I88 высокотемпературная, вялая и имеет незначительную мощность.

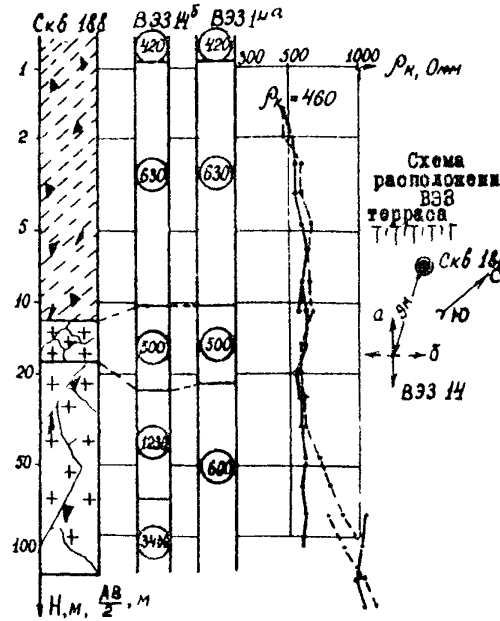

Рис. II. Кривые крестового ВЭЗ-I4, полученные у скважины № I88:
[▨] - супесь тяжелая, переходящая в суглинок с дресвой гранита; [▨] - гранит трещиноватый; [▨] - гранит, местами разрушенный до состояния дресвы

С к в а ж и н а I96. Глубина 50 м. По данным бурения суглинки и граниты в верхней части разреза мерзлые. С глубины 45 м намечался слабый самоизлив. Опорные крестовые ВЭЗ I5 (рис. I2) имеют четко выраженный тип КН. УЭС мерзлых рыхлых отложений изменяется от 2300 до 6300 Ом·м, а в талом состоянии - 500-900 Ом·м. Граниты в интервале глубин I2-80 м имеют УЭС от 750 до I700 Ом·м. С глубины I00 м удельное сопротивление их увеличивается

до 5500 Ом·м. Сильная анизотропия по электропроводности пород (ξ = 1,5-2,5), большие разрывы в значениях $\rho_к$ при переходе с одной приемной линии на другую говорят об узколокализованном залегании как мерзлых рыхлых отложений, так и трещиноватых гранитов. По предварительным данным зона сильно разрушенных гранитов вытянута вдоль разноса питающей линии АВ В88 I5в по азимуту I25°.

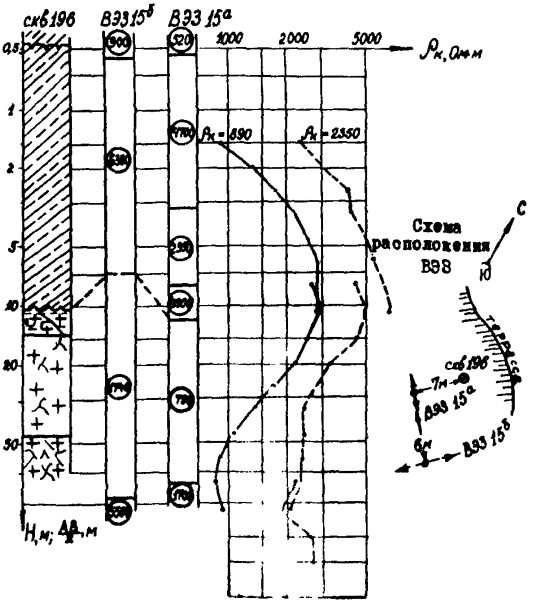

Рис. I2. Кривые В88, полученные у скважины № I96: – суглинки и глины мерзлые, в верхней части с прослоями льда; – граниты; – гранодиориты; – трещиноватость; – граниты сильно выветрелый и загли-низированный; – верхняя (а) и нижняя (б) границы мерзлых пород

показан на рис. 13. На кривой симметричного ВЭЗ 17б, выполненного вкрест долины ручья, при разносах питающей линии 8–10 и 25–45 м наблюдается нарушение плавности в форме кривой кажущихся сопротивлений, вызванное боковыми влияниями. Как известно, определить по данным симметричного ВЭЗ, с какой стороны от точки наблюдений расположено аномальное тело, обуславливающее это нарушение, не представляется возможным.

По геоморфологическим признакам можно предположить, что искажение вызвано наличием подруслового талика.

Результаты крестового трехполюсного ВЭЗ позволяют *совершенно однозначно установить, что проводящее тело,* обуславливающее искажающее боковое влияние на результаты зондировании, находится на линии разносов ВЭЗ 17б, АВ N C_{-} в 25–45 м *восточнее* точки наблюдений, у подошвы надпойменной террасы. Следовательно, данные круговых двухсторонних трехполюсных ВЭЗ по сравнению с данными симметричного зондирования позволяют с большей уверенностью установить факт искажения кривых, а также определить, с какой стороны и на каком расстоянии от точки наблюдения располагается геологическое тело, обуславливающее это искажение. По линии разносов ВЭЗ 17б искажения, очевидно, связаны *либо* с наличием мощного слоя глин у подошвы надпойменной террасы, либо с существованием сквозного талика в рыхлых отложениях.

Формальная интерпретация искаженных одиночных кривых симметричного или трехполюсного ВЭЗ привела бы к выявлению в толще гранитов на глубине 25–45 м ложной аномалии *пониженных сопротивлений*, которую можно истолковать, как зону сильно разрушенных обводненных пород. Поэтому при поисках подземных вод особенно важно выявлять и отбраковывать подобного рода аномалии.

Результаты геофизических исследований и данные опытных откачек разведочных гидрогеологических скважин по рассмотренным участкам приведены в таблице.

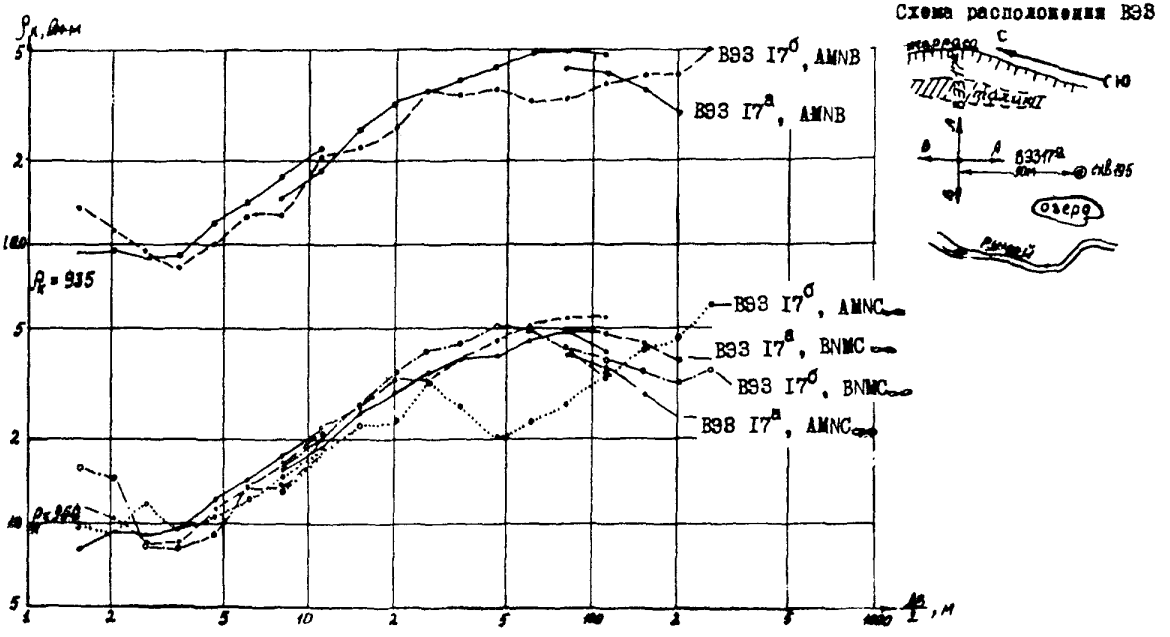

Рис. I3. Пример бокового влияния талых пород на результаты симметричного (AMNB) и трехполюсного (AMNC ∞) В93

Гидрогеологические скважины		Интервал водопритока, м	Удельный дебит, л/с	Минерализация, г/л	УЭС водоносного горизонта, Ом·м		Относительное сопротивление, F
номера	глубина, м				по данным каротажа	по данным ВЭЗ	
I79	I64	63	0,0II	-	-	I270	I5
I80	78	I0-35	0,94	I,5	I700	II00	I5-20
I8I	II6	44	0,27	0,2	-	550	9
I88	I50	25	0,00I5	-	-	650	7
I95	I50	70-95	3,48	0,I	2950	2200	22-37
I96	50	45	-	-	-	I740	I9

Сопоставляя значения удельных электрических сопротивлений, полученных по данным ВЭЗ и каротажа с удельным дебитом скважин, приходим к выводу, что наиболее водообильные горизонты характеризуются относительными сопротивлениями где-то в пределах от 15 до 35, что соответствует УЭС пород от 1000 до 3500 Ом·м. Более низкие удельные сопротивления трещиноватых гранитов обусловлены присутствием глинистых частиц, каолина и гидроокислов железа по трещинам. Такие зоны разрушенных гранитов обладают слабой водоотдачей, что подтверждается данными откачек скважин 179, 181 и 188 (см.таблицу). Породы с относительным сопротивлением более 50 по существу являются монолитными и практически безводными. Следовательно, при поисках и разведке трещинных и трещинно-жильных вод методами электроразведки во всех случаях необходимо ориентироваться на зоны пониженных сопротивлений, однако при минерализации подземных вод в пределах 100-150 мг/л сухого остатка максимальные водопритоки в трещиноватых обводненных гранитах и гранодиоритах следует ожидать при их удельном электрическом сопротивлении от 1000 до 3500 Ом·м.

4.2. В районе исследования развиты гранитоидные образования протерозойского возраста, прорванные более молодыми интрузиями пермского и юрского возраста. Мощность четвертичных отложений не превышает 3-5 м. На участке развит прерывистый тип многолетней мерзлоты, мощность которой - 20-70 м.

При поисках и разведке источников водоснабжения широко применяли различные геофизические методы - магниторазведку, электроразведку (ВЭЗ, ЭП) и поверхностную резистивиметрию. Гидрогеологические изыскания проводились на двух водозаборных участках.

По результатам параметрических измерений на первом участке наблюдается слабая зависимость обводненности гранитоидов от величины их удельного электрического сопротивления. Поэтому основное внимание при интерпретации полевых кривых ВЭЗ уделялось выявлению зон неоднородностей геоэлектрического разреза, которые могут соответство-

вать разрывным нарушениям и контактам разновозрастных пород. На первом этапе интерпретации анализировались типы кривых ВЭЗ, проводилось группирование кривых, выполненных в однотипных геоэлектрических условиях, учитывалось влияние боковых неоднородностей, связанных с таликами и участками развития многолетнемерзлых пород. Это помогло составить качественное представление о характере геоэлектрического разреза и более уверенно проводить количественную интерпретацию. В связи с тем, что район работ находится в зоне высокотемпературной многолетней мерзлоты, а также в связи с наличием большого числа трещин с глинистым заполнителем, сопротивление коренных пород при переходе их из талого состояния в мерзлое менялось незначительно, и влияние мерзлоты на градиентный характер разреза практически отсутствовало. Поэтому интерпретация полевых кривых проводилась посредством обычных палеток теоретических кривых ВЭЗ.

По результатам интерпретации выявлена зона нарушения однородности геоэлектрического разреза с общим фоном 3000–7000 Ом·м. В зоне нарушения УЭС пород составляют 1700 Ом·м. Аномалия электрических сопротивлений хорошо коррелируется с аномалией магнитного поля. Гидрогеологическая скважина, заложенная в зоне нарушений, имеет большой водоприток и используется для временного водоснабжения станции.

На втором участке по результатам гидрогеологической съемки, магнитометрии и электропрофилирования была выделена зона тектонического нарушения, расположенная вкрест долины ручья (рис. 14). В связи с небольшой мощностью четвертичных отложений и незначительным различием в удельных сопротивлениях между мерзлыми и талыми коренными породами выделение таликовой зоны по данным профилирования оказалось затруднительным. Более уверенно эта задача решена с помощью вертикальных электрических зондирований.

Точки ВЭЗ с большой детальностью располагались на исследуемом участке. Как и в предыдущем случае, на первом этапе проводилась классификация однотипных кривых, их

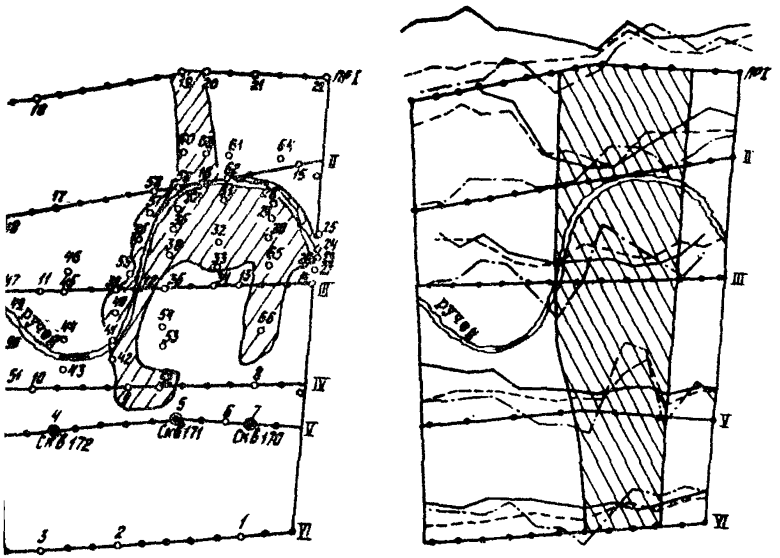

Рис. I4. Результаты геофизических исследований по второму водозаборному участку:
▨ – талик, выделенный по данным ВЭЗ; ▨ – зона тектонического нарушения, установленная по данным ЭП и магниторазведки; ○ – точки ВЭЗ; ◉ – разведочные гидрогеологические скважины; а – графики ЭП, полученные с установкой AA'MNBB при AB=80 м (а) и A'B' = 20 м (б) (в 1см 4000 Ом·м); – графики вертикальной составляющей магнитного поля Δ Za (в I см 400 γ); —•— – пикеты; ПР – геофизические профили

качественная интерпретация, оценка и учет искажающего влияния боковых контактов пород с разным удельным электрическим сопротивлением. Особое внимание уделялось разделению кривых на мерзлотные и безмерзлотные. При этом использовался ряд признаков:

величина УЭС аллювиальных отложений, причем наличие низкоомных отложений рассматривалось как один из признаков выявления талика;

крутизна левой восходящей ветви кривой. Крутая левая ветвь оценивалась как признак принадлежности кривой к классу мерзлотных;

наличие элемента "К", связанного с многолетнемерзлыми породами;

величина удельного электрического сопротивления коренных пород. Если ρ превышает 3500 Ом·м, кривая ВЭЗ рассматривается как мерзлотная.

Различные типы кривых приведены на рис. 15.

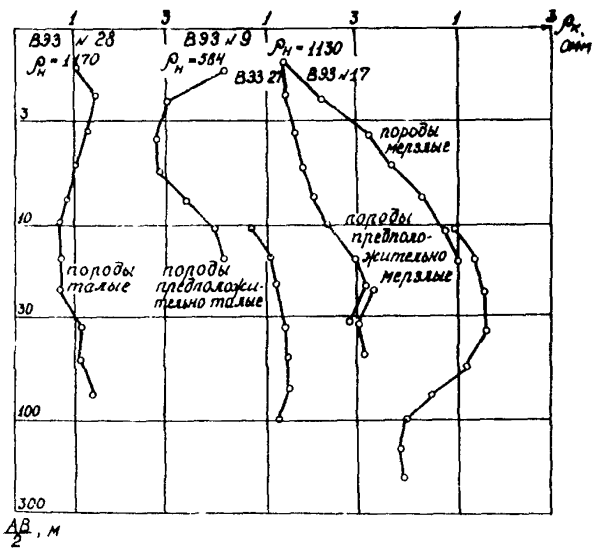

Рис. 15. Характерные типы кривых ВЭЗ, полученные на участках талых и мерзлых пород

Анализ пространственного положения кривых позволил исключить отдельные ошибки классификации и скорректировать положение талой зоны. Выделенный таким способом талик оказался приуроченным к зоне тектонического нарушения. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ проводилась с уче-

том предварительной классификации. Градиентность верхней части геоэлектрического разреза незначительная и при интерпретации не учитывалась. По результатам работ удалось оценить мощность многолетней мерзлоты и выделить участки низкоомных пород. Результаты буровых работ подтвердили достоверность геофизических прогнозов. Три гидрогеологические скважины, пробуренные на рассмотренном участке оказались высокодебитными.

4.3. Исследуемый участок в геологическом отношении представлен гранитоидами протерозойского возраста. Рыхлые четвертичные отложения наблюдаются в основном по долинам рек. Мощность их не превышает 10 м.

Гидрогеологические признаки наличия подземных вод на местности выражены слабо. Значительных выходов подземных вод в виде родников и других источников не наблюдается. Имеются лишь небольшие мочажины и незначительные водотоки.

Основными задачами геофизических исследований являлось выявление контактов между породами различного петрографического состава и установление зон тектонических разломов. Для решения этих задач применяли магниторазведку и электроразведку в модификации метода ВЭЗ и дипольного электропрофилирования.

Геоэлектрический разрез участка в основном трехслойный. Общая структура и зоны тектонических разломов оценивались по величинам УЭС и глубине залегания опорного горизонта. Удельное сопротивление его изменяется от трех до десятков тысяч Ом·м. Резкие перепады глубины залегания кровли опорного горизонта свидетельствуют о возможном наличии тектонических нарушений.

Надопорный горизонт представляет собой зону выветривания коренных пород. В зоне тектонических нарушений мощность его увеличивается до 220 м, а УЭС колеблется от 300 до 650 Ом·м. Эта зона является наиболее благоприятной для скопления подземных вод и заложения здесь буровых скважин на воду.

Верхний горизонт представлен талыми и мерзлыми породами. Мерзлые породы на участке развиты довольно широко. Они характеризуются удельным сопротивлением 7000-250000Ом·м и увеличением мощности от первых метров до 45 м. Талые породы верхнего горизонта приурочены в основном к южной экспозиции возвышенностей участка.

Для бурения разведочной гидрогеологической скважины была рекомендована точка в зоне тектонического нарушения. Геоэлектрический разрез в этой точке четырехслойный и характеризуется следующими параметрами:

первый от поверхности слой мощностью 4 м и удельным сопротивлением 3400 Ом·м представлен, по-видимому, талыми песчано-обломочными отложениями;

второй слой мощностью 25 м и удельным сопротивлением 13000 Ом·м соответствует мерзлым породам;

третий надопорный горизонт представлен трещиноватыми гнейсами, возможно, водоносными. Его мощность около 200 м, удельное сопротивление 420 Ом·м;

опорный горизонт имеет бесконечно-большое удельное сопротивление и представлен крепкими кристаллическими породами.

Рекомендуемая глубина скважины 200 м.

В указанной точке пробурена разведочная гидрогеологическая скважина. Ее глубина 120 м. Разрез скважины совпадает с данными электроразведки. Бурением вскрыты гнейсы и граниты, сильно трещиноватые, водоносные. До глубины 92 м скважина самоизливалась, при дальнейшей проходке самоизлив прекратился вследствие перелива воды из верхнего горизонта в нижний. Предварительная откачка при понижении на 3 м показала дебит от 3 до 5 л/с .

У скважины выполнено четырехазимутальное круговое вертикальное зондирование с целью определения УЭС водоносных пород, характера и направления трещиноватости. На рис. 16 показаны кривые ВЭЗ, полученные при различных азимутах разносов линии АВ, и разрез по скважине. Кривые ВЭЗ имеют тип КН. Элемент К отражает наличие мерзлоты, элемент Н соответствует водоносным трещиноватым породам. В

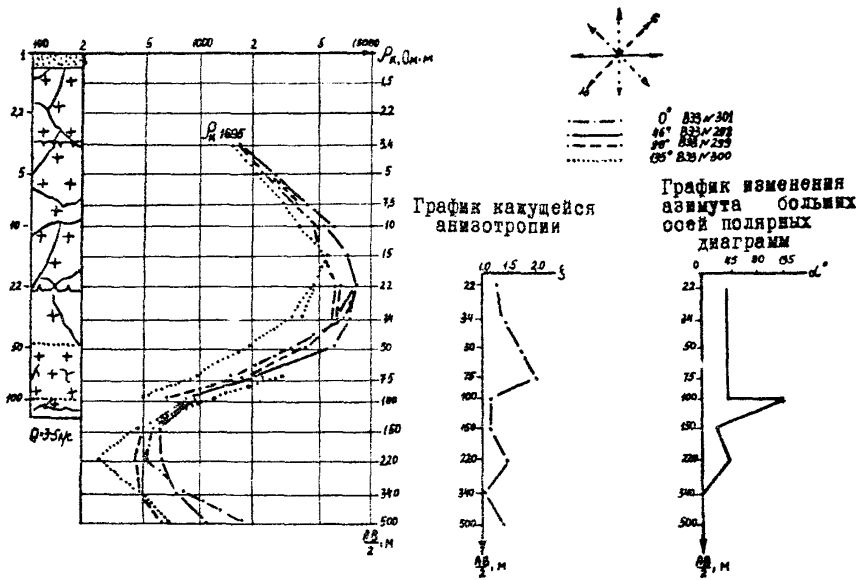

Рис. I6. Кривые круговых ВЭЗ и график кажущейся анизотропии, полученные у скважины № 262:

– песок; – гранит; – трещиноватость; – верхняя (а) и нижняя (б) границы вечной мерзлоты

зависимости от характера графика кажущейся анизотропии, наибольшая степень трещиноватости пород наблюдается при разносах $\frac{AB}{2}$ 50,75,150 и 220 м.

Максимальное значение коэффициента кажущейся анизотропии наблюдается при разносе $\frac{AB}{2}$ = 75 м и составляет ξ = 1,95. В этом же интервале глубин ($H \approx 72$ м) наблюдается максимальный водоприток в скважину. Таким образом, прогноз, сделанный на основании электроразведки, полностью подтвердился как в отношении состава пород, их состояния и степени обводненности, так и относительно тектонического строения участка.

4.4. Поиски пластово-поровых вод в рыхлых породах проводились в одном из артезианских бассейнов, сложенном в верхней части нижнечетвертичными песчано-гравийными отложениями, а в нижней - слабодислоцированными юрскими конгломератами и нижнемеловыми андезитами, кварцевыми порфирами и туфами общей мощностью 300-500 м.

Многолетнемерзлые породы в пределах бассейна распространены почти повсеместно. Их мощность на водораздельных пространствах составляет 70-110 м и более, а в долинах рек понижается до 25-30 м. В комплекс методов, применявшихся для поисков подземных вод, входили вертикальные электрические зондирования и магниторазведка. Зондирования проводились по системе профилей, ориентированных вдоль и вкрест трассы. Расстояния между точками наблюдений изменялись от 100 до 300 м.

Из-за слабой геологической изученности территории и полного отсутствия опорных данных первой задачей являлась качественная расшифровка полученных кривых. Решение этой задачи облегчалось тем, что работы проводились на границе между распространением рыхлых отложений и выходами коренных скальных пород. С одной стороны это позволило получить достоверные сведения о сопротивлении кристаллических пород путем проведения зондирований на обнажениях. С другой стороны закономерное увеличение мощности рыхлых отложений от периферии к центру бассейна уверенно прослеживалось по кривым ВЭЗ, и тем самым геологическая индек-

ация геоэлектрических горизонтов становилась более достоверной.

На первой стадии интерпретации полевых кривых проводилась их разбраковка, затем классификация и группирование однотипных кривых.

Величины ρ_2 и ρ_3 определялись по тем кривым, на которых отмечались большие мощности этих горизонтов, вследствие чего пределы действия принципа эквивалентности становились сравнительно небольшими. Отсутствие исходных данных относительно мощности многолетнемерзлых пород и характера изменения их сопротивления с глубиной не позволило применить палетки, рассчитанные для градиентных сред. Интерпретация выполнялась по обычным палеткам с учетом полученных опорных данных по промежуточным горизонтам. При выполнении количественной интерпретации мощности водоносных горизонтов принимались наименьшими из допустимых. Этим обеспечивалось получение наихудшего для поисков подземных вод варианта интерпретации электроразведочных данных. Такой подход сводил к минимуму возможность получения отрицательного результата при бурении разведочных на воду скважин. По этой же причине мощность многолетнемерзлых пород выбиралась максимальной из пределов, допускаемых действием принципа эквивалентности. Большинство кривых являются четырехслойными типа КН. Первый от поверхности горизонт представлен слоем сезонного протаивания мощностью 0,5-1,5 м и с удельным сопротивлением 200-1000 Ом·м. Второй геоэлектрический горизонт образован мерзлыми осадочными отложениями. Мощность его колеблется в пределах 20-200 м, а УЭС составляют 1500-8000 Ом·м. Талые рыхлые отложения и кора выветривания скальных пород представляют собой третий геоэлектрический горизонт. Подошва слоя погружается с запада на восток от 2-3 до 150-200 м, УЭС слоя меняется в пределах 50-400 Ом·м. Перспективными участками считались зоны увеличения мощности талых рыхлых пород, в том случае, если их удельные сопротивления достаточно велики. Данные интерпретации корректировались результатами применения магнитометрии, с помощью которой

также определялась глубина кровли кристаллических пород. Проведенное бурение в общем подтвердило правомерность такого подхода к интерпретации геофизических данных.

Проведенные работы показывают, что в областях развития артезианских бассейнов, особенно в их краевых частях, где мощность рыхлых отложений еще невелика, вертикальные зондирования могут рассматриваться как ведущий метод в комплексе геофизических исследований.

4.5. Воды четвертичных и аллювиальных отложений для водоснабжения объектов БАМ используются достаточно редко. Следует отметить, что в некоторых случаях они увеличивают дебит скважин, использующих подмерзлотные трещинные воды. Иногда аллювиальные отложения речных долин используют как коллекторы и природные фильтры при эксплуатации поверхностных вод из водохранилищ. Подобная ситуация сложилась на объекте БАМ, где по одному из вариантов проектируется водоснабжение города за счет будущего водохранилища. В задачу геофизических исследований входило изучение геокриологического состояния, литологии и мощности аллювиальных отложений. Работы проводились по методу вертикальных электрических зондирований, выполненных с разносами АВ до 500 м и шагом по профилю 50 м. Первый от поверхности геоэлектрический горизонт имеет небольшую мощность 1–4 м и высокие удельные электрические сопротивления, колеблющиеся в пределах 400–2000 Ом·м. Он представлен перемытыми речными отложениями: галечником, гравием, крупнозернистым песком, находящимся выше уровня грунтовых вод. На одном из профилей высокие удельные сопротивления первого горизонта связаны с остатками сезонной мерзлоты – перелетками. Второй геоэлектрический горизонт представлен водоносными аллювиальными отложениями. Его мощность 8–14 м, а удельные сопротивления слагающих пород меняются в пределах 200–2000 Ом·м в зависимости от литологии и фациально-дисперсного состава аллювиальных отложений. Ко второму геоэлектрическому горизонту относится также и разрушенная верхняя часть протерозойских гранодиоритов.

В основании разреза залегают слаборазрушенные гранодиориты. Их удельное сопротивление составляет 1500–2500 Ом·м. Из-за отсутствия в разрезе многолетнемерзлых пород, интерпретация электроразведочных материалов проводилась по обычным палеткам, рассчитанным для безградиентного разреза. Некоторые трудности интерпретации связаны с тем, что сопротивление аллювиальных отложений по площади меняется достаточно быстро, и опорных данных в подобных условиях оказывается недостаточным.

В рассматриваемом случае условия, допускающие применение ВЭЗ, обычно выполняются, хотя и с некоторыми ограничениями. Прежде всего аллювиальные отложения связаны с речной долиной, и как бесконечный пласт их можно рассматривать лишь при небольших разносах питающей линии. Кроме того, они резко меняются и по удельным электрическим сопротивлениям. Часто сопротивление аллювия мало отличается от нижележащих коренных пород, особенно, если наносы представлены гравийно-галечным материалом. Все это затрудняет интерпретацию кривых зондирований, что хорошо известно из практики геофизических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Вельмина Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы. М., "Недра", 1970.

2. Сумгин Н.И., Генинев Н.Н., Чекотилло А.М. Водоснабжение железных дорог в районах вечной мерзлоты. М., Трансжелдориздат, 1939.

3. Бойков С.А. Электроразведка методом сопротивлений при инженерно-геологических и мерзлотных исследованиях в условиях прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук. М., 1973.

4. Боровинский Б.А. Электро- и сейсмические исследования многолетнемерзлых горных пород и ледников. М., "Наука", 1969.

5. Торицын Б.А. О возможности определения мощности рыхлых наносов методом ВЭЗ в условиях многолетней мерзлоты. Прикладная геофизика, вып. 38. М., 1964.

6. Акимов А.Т. Результаты мерзлотно-геофизических исследований в восточной части Большеземельской тундры. Труды ин-та Мерзлотоведения. М., изд-во АН СССР, 1959.

7. Якупов В.С. Определение мощности современных рыхлых отложений методом вертикального электрического зондирования в районах с низкой температурой многолетнемерзлых пород. Труды ин-та Мерзлотоведения, т.16. М., изд-во АН СССР, 1959.

8. Достовалов Б.Н. Исследование мерзлых пород методом сопротивлений в низовьях реки Индигирки. Труды ин-та Мерзлотоведения, т.16. М., изд-во АН СССР, 1959.

9. Иванов Ю.Г., Поллер В.П., Корзанов В.В. Электроразведка в комплексе геокриологических исследований. Труды НИИЖТа, вып. 152. Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения

в Сибири. Новосибирск, 1974.

10. Р я п о л о в а В.А., Б о г о м а з о в а Т.А. Методические указания по применению ЭВМ для дешифрирования данных вертикального электрического зондирования. М., изд.ЦНИИСа, 1976.

11. П ы л а е в А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М., "Недра", 1968.

12. Б о й к о в С.А. Об учете бокового влияния талых пород при электроразведке методом ВЭЗ в условиях развития многомерных пород. В сб."Мерзлотные исследования, вып. 10. М., изд-во МГУ, 1970.

13. К и р и л л о в В.А. Электроразведка при поисках подмерзлотных вод на территории Северо-Востока. Ежемесячный производственно-технический бюллетень Совета Народного хозяйства Северо-Восточного Экономического района, №5, "Колыма", 1964.

14. Я к у п о в В.С. Удельное электрическое сопротивление мерзлых скальных пород. - "Геология и геофизика", Новосибирск,1966, № 12.

15. П р и г о д а В.Я. Предложения по применению геофизических методов при инженерно-геологических исследованиях тоннельных участков. М., изд. ЦНИИСа, 1970.

16. К о р к и н а Р.И. Интерпретация кривых ВЭЗ, полученных на разрезах с градиентным изменением сопротивления в промежуточном слое. Материалы к научно-технической конференции по инженерным изысканиям 11-15 мая 1967г. М., изд. ЦНИИСа, 1967.

gost.e-ecolog.ru