ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке



Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

Производственный и научно-исследовательский
институт по инженерным изысканиям
в строительстве
(ПНИИИС) Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ

по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке

Москва Стройиздат 1987

УДК 550.83 + 528.48:624.139

Рекомендованы к изданию решением секции геофизики и инженерной сейсмологии Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке/ПНИИИС — М.: Стройиздат, 1987. — 88 с.

Рассмотрены физико-геокриологические предпосылки применения геофизических методов с целью изучения мерзлых пород. Определен комплекс наземных и скважинных геофизических методов при мерзлотной съемке и районировании. Указаны способы решения наиболее распространенных задач мерзлотной съемки. Описана последовательность проведения геофизических работ при мерзлотной съемке на различных стадиях проектирования.

Для геофизиков и инженеров-геологов, проводящих изыскания в районах распространения мерзлых пород.

Табл. 13, ил. 40

Разработаны канд. геол.-минерал. наук А.Н. Боголюбовым, инженерами Н.П. Боголюбовой и Е.Я. Мозгановой.

Р $\frac{3202000000-359}{047(01)-87}$ Инструкт.-нормат., 1 вып., — 85 — 87

© Стройиздат, 1987

1. ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МЕРЗЛОТНОЙ СЪЕМКИ И РАЙОНИРОВАНИЯ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА НА ПОСТОЯННОМ И НИЗКОЧАСТОТНОМ ТОКЕ

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (УЭС) МЕРЗЛЫХ ПОРОД

1.1. Мерзлые породы состоят из минеральных и органических частиц, льда, незамерзшей воды и газообразной составляющей, заполняющей свободное поровое пространство. Присутствие в мерзлых породах льда как породообразующего минерала изменяет электрические свойства пород, присущие им в талом состоянии, а многообразное взаимодействие незамерзшей воды с минеральным скелетом и льдом делает очень широким диапазон изменения электрических свойств пород в зависимости от их состава, структуры, типа криогенных текстур и температуры.

1.2. Подавляющее большинство породообразующих минералов относятся к диэлектрикам и характеризуются весьма большими величинами УЭС (10^7-10^{12} и более Ом·м), которые можно принять за бесконечно большие с точки зрения практической электроразведки. Исключение представляет небольшая группа минералов и пород, обладающих электронной проводимостью. УЭС этих минералов и пород изменяется от сотых долей до первых десятков Ом·м в зависимости от их состава. Во всех случаях не обнаружено сколько-нибудь заметной зависимости УЭС породообразующих минералов от температуры в диапазоне от +20 до -20°.

1.3. УЭС льда из дистиллированной воды меняется от 10^7 до 10^{10} Ом·м при понижении температуры от 0 до -50°. В более общем случае УЭС льда зависит от концентрации (минерализации) замерзшего электролита и температуры. Увеличение концентрации исходного электролита при заданной температуре приводит к уменьшению УЭС льда главным образом за счет образования пленки незамерзшей воды между отдельными кристаллами льда и увеличения ее толщины. УЭС льда при уменьшении концентрации солей возрастает в первом приближении пропорционально корню квадратному из величины концентрации. Представление о температурном ходе УЭС льда при различной концентрации исходного раствора можно получить на основании приближенных зависимостей (рис. 1) .

1.4. На основании имеющихся данных об изменении УЭС льда в зависимости от концентрации (минерализации) исходного раствора и температуры можно ожидать, что УЭС рыхлосвязанной незамерзшей воды в основном определяется ее минерализацией в диапазоне температур от 0 до -2 -3°C.

1.5. Электропроводность подавляющего большинства горных пород имеет ионную природу, поэтому УЭС талых пород тесно связано с их пористостью, степенью заполнения пор водой и ее минерализацией. При отрицательных температурах свободная вода переходит в лед, и прохождение тока через мерзлую породу осуществляется по пленкам незамерзшей, главным образом связанной воды, окружающим зерна минерального скелета и льда. В результате сечение токопроводящих путей уменьшается, а длина их увеличивается, что приводит к увеличению УЭС пород при их промерзании. Величина УЭС целиком зависит от факторов, определяющих количество и характер распределения незамерзшей воды в породе. Такими факторами являются состав, строение, пористость, льдистость, криогенная текстура и температура породы.

1.6. УЭС мерзлых скальных пород определяется незамерзшей водой, облекающей ледяные включения и зерна продуктов выветривания по трещинам и порам. Заполнитель представлен глинистым материалом с достаточно высоким содержанием неза-

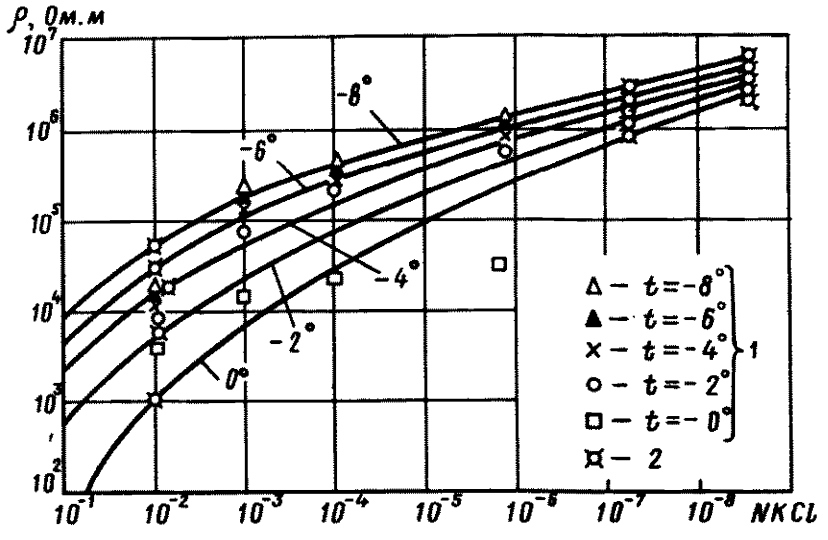


Рис. 1. Приближенная зависимость УЭС льда от температуры и минерализации
1 - по данным В.П. Мельникова и А.М. Снегирева; 2 - по данным Ю.Д. Зыкова

мерзшей воды. В мерзлых скальных породах лед не создает замкнутых систем, поэтому УЭС сильнотрещиноватых скальных пород, как правило, меньше УЭС монолитов даже при относительно большой льдистости первых. УЭС мерзлых скальных пород зависит в первую очередь от их трещиноватости (пористости), а во вторую - от их состава, в чем можно убедиться, проанализировав данные, помещенные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование и возраст пород	Состояние пород	УЭС, Ом/м, пород	
		талых	мерзлых при температуре от 0 до до -2°С
Архейские граниты, гнейсы и сланцы	Сильнотрещиноватые	150-1000	1 500-10 000
	Трещиноватые	1500-5000	10 000-60 000
	Монолитные	12 000-30 000	50 000-100 000
Доломиты, известняки и мергели нижнего кембрия	Трещиноватые	500-2000	5 000-10 000
	Монолитные	6000-9000	19 000-36 000
Песчаники нижней юры	Сильнотрещиноватые	100-200	900-2 500
	Трещиноватые	300-500	5 000-10 000
	Монолитные	1000-1500	15 000-30 000

1.7. Среди рыхлых мерзлых пород наибольшими величинами УЭС обладают пески, галечники и другие грубодисперсные породы, содержащие незамерзшую воду в незначительных количествах. При переходе температуры через 0° почти вся свободная вода в них переходит в лед, а УЭС возрастает в десятки, а иногда в сотни раз. Мерзлые супеси и суглинки, в которых незамерзшей воды значительно больше, чем в песке, характеризуются промежуточными значениями УЭС. Наибольшее количество незамерзшей воды содержится в глинах, вследствие чего при промерзании их УЭС увеличивается незначительно (в 2-3 раза). Обобщенные данные об изменении УЭС рыхлых мерзлых пород с массивной криогенной текстурой приведены в табл. 2.

1.8. Включения льда и минеральные частицы не создают замкнутых систем в мерзлых породах с массивной криогенной текстурой, поэтому УЭС таких пород преимущественно зависит от содержания в них незамерзшей воды при заданной температуре. Наиболее интенсивные изменения УЭС наблюдаются в песках в интервале температур от 0 до -2°. Эти изменения значительно слабее в глинистых грунтах с массивной криогенной текстурой. Приближенная зависимость УЭС мерзлых рыхлых пород с массивной криогенной текстурой от их состава и температуры приведены на рис. 2.

1.9. Изменение УЭС мерзлых пород со шлировыми криогенными текстурами также контролируется содержанием незамерзшей воды в породе, но в иной степени по сравнению с тем, что имеет место в породах с массивной криогенной текстурой (табл. 3).

Объясняется это тем, что ледяные включения в породе образуют замкнутые системы, прерывающие токовые пути по пленкам незамерзшей воды, и УЭС мерзлой породы начинает зависеть от электропроводности льда, мощности и взаимного расположения шлиров льда в ней.

1.10. Зависимость УЭС мерзлых пород от состава, типа криогенной текстуры, льдистости и температуры может быть изучена с помощью аналитических расчетов для слоистой модели грунта.

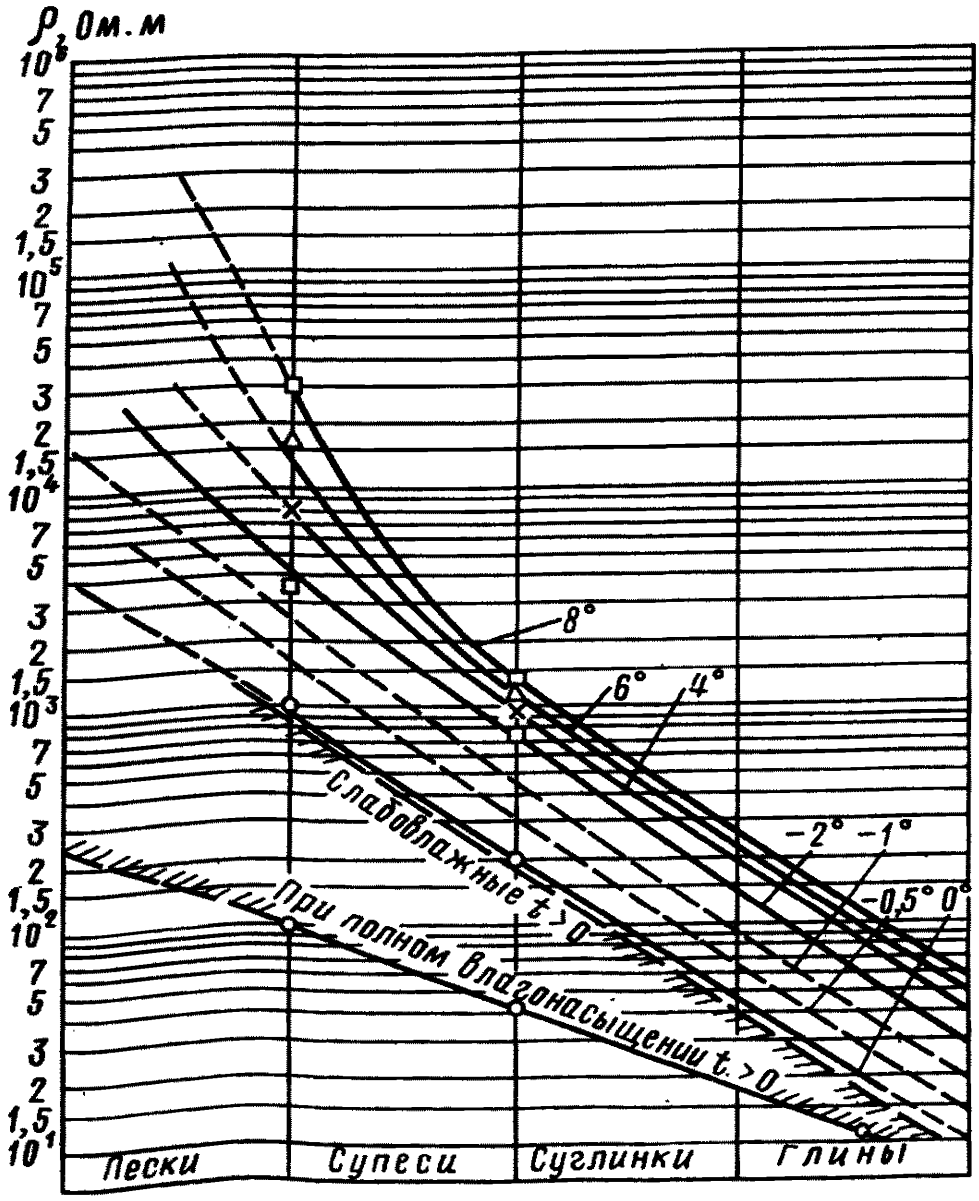


Рис. 2. Приближенная зависимость УЭС мерзлых рыхлых пород с массивной криогенной текстурой от их состава и температуры

Таблица 2

Состав и УЭС пород		При температуре, °С					
		выше 0	от 0 до -0,5	-1	-2	-3	-6
Пылеватые пески, легкие суглинки	содержание незамерзшей воды, %	15-13	7-15	4-6	2-3	1-2	-
	УЭС, Ом·м	50-100	500-2000	1500-3600	2500-4500	8000-10 000	12 000-25 000
Тяжелые супеси, легкие суглинки	содержание незамерзшей воды, %	20-40	10-20	7-15	5-13	4-12	2-10
	УЭС, Ом·м	40-70	200-500	500-900	750-900	950-1000	

Таблица 3

Состав и УЭС пород	При температуре, °С						
	выше 0	от 0 до -0,5	-1	-2	-4	-5	-7
Содержание незамерзшей воды в породе между шлирами льда, %	20-40	10-20	7-15	5-13	3-11	2-10	-
УЭС тяжелых супесей, легких суглинков со шлировыми криогенными текстурами, Ом·м	40-70	300-2000	1400-2500	2200-5000	4500-7000	7000-20 000	12 000-40 000

1.11. Рассмотрим зависимости, позволяющие найти электрические характеристики слоистой, сетчато-слоистой и равномерно-сетчатой сред по известным УЭС прослоев и вмещающей среды. Обозначив $\rho_л$ УЭС льда, $\rho_{пр}$ - УЭС породы с массивной криогенной текстурой, залегающей между шлирами льда, получим для мерзлых пород со слоистыми криогенными текстурами:

поперечное УЭС мерзлой породы ρ_n ;

$$\rho_n = \frac{\rho_{пр} + m\rho_л}{1+m} = \rho_{пр}\frac{1+\mu m}{1+m}; \qquad (1)$$

продольное УЭС мерзлой породы ρ_t ;

$$\rho_t = \frac{\rho_{пр}\rho_л(1+m)}{m\rho_{пр}+\rho_л} = \rho_{пр}\frac{\mu(1+m)}{m+\mu}; \qquad (2)$$

среднеквадратическое УЭС мерзлой породы ρ_m ;

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n\rho_t} = \rho_{пр}\sqrt{\frac{\mu(1+m)}{m+\mu}};$$

коэффициент анизотропии мерзлой толщи λ :

$$\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t} = \sqrt{\frac{(1+\mu m)(m+\mu)}{\mu(1+m)^2}},$$

где $$m = \frac{\Sigma h_л}{\Sigma h_{пр}};$$

$\Sigma h_л$ - суммарная мощность ледяных шлиров в единице объема;
$\Sigma h_{пр}$ - суммарная мощность прослоев мерзлой породы с массивной криогенной текстурой также в единице объема.

1.12. Для сетчато-слоистой мерзлой толщи справедливы выражения:

$$\rho_n = \rho_{пр}\left\{\frac{m\mu}{1+m} + \frac{(1+q)^2\mu}{(1+m)[(1+q)^2-1+\mu]}\right\}; \qquad (5)$$

$$\rho_t = \rho_{пр}\left\{\frac{q\mu}{1+m} + \frac{(1+m)\mu}{(1+m)(1+q)-1+\mu}\right\}; \qquad (6)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n\rho_t}\ ;\quad \lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t}\ , \qquad (7)$$

где m - отношение суммарной мощности льда, составляющего основную систему шлиров, к суммарной мощности породы между ними; q - отношение суммарной мощности льда, относящегося к подчиненным системам шлиров, к суммарной мощности породы между ними.

1.13. В случае равномерно-сетчатой мерзлой толщи $m = q$, $\lambda = 1$,

$$\rho_m = \rho_t = \rho_n = \rho_{пр}\left\{\frac{m\mu}{1+m} + \frac{(1+m)\mu}{(1+m)^2-1+\mu}\right\}. \qquad (8)$$

1.14. Из теории распространения постоянного электрического тока в анизотропных средах следует, что в результате интерпретации кривых $\rho_к$ ВЭЗ можно определить величины ρ_m и λ мерзлой толщи с горизонтальными слоистыми или сетчато-слоистыми криогенными текстурами.

1.15. При измерениях в скважинах зондами по методу сопротивления может быть определена только величина ρ_t мерзлых пород.

1.16. Поперечное сопротивление мерзлой толщи со слоистыми и сетчато-слоистыми криогенными текстурами не определяется с помощью наземных и скважинных методов и может быть вычислено по формуле

$$\rho_n = \frac{\rho_m^2}{\rho_t}. \qquad (9)$$

1.17. По формулам (5)-(8) вычислены значения ρ_m, ρ_t и λ для мерзлых пород различного состава с равномерной сетчато-слоистой криогенной текстурой.

При этом соотношение прослоев льда менялось в пределах $0 \leq q/m \leq 1$, что позволило охватить весь диапазон криогенных текстур от сетчатых до слоистых. Требуемые величины $\rho_д$ и $\rho_{пр}$ снимались с обобщенных кривых (см. рис. 1 и 2) с учетом влияния температуры. Расчеты выполнены для значений M =20 (супеси), M = 100 (легкие суглинки - тяжелые супеси), M = 500 (суглинки) и M = 1000-3000 (тяжелые суглинки - глины), где $M = \frac{\rho_д}{\rho_{пр}}$.

1.18. Результаты вычислений представлены в виде номограмм, связывающих отношения $\rho_m/\rho_{пр}$ и $\rho_t/\rho_{пр}$ с объемной льдистостью $Л_в$ и коэффициентом анизотропии λ мерзлой толщи (рис. 3, 4, 5, 6). Индексы кривых соответствуют величине отношения q/m. С помощью этих номограмм можно найти объемную льдистость $Л_в$ по значениям ρ_m и λ или ρ_t и λ, получаемым в результате интерпретации кривых ВЭЗ или каротажа КС.

1.19. Задача решается в следующей последовательности. Зная состав и приблизительную температуру (с точностью до $\pm 1^{\circ}C$) мерзлой породы, находят по номограммам на рис. 1 и 2 соответствующие значения $\rho_д$ и $\rho_{пр}$. Пользуясь ими, вычисляют $M = \frac{\rho_д}{\rho_{пр}}$ и $\frac{\rho_m}{\rho_{пр}}$ или $\frac{\rho_t}{\rho_{пр}}$. Далее выбирают номограмму с индексом "M", наиболее близким к полученному значению, и по ней определяют величины $Л_в$ и q/m по известным значениям $\rho_m/\rho_{пр}$ и λ или $\rho_t/\rho_{пр}$ и λ.

Для облегчения решения этой задачи удобно пользоваться подвижным прозрачным транспарантом, например калькой.

1.20. На транспаранте обозначают оси координат в масштабе номограммы, на которых соответственно откладывают полученные значения $\rho_m/\rho_{пр}$, $\rho_t/\rho_{пр}$ или λ. Далее прозрачный транспарант передвигают по номограмме до тех пор, пока значения $\rho_m/\rho_{пр}$ и λ не совместятся с кривыми, имеющими одинаковый индекс. При совмещении транспарант укажет на оси абсцисс номограммы значение $Л_в$, а индекс кривых - величину отношения q/m. Необходимо, чтобы оси координат транспаранта и номограммы были всегда параллельны, а их абсцисс совпадали.

1.21. Если интерпретируемые значения M значительно отличаются от указанных на номограммах, то $Л_в$ и q/m могут быть найдены путем интерполяции величин, полученных по номограммам для больших и меньших значений M. По номограммам также можно определить λ и q/m по известным значениям $Л_в$ и $\rho_m/\rho_{пр}$, $\rho_t/\rho_{пр}$ или $\frac{\rho_m}{\rho_{пр}}$ и $\frac{\rho_t}{\rho_{пр}}$. Точность решений в этих случаях не выходит за пределы $\pm 0,1$.

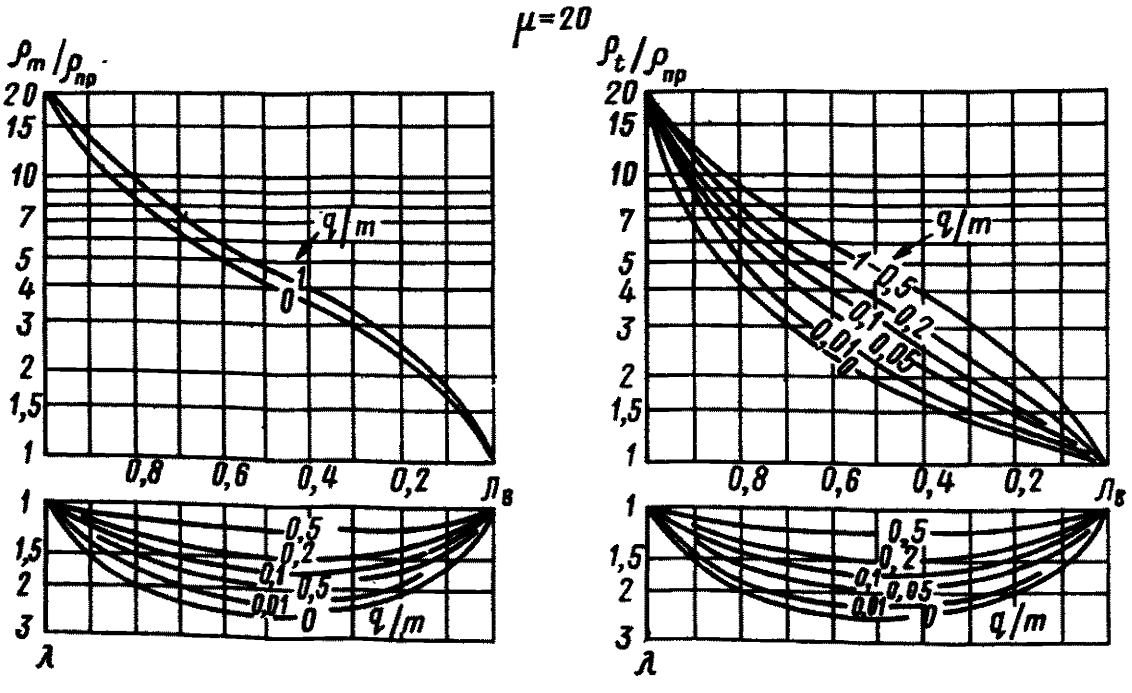


Рис. 3. Номограмма, изображающая зависимости ρ_m и ρ_t от $Л_в$ и типа криогенной текстуры при M= 20 (супеси)

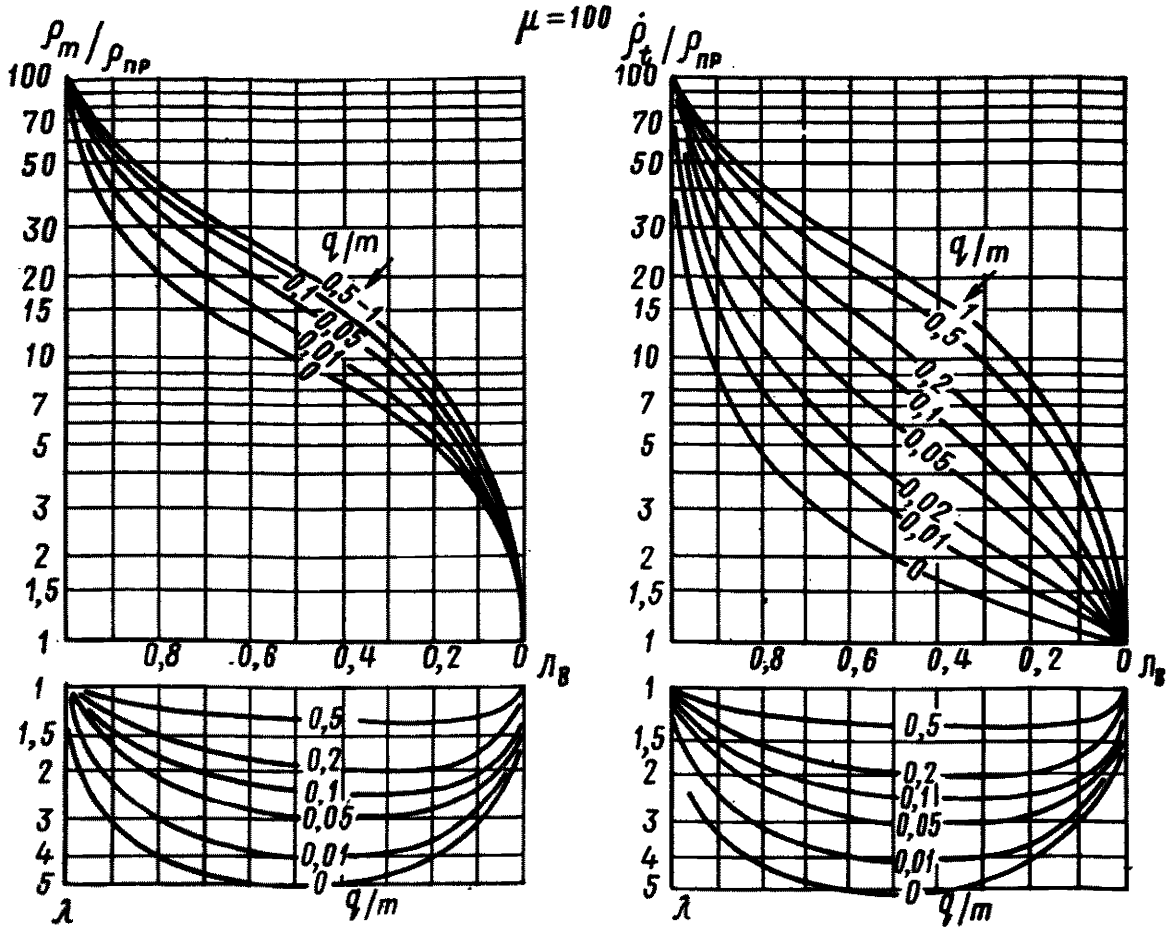


Рис. 4. Номограмма, изображающая зависимости ρ_m и ρ_t от $Л_в$ и типа криогенной текстуры при $M = 100$ (тяжелые супеси - легкие суглинки)

1.22. Решение становится неопределенным, если известно только $\rho_m/\rho_{пр}$ или $\rho_t/\rho_{пр}$. В этом случае можно получить с помощью номограмм предельные значения λ и $Л_в$ для слоистой $(q/m = 0)$ и сетчатой $(q/m \approx 0{,}5\text{-}1)$ криогенных текстур или λ и q/m для наиболее вероятных (распространенных) в районе исследований значений $Л_в$.

СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ И ТИПИЧНЫЕ АНОМАЛИИ НА КРИВЫХ ВЭЗ И ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ НАД НЕЙ

1.23. Обобщенная геоэлектрическая модель мерзлой толщи показана на рис. 7. В весенне-летне-осенний период, когда применение электроразведки на постоянном токе наиболее рентабельно, в однородной по составу мерзлой толще могут быть выделены четыре горизонта.

1.24. Первый от поверхности горизонт сезонно-талых пород характеризуется более низкими по сравнению с мерзлыми породами УЭС. Мощность талого слоя меняется в широких пределах как по площади, так и во времени. Она минимальна весной и в начале лета на торфяниках и под моховыми кочками и увеличивается в несколько раз в конце лета и осенью в пределах полос стока надмерзлотных вод, между моховыми кочками.

1.25. Второй от поверхности геоэлектрический горизонт относится к слою сезонных изменений температуры. В зависимости от состава мерзлой толщи и условий теплообмена на ее поверхности глубина залегания подошвы этого геоэлектрического горизонта может меняться от 8 до 15 м. Этот слой большую часть года характери-

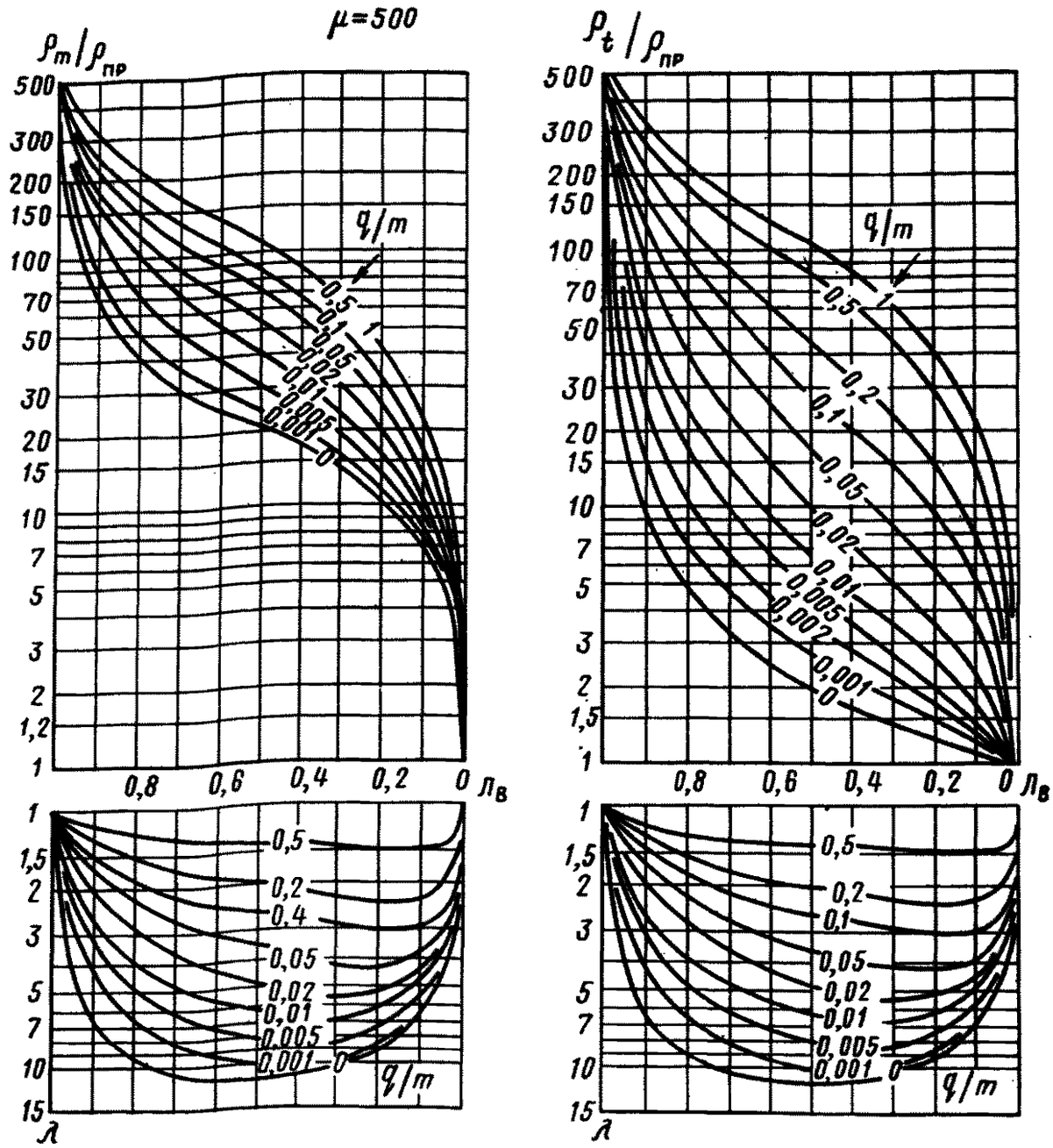


Рис. 5. Номограмма, изображающая зависимости ρ_m и ρ_t от $\Lambda_в$ и типа криогенной текстуры при M = 500 (суглинки)

зуется наиболее низкими температурами из-за проникновения в глубь волны зимнего холода и соответственно наиболее высокими УЭС.

1.26. Третий геоэлектрический горизонт представлен мерзлыми породами, температура и УЭС которых меняются с глубиной в соответствии с геотермическим градиентом. Поскольку температура пород здесь всегда выше, чем в слое сезонных колебаний температуры, то и УЭС третьего слоя всегда меньше, чем у вышележащих пород. Так как УЭС пород убывает с глубиной, третий слой электрически анизотропен. Коэффициент анизотропии зависит от состава мерзлой породы и градиента температуры и в отдельных случаях может достигать λ = 1,5-2.

1.27. Четвертый геоэлектрический горизонт относится к талым породам и обладает более низкими значениями УЭС по сравнению с вышележащими породами.

1.28. Обобщенный геоэлектрический разрез однородной мерзлой толщи относится к типу KQ ($\rho_1 < \rho_2$; $\rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) и выделяется соответствующими аномалиями на кривых ЭП и ВЭЗ.

1.29. Боковая граница мерзлой толщи обнаруживается на графиках $\Delta u_t / J$ ($\rho_к$) и $\Delta u_n / J$ ЭП в виде аномалий, свойственных контактам двух сред с большим перепадом УЭС. Амплитуды этих аномалий, как правило, максимальны.

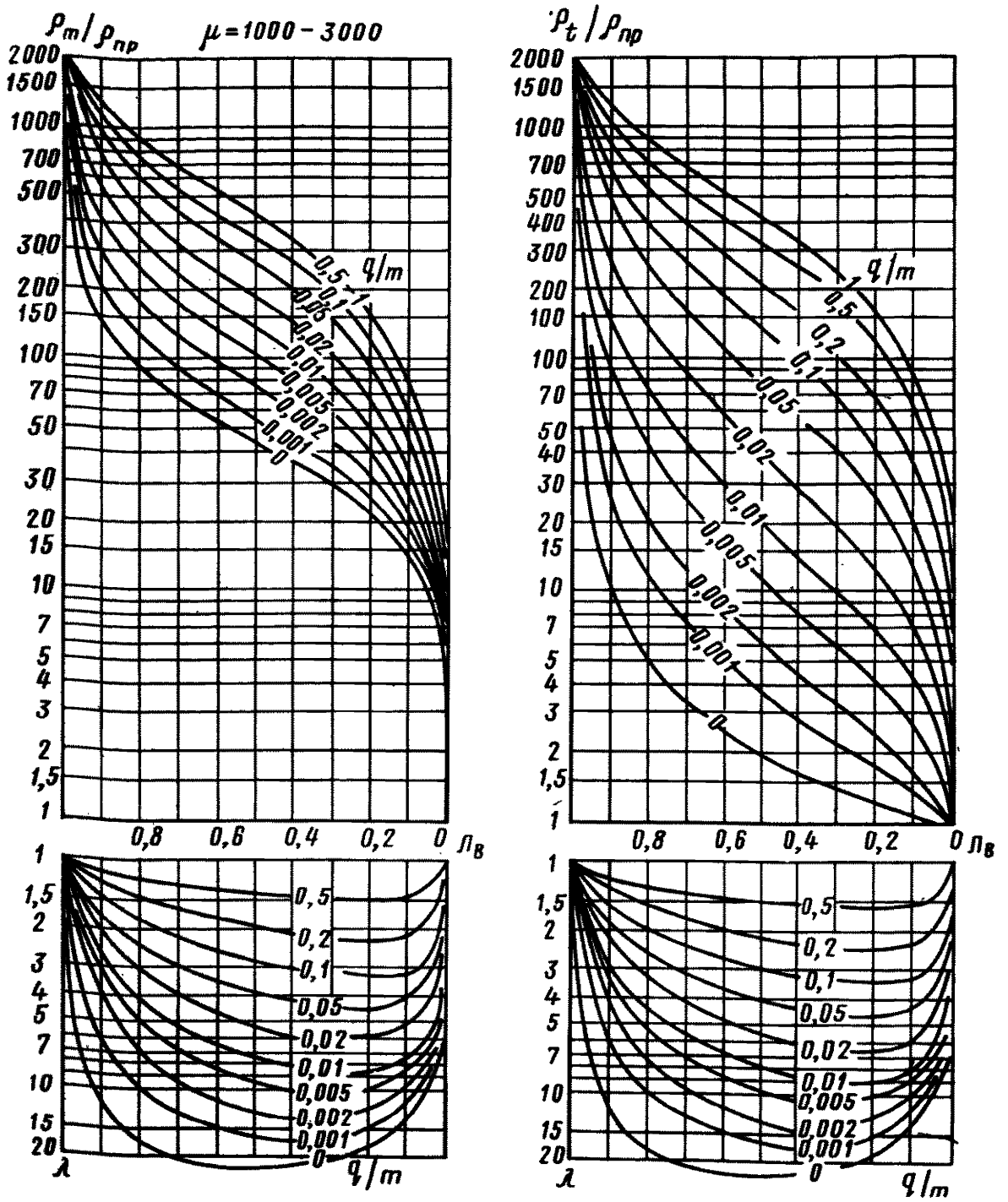


Рис. 6. Номограмма, изображающая зависимости ρ_m и ρ_t от $Л_в$ и типа криогенной текстуры при μ= 1000-3000 (тяжелые суглинки-глины)

1.30. На кривых $\rho_к$ и $\Delta u_t/\Delta u_t$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС (см. рис. 7, ВЭЗ №4) влияние боковой границы мерзлой толщи присутствует в виде аномалий, характерных для вертикального контакта или ступени с большой амплитудой смещения.

1.31. Кривые $\rho_к$ симметричных ВЭЗ искажены настолько, что по ним не представляется возможным определить количество и последовательность залегания геоэлектрических горизонтов в разрезе, а также УЭС и мощности.

1.32. Участки с повышенной мощностью слоя сезонного протаивания выделяются на графиках ЭП МДС аномалиями, характерными для объектов с пониженным УЭС. Амплитуды аномалий на кривых $\Delta u_t/J(\rho_к)$ и $\Delta u_n/J$ зависят от соотношения глубин

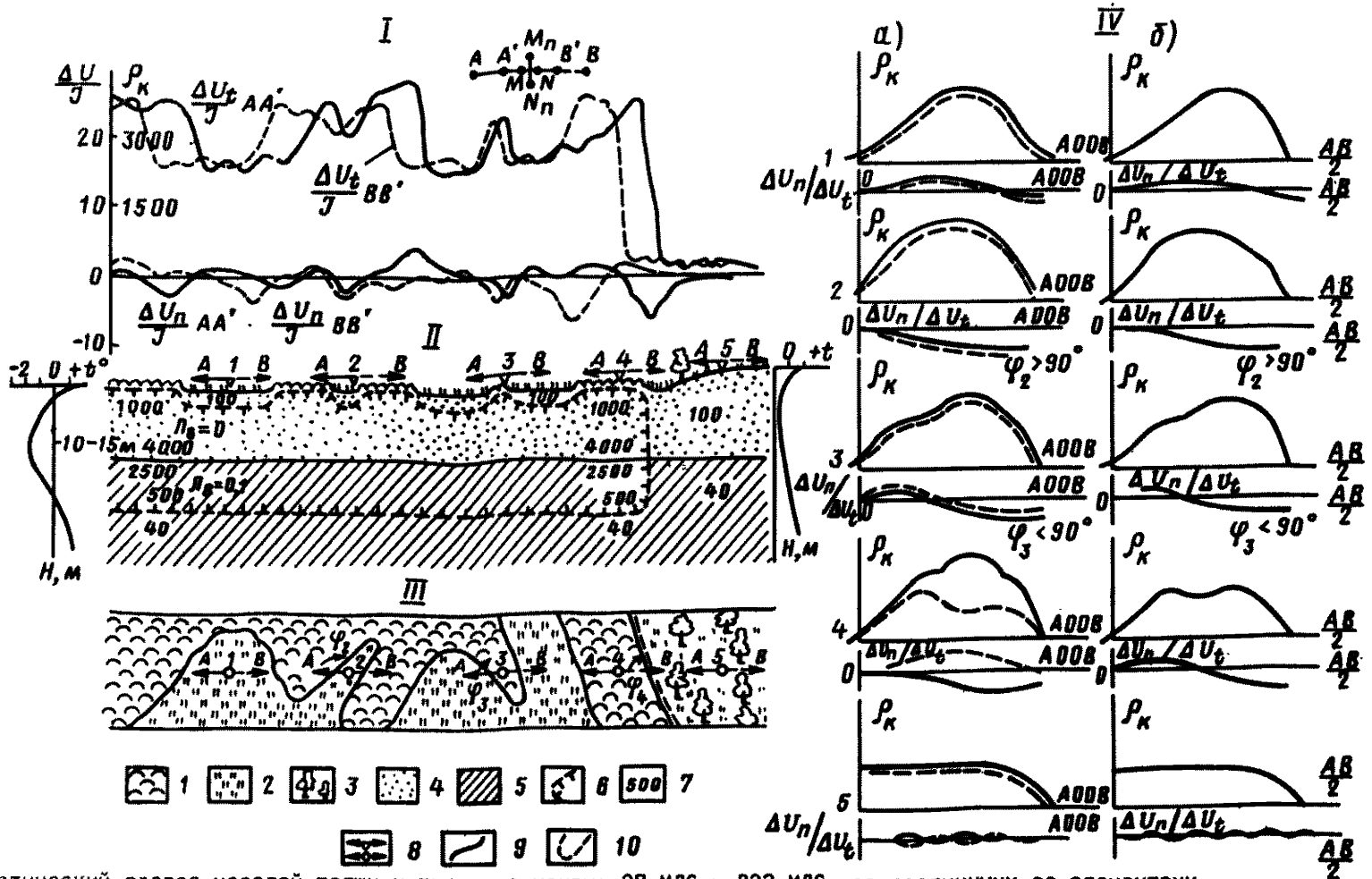


Рис. 7. Схематический разрез мерзлой толщи и типичные кривые ЭП МДС и ВЭЗ МДС над различными ее элементами
I - кривые двустороннего дипольного ЭП МДС; II - схематический геоэлектрический разрез мерзлой толщи; III - простирание геоэлектрических границ; IУ - кривые ВЭЗ МДС; а - двусторонние трехэлектродные; б - симметричные; 1 - бугристый торфяник; 2 - полосы стока; 3 - лесополоса; 4 - песок; 5 - суглинок; 6 - граница мерзлоты; 7 - значение УЭС пород в пределах слоя; 8 - пункты ВЭЗ и направление разносов питающих электродов; 9 - кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ и $\Delta U_t/I$ и $\Delta U_n/I$ ЭП для левых установок *AMN* и *AA'MN*; 10 - кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ и $\Delta U_t/I$ и $\Delta U_n/I$ ЭП для правых установок *MNB* и *MNB'B*.

протаивания и длин питающих линий (рабочих расстояний) измерительных установок и в случае небольших по размеру установок могут быть соизмеримы с амплитудами аномалий над боковой границей мерзлой толщи.

1.33. Если поперечные размеры зоны протаивания пород в 5-10 раз превышают глубину протаивания, то ее боковые границы не влияют на характер аномалий на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ (см. рис. 7, ВЭЗ №1). Аномалии на кривых $\rho_к$ ВЭЗ соответствуют четырехслойному строению мерзлой толщи с $\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$.

1.34. Если поперечник протаявшего участка соизмерим с глубиной протаивания, на кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС наблюдаются аномалии, характерные для грабенов и воронок, заполненных проводящей средой (см. рис. 7, ВЭЗ №2). Типичным для них признаком служит воздымание левой (начальной) ветви кривых $\rho_к$ под углом более 45^0 по отношению к оси абсцисс, сопровождающееся достаточно заметным перегибом кривой $\rho_к$ на разносах AB/2 (AO, OB), на которых ослабевает влияние боковых границ при существующем соотношении УЭС пород в первом и втором геоэлектрических слоях.

1.35. Интерпретация начальных ветвей таких кривых $\rho_к$ с помощью палеток ЦС-2-1 и последующая замена первых двух слоев одним эквивалентным слоем позволяет избавиться от необходимости выделения в разрезе эквивалентного фиктивного дополнительного слоя и повысить точность определения мощностей и УЭС существующих слоев.

1.36. Участки с небольшой глубиной сезонного протаивания выделяются на кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{J}$ ЭП МДС аномалиями, свойственными для тел с повышенными значениями УЭС. При больших поперечных размерах таких участков кривые $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ ВЭЗ МДС соответствуют четырехслойному строению среды с границами, залегающими параллельно земной поверхности, независимо от схемы измерительной установки.

1.37. Если поперечные размеры участка с небольшой глубиной протаивания сравнительно невелики, то на кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС наблюдаются аномалии, характерные для горста или ступени в высокоомном основании (см. рис. 7, ВЭЗ №3). Типичным их признаком является присутствие в левой ветви кривых $\rho_к$ элемента, свойственного для горизонтально-слоистых разрезов явного вида А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) или неявного вида КН($\rho_1 < \rho_2$, $\rho_2 > \rho_3; \rho_3 < \rho_4$), сопровождающегося знакопеременными аномалиями на кривых $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$.

1.38. Интерпретация подобных кривых $\rho_к$ с помощью палеток для горизонтально-слоистых сред приводит к выделению в разрезе одного или двух фиктивных слоев и к значительным ошибкам при определении мощностей и УЭС реально существующих геоэлектрических горизонтов.

1.39. Применение приемов, специально разработанных для интерпретации кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС, позволяет установить элементы залегания боковых границ горста или ступени и избежать ошибок при оценке геоэлектрических параметров мерзлой толщи.

1.40. Изменения в составе, льдистости или температуре мерзлых пород сопровождаются образованием в них дополнительных наклонных геоэлектрических границ и как следствие к формированию дополнительных аномалий на кривых $\rho_к$, $\Delta U_n/J$; $\Delta U_n/\Delta U_t$ ЭП и ВЭЗ МДС.

1.41. Изменения типа криогенной текстуры не создают границ, дополнительных к существовавшим ранее, но приводят к смещению экстремумов на кривых $\rho_к$ ВЭЗ за счет изменения коэффициента анизотропии всей мерзлой толщи или отдельных ее слоев. Все это является причиной многообразия типов аномалий на кривых $\rho_к$, $\Delta U_n/J$; $\Delta U_n/\Delta U_t$ ЭП и ВЭЗ МДС над мерзлыми толщами различного состава и строения. Многочисленные зависимости УЭС мерзлых пород открывают широкие возможности для применения электроразведочных методов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях в области развития ММП.

1.42. При исследовании мерзлых толщ требуется тщательный выбор методики полевых работ, а также методов, позволяющих получить максимальное количество информации. Положение существенно упрощается, когда влияние какого-либо мерзлотно-геологического фактора преобладает. К их числу относятся следующие частные геоэлектрические модели мерзлой толщи.

1.43. Геоэлектрическая модель таликов приведена на рис. 8. Боковые границы несквозных и межмерзлотных таликов фиксируются на графиках $\Delta U_t/\rho_к$ и $\Delta U_n/J$ ЭП МДС в виде аномалий контактного типа, сходных с теми, которые наблюдаются над боковыми границами мерзлой толщи или сквозного талика. Указанное сходство тем больше, чем меньше действующее расстояние измерительных установок и глубже талик.

1.44. Кривые $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС, полученные над мерзлой толщей вблизи боковых границ талика (см. рис. 8, ВЭЗ № 1 и 4), имеют все признаки бокового влияния вертикального контакта или ступени и будучи проинтерпретированы соответствующим образом позволяют определить местоположение и элементы залегания горизонтальных и наклонных границ.

1.45. Характерной особенностью несквозных таликов является присутствие в нижней части разреза высокоомного опорного горизонта, в результате чего правые ветви кривых $\rho_к$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ (см. рис. 8, ВЭЗ № 2) составляют угол с осью абсцисс, близкий к 45°, если поперечные размеры талика достаточно велики, и более 45°, если глубина талика соизмерима с его шириной. Величины $\rho_к$ в левой ветви кривых ВЭЗ соответствуют УЭС талых пород

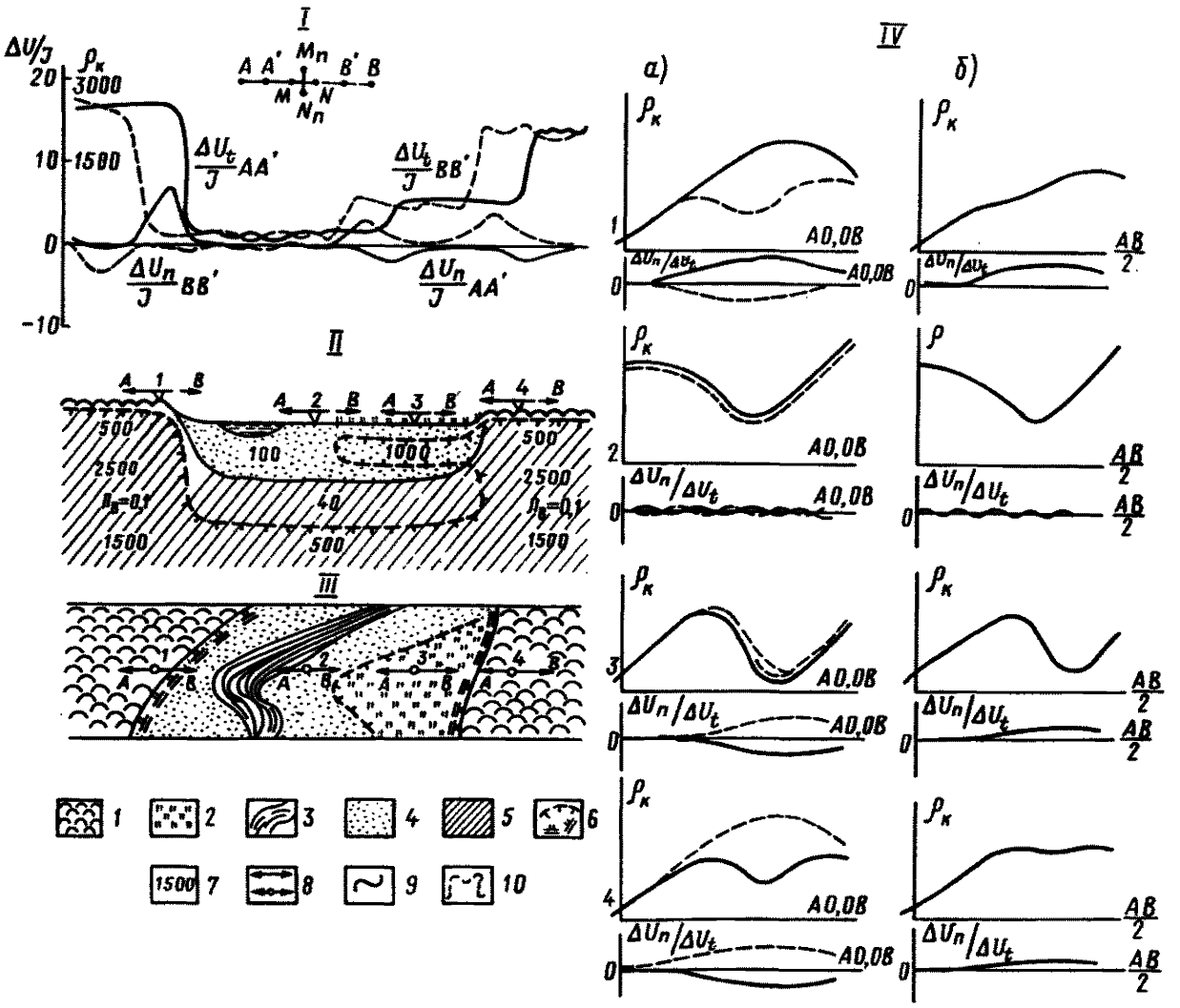


Рис. 8. Схематический разрез мерзлой толщи с несквозными таликами и типичные кривые ЭП и ВЭЗ МДС над различными ее элементами: I - кривые двустороннего дипольного ЭП МДС; II - схематический разрез мерзлой толщи: III - простирание геоэлектрических границ: IУ - типичные кривые ВЭЗ МДС - а - двусторонние трехэлектродные; б - симметричные; 1 - бугристый торфяник; 2 - полосы стока; 3 - река; 4 - песок; 5 - суглинок; 6 - граница мерзлоты; 7 - значение УЭС пород в пределах слоя; 8 - пункты ВЭЗ и направление разносов питающих электродов; 9 - кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U/J$ ЭП для левых установок *AMN* и *AA'MN* : 10 - те же кривые для правых установок *MNB MNB'B*

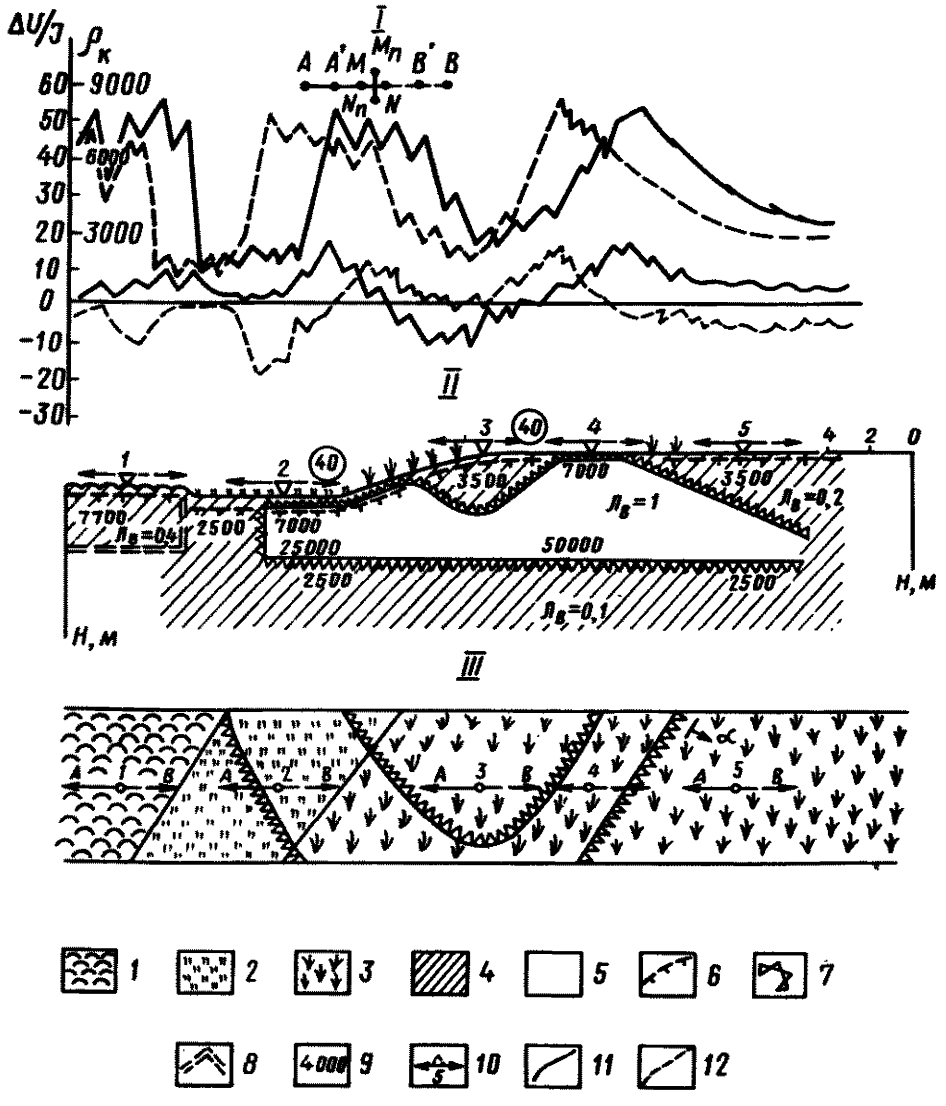


Рис. 9. Геоэлектрическая модель мерзлой толщи, содержащая в разрезе пластовые льды или сильнольдистые породы

I - кривые двустороннего дипольного ЭП МДС; II - схематический геоэлектрический разрез мерзлой толщи; III - простирание геоэлектрических границ; IV - типичные кривые ВЭЗ МДС - а -двустронние трехэлектродные; б - симметричные; 1 - бугристый торфяник; 2 - полосы стока; 3 - кустарник; 4 - мерзлые породы; 5 - лед; 6 - граница мерзлоты; 7 - граница ледяного тела; 8 - сильнольдистые породы; 9 - УЭС пород; 10 - точки ВЭЗ; 11 - кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ и $\Delta U_t/I(\rho_к)$ и $\Delta U_n/I$ ЭП для левых установок *AMN* и *AA'MN*; 12 - те же кривые для правых установок *MNB* и *MNB'B*

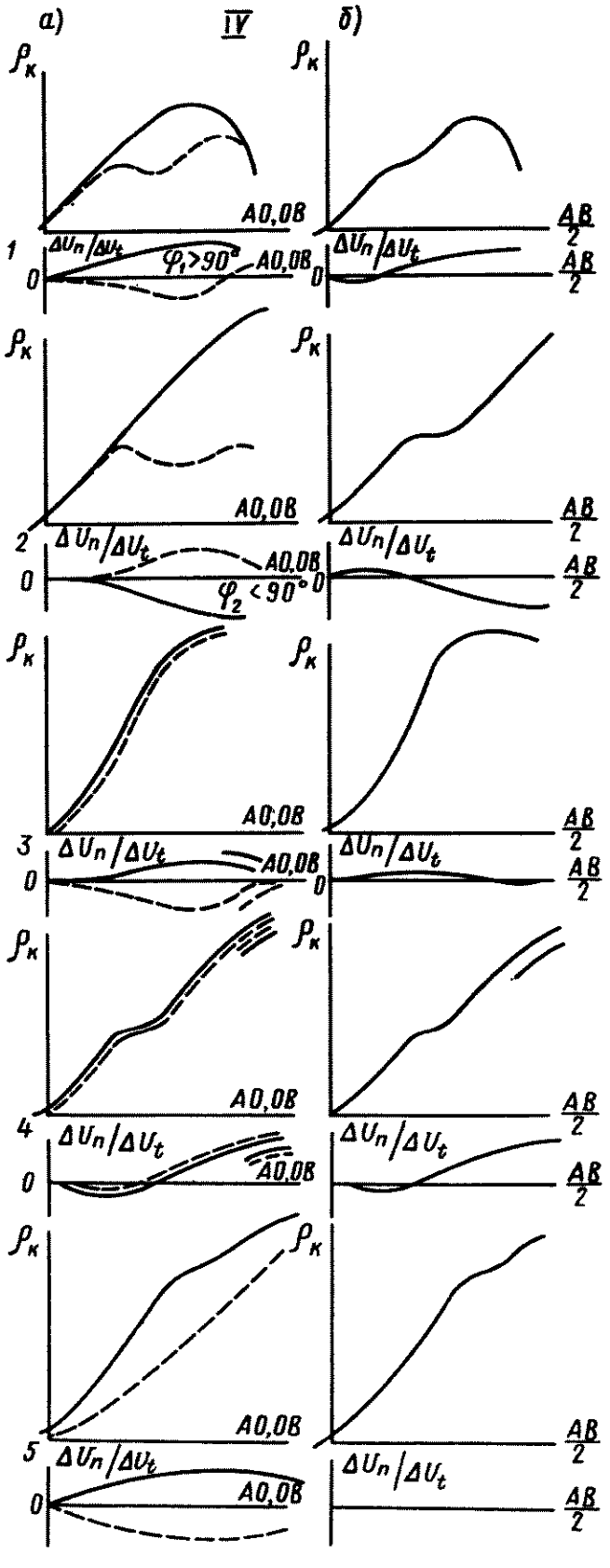
в зависимости от их состава и чередования в разрезе. На кривых ВЭЗ присутствуют аномалии, характерные для разрезов вида КН, *QH* или *AK*.

1.46. В результате интерпретации кривых ВЭЗ МДС могут быть определены мощности и УЭС слоев талых пород, форма и элементы залегания границ между талыми и мерзлыми породами, глубина талика.

1.47. В случае межмерзлотного талика в верхней части геоэлектрического горизонта присутствует высокоомный слой (см. рис. 8, ВЭЗ № 3), в результате чего аномалии на кривых $\rho_к$ ВЭЗ начинают соответствовать разрезам вида *KQH*, *KQAH*.

1.48. Интерпретация аномалий такого вида позволяет определить мощность и состав верхнего слоя мерзлоты, промежуточных слоев талых пород и глубину залегания кровли второго слоя мерзлоты.

1.49. Геоэлектрическая модель мерзлой толщи, содержащая в разрезе пластовые льды или сильнольдистые породы, показана на рис. 9. Поскольку сильнольдистые породы ($Л_в \geq 0,5$) и пластовые льды обладают наиболее высокими значениями УЭС, то участки их распространения выделяются на графиках $\Delta U_t/J$ и $\Delta U_n/J$ ЭП анома-


а)
IV
б)
$\rho_к$
AO,OB
AB/2
1
$\Delta U_n/\Delta U_t$
$\varphi_1 > 90°$
0
2
$\varphi_2 < 90°$
3
4
5

лиями, свойственными контактам двух сред или пластов высокого сопротивления и большой протяженности.

1.50. Амплитуды аномалий, получаемые над сильнольдистыми породами и льдами, зависят от глубины залегания верхней границы последних и соотношения УЭС контактирующих сред. УЭС сред определяется степенью льдистости мерзлых пород или количеством примесей во льду.

1.51. По данным профилирования выявляются участки, на которых сильнольдистые породы и льды залегают неглубоко. Во всех остальных случаях аномалии над ними легко могут быть приняты за аномалии над участками с небольшой мощностью слоя сезонного протаивания.

1.52. УЭС сильнольдистых пород и льда в сотни и тысячи раз превосходят УЭС пород в слое сезонного протаивания и в десятки и сотни раз УЭС мерзлых пород с нормальной льдистостью, поэтому на $\rho_к$ ВЭЗ над разрезами, содержащими сильнольдистые породы, или лед, всегда присутствует отрезок составляющий с осью абсцисс угол, близкий к 45^0, если границы залегают параллельно земной поверхности, и более 45^0 при наклонном залегании. Протяженность такого отрезка, как правило, велика и максимум на кривой $\rho_к$ соответствует нижней границе сильнольдистого слоя. Он формируется при больших действующих расстояниях даже при небольшой мощности высокоомного слоя. Причиной тому служат большие величины отношения УЭС контактирующих сред и анизотропия сильнольдистых пород, которая может доходить до $\lambda = 6\text{-}8$ при горизонтальном залегании шлиров льда.

1.53. Аномалии на кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС вблизи боковых границ слоев сильнольдистых пород и льда отвечают вертикальному контакту двух сред или ступени в высокоомном основании (см. рис. 9, ВЭЗ № 1, 2).

1.54. Интерпретация этих кривых с помощью соответствующих номограмм позволяет определить простирание вертикальных границ, амплитуды ступеней, мощность и УЭС высокоомного горизонта.

1.55. Над узкими переуглублениями в кровле сильнольдистых пород или льда формируются аномалии на кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ ВЭЗ МДС, свойственные образованиям вида грабена или воронки в высокоомном основании (см. рис.9, ВЭЗ № 3).

1.56. Интерпретация такого рода кривых $\rho_к$ ВЭЗ, проведенная с помощью палеток ЦС-2-1, позволяет найти глубину переуглубления под точкой ВЭЗ и УЭС контактирующих пород.

1.57. На участках, где сильнольдистые породы или льды залегают неглубоко в виде узкой полосы (см. рис. 9, ВЭЗ № 4), аномалии на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС очень близки к тем, что имеют место над поднятиями в высокоомном основании в виде горста или купола.

1.58. Интерпретация кривых такого вида с помощью соответствующих номограмм позволяет определить простирание боковых границ поднятия, угол падения или амплитуду смещения.

1.59. При пологом падении кровли сильнольдистых пород или льдов на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС формируются характерные аномалии (см. рис. 9, ВЭЗ № 5).

1.60. Интерпретация кривых, произведенная с помощью соответствующих номограмм, позволяет определить глубину залегания, простирание и углы падения этой границы и величины УЭС контактирующих сред.

1.61. Геоэлектрическая модель мерзлой толщи с полигонально-жильными льдами изображена на рис. 10. Жильные льды всегда отличаются от вмещающих мерзлых пород повышенными значениями УЭС и выделяются на графиках $\rho_к\left(\frac{\Delta U_t}{J}\right)$ и $\frac{\Delta U_n}{J}$ ЭП МДС в виде аномалий, характерных для пластов малой мощности.

1.62. Если размеры измерительных установок невелики и соизмеримы с размерами полигонов, то в результате интерпретации данных ЭП МДС с помощью специальных номограмм можно определить глубину залегания верхней границы и простирание боковых границ каждой жилы.

1.63. При больших размерах измерительных установок (в 2-3 раза превышающих глубину залегания нижней границы ледяных жил) достаточно точно оцениваются простирание и глубина выклинивания нижней границы каждой жилы.

1.64. Применение ЭП МДС с двумя разносами питающих линий позволяет решить задачу полностью и способствует повышению точности решений.

1.65. В районе распространения жильных льдов преобладает два типа кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС.

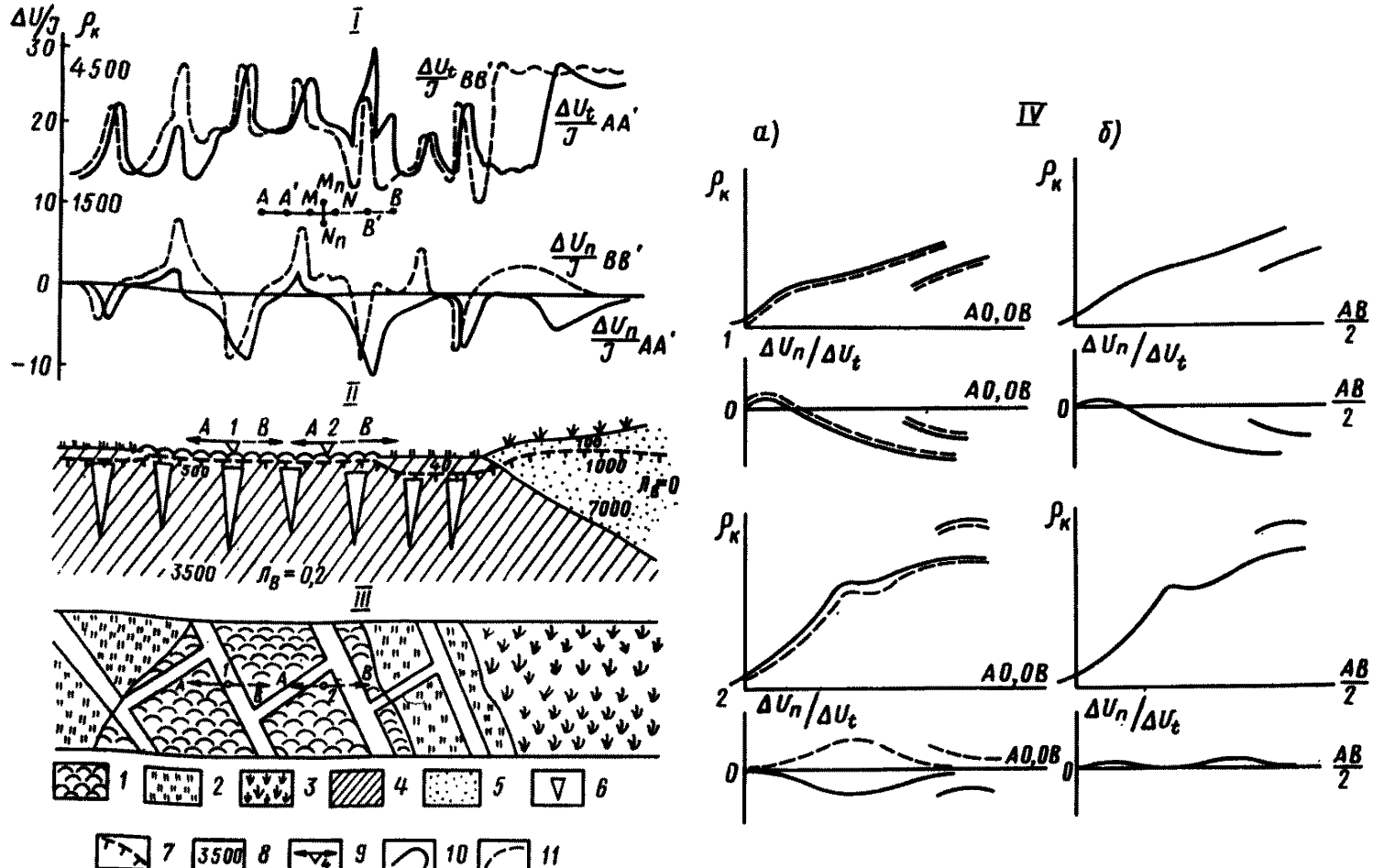


Рис. 10. Схематический разрез мерзлой толщи с повторно-жильными льдами и типичные ЭП МДС и ВЭЗ МДС над различными ее элементами

I - кривые двустороннего дипольного ЭП МДС; II - схематический геоэлектрический разрез мерзлой толщи; III - простирание геоэлектрических границ; IV - типичные кривые ВЭЗ МДС - а - двусторонние трехэлектродные; б - симметричные; 1 - торфяник; 2 - полосы стока; 3 - кустарник; 4 - суглинок; 5 - песок; 6 - жилы льда; 7 - верхняя граница мерзлоты; 8 - величины УЭС пород; 9 - точки ВЭЗ и направление разносов питающих электродов; 10 - кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ и $\Delta U_t/I(\rho_к)$ и $\Delta U_n/I$ ЭП для левых установок *AMN* и *AA'MN*; 11 - аналогичные кривые для правых установок *MNB* и *MNB'B*

1.66. Первый тип (см. рис. 10, ВЭЗ № 1) возникает, когда центр ВЭЗ располагается над центром жилы. Характерным признаком его является то, что кривые $\rho_к$ воздымаются под сравнительно небольшими углами $\approx 35^\circ$ относительно оси абсцисс даже при бесконечно большом соотношении УЭС льда и вмещающей среды. Это дополняется большим смещением ("воротами") кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ в сторону оси абсцисс при увеличении размеров приемных линий в процессе зондирования. Интерпретация таких кривых ВЭЗ производится с помощью специальных номограмм и палеток и позволяет определить глубину залегания верхней границы жилы, простирание ее боковых границ, величину УЭС льда и вмещающей породы, а в благоприятных случаях и глубину залегания нижней границы.

1.67. Второй тип кривых ВЭЗ МДС формируется, когда центр зондирования находится между жилами (см. рис. 10, ВЭЗ № 2). Отличительным признаком их является подъем начальных ветвей кривых $\rho_к$ под углом более 45° по отношению к оси абсцисс и образование резкого (угловатого) максимума при прохождении питающих электродов над близлежащими к центру зондирования жилами. При переходе с малых приемных линий на большие также могут возникать "ворота" за счет смещения кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ вверх или вниз по оси ординат. При интерпретации таких кривых необходимо отбрасывать начальные ветви, так как применение любых палеток и номограмм приводит к большим погрешностям в оценке строения верхней части мерзлой толщи, состава и льдистости слагающих ее пород.

1.68. Физические предпосылки и особенности геоэлектрического строения мерзлой толщи допускают применение различных методов электроразведки для решения таких задач мерзлотной съемки, как:

изучение распространения, мощности, состава и строения ММП;

определение формы и глубины таликов и состава слагающих пород;

изучение распространения и состава талых и мерзлых пород в пределах акваторий;

изучение распространения сильнольдистых пород и пластовых льдов;

картирование жильных льдов;

режимные наблюдения за динамикой протаивания ММП под воздействием естественных и искусственных факторов.

1.69. Перечисленные выше задачи не решаются однозначно из-за многопараметровой зависимости электрических свойств пород. Вопрос о распространении и мощности многолетнемерзлых пород часто не разрешим без определения их состава, льдистости и температуры. Наибольший эффект достигается при комплексной постановке исследований, направленных на решение нескольких связанных между собой задач. Очевидно, что речь может идти лишь о рациональном использовании нескольких электроразведочных методов в обязательном их сочетании с другими видами геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1.70. При изучении как талых, так и мерзлых пород используются одна и та же аппаратура и техника проведения полевых работ. Отличия при исследовании мерзлых толщ заключаются в правильном подборе методов, способных решить с необходимой точностью поставленные задачи, в последовательности применения выбранных методов, в соответствующем подходе к интерпретации получаемых результатов наблюдений.

1.71. По способу измерений и характеру решаемых задач методы постоянного и переменного поля подразделяются на два вида: профилирование и вертикальное электрическое зондирование.

1.72. Профилирование (ЭП) применяется для изучения объектов, границы которых наклонны по отношению к дневной поверхности. С помощью ЭП решаются следующие задачи:

картирование слоев пород различного литологического состава и определение их элементов залегания;

определение распространения вечномерзлых пород;

оконтуривание таликов;

поиски и определение элементов залегания жильных льдов;

изучение изменений в составе, влажности (льдистости), криогенной текстуре и температуре вечномерзлых пород в горизонтальном направлении.

1.73. В зависимости от характера изучаемого поля и измеряемых параметров могут быть выделены профилирование на постоянном и низкочастотном переменном токе методом сопротивления и профилирование на постоянном токе методом двух составляющих.

1.74. Профилирование методом сопротивления заключается в измерении кажущегося сопротивления на дневной поверхности через небольшие интервалы (шаг наблюдений).

1.75. Результаты измерений представляются в виде графиков изменения кажущегося сопротивления $\rho_к$ по профилям.

1.76. Форма и амплитуда аномалий на кривых $\rho_к$ профилирования зависят от геоэлектрического строения изучаемой территории (соотношения УЭС контактирующих сред, морфологии, размеров, частоты чередования возмущающих объектов, глубины залегания и простирания возмущающих объектов по отношению к линии профиля, от угла падения и способа измерения), типа и размеров измерительных установок, расположения профилей относительно границ объектов и шага измерений.

1.77. Максимальная разрешающая способность профилирования достигается при полном соответствии способа измерений сложности геоэлектрического строения.

1.78. По степени сложности могут быть выделены в первом приближении простые, осложненные и сложные геоэлектрические условия.

1.79. В случае простых геоэлектрических условий тип и амплитуда аномалий на графиках профилирования над каждым возмущающим объектом не меняются при переходе от профиля к профилю, если размеры установки постоянны и ориентировка профилей относительно геоэлектрических границ не меняется.

1.80. Простые геоэлектрические условия имеют место, когда состав, льдистость, температура и глубина сезонного протаивания мерзлых пород постоянны в пределах каждого из выделяющихся микрорайонов. Примером могут служить мерзлые породы, приуроченные к неэродированным торфяникам, к участкам современного протаивания в аласах и долинах рек.

1.81. При осложненных геоэлектрических условиях тип аномалий на графиках профилирования над каждым возмущающим объектом сохраняется при переходе от профиля к профилю, меняются лишь амплитуды аномалий. Подобная ситуация возникает при картировании ММП, когда глубина сезонного протаивания в пределах микрорайонов меняется в 2-3 раза. В качестве примера можно привести торфяники, поверхности которых эродированы полосами стока и термокарстовыми процессами.

1.82. Тип и амплитуда аномалий в сложных геоэлектрических условиях на графиках $\rho_к$ профилирования изменяется от профиля к профилю, причем сходные по внешнему виду аномалии могут отвечать объектам, различным по генезису и положению в разрезе. И наоборот, различные по типу и амплитудам аномалии могут быть связаны с одним и тем же возмущающим телом. Такими признаками характеризуются мерзлые породы в сложных геолого-структурных и геоморфологических условиях.

1.83. Степень сложности геоэлектрических условий предварительно оценивается на основании общих представлений о геологическом и геоэлектрическом строении изучаемого района и затем уточняется в ходе электроразведочных работ.

1.84. Схема измерительных установок выбирается с учетом геоэлектрических условий.

1.85. При поисках и прослеживании возмущающих объектов с высоким УЭС, например пластовых или жильных льдов, предпочтительнее симмтеричные установки.

1.86. При изучении объектов с низкими УЭС (обводненные тектонические нарушения, талики различного происхождения) лучшей разрешающей способностью обладают трехэлектродные и дипольные установки.

1.87. Размеры измерительных установок выбирают в соответствии с требуемой глубинностью исследований и степенью сложности геоэлектрических условий. Нередко из-за частого чередования возмущающих объектов в горизонтальном направлении не удается достигнуть требуемой глубинности исследований без понижения разрешающей способности профилирования. В таких случаях целесообразно некоторое уменьшение глубинности исследования, т.е. уменьшение размеров измерительных установок в пользу повышения разрешающей способности.

1.88. Приемы обработки и интерпретации материалов профилирования методом сопротивления, а также получаемые результаты существенно зависят от шага измерений и типа измерительной установки, т.е. от количества и взаимного расположения питающих и приемных электродов. По этим признакам может быть выделено непрерывное и точечное профилирование.

1.89. При точечном профилировании измерения по профилю ведутся с шагом, превышающим длину приемных линий. При непрерывном профилировании измерения по профилю осуществляются с шагом, равным длине приемных линий. Типы и размеры измерительных установок могут быть различными и выбираются в соответствии с требуемой глубинностью и детальностью работ.

1.90. На кривых $\rho_к$ непрерывного профилирования возмущающий объект фиксируется одной основной и одной или двумя экранными аномалиями, которые возникают в результате последовательного пересечения границ объекта питающими (экранные аномалии) или приемными (основная аномалия) электродами.

1.91. Форма основных и экранных аномалий, их размеры и взаимное расположение на графике $\rho_к$ отличаются для различных типов возмущающих объектов и измерительных установок. Однако основные аномалии во всех случаях характеризуются наибольшими амплитудами, а их экстремумы располагаются над выходами границ возмущающих объектов по профилю. Экранные аномалии обладают сравнительно небольшими амплитудами и находятся по профилю в стороне от границ возмущающих объектов. Основные и экранные аномалии используют для более точного определения и распознавания типа возмущающего объекта при интерпретации и определении местоположения его границ в разрезе.

1.92. Интерпретация данных непрерывного профилирования заключается в установлении по внешнему виду и линейным размерам основной и экранной аномалий формы и размеров возмущающего тела (контакт двух сред, вертикальный или наклонный пласт той или иной мощности и т.д.). По положению экстремумов основной аномалии находят местоположение наклонных границ на профиле (с точностью до $\pm MN$), а по величинам $\rho_к$ в области основных аномалий - приблизительное соотношение УЭС сред. Простирание возмущающих объектов определяется путем прослеживания (корреляции) от профиля к профилю аномалий одного и того же типа. С этой целью составляются корреляционные схемы, на которых в масштабе съемки нанесено взаимное расположение профилей на местности. Границы, отвечающие объектам одинакового типа на соседних профилях, соединяются, а в пределах полученного контура проставляются цифровыми или условными обозначениями величины, взятые в области основных аномалий.

1.93. Исходным материалом для дальнейшего геологического, гидрогеологического, мерзлотного и инженерно-геологического истолкования результатов непрерывного профилирования служат корреляционные схемы, дополненные графиками $\rho_к$ и геоэлектрическими разрезами. Составление карт равных сопротивлений по данным непрерывного профилирования нецелесообразно из-за обилия на них ложных (экранных) аномалий, затушевывающих истинное положение геоэлектрических границ.

1.94. Разрешающая способность непрерывного профилирования методом сопротивления резко падает в районах со сложными геоэлектрическими условиями, когда различные по генезису и положению в разрезе тела выделяются сходными по внешнему виду аномалиями. В таких случаях требуется применение профилирования по методу двух составляющих (ЭП МДС).

1.95. Методика проведения полевых работ и аппаратура при профилировании по методу двух составляющих (ЭП МДС) те же, что и при непрерывном профилировании методом сопротивления. Отличия состоят в том, что в каждой точке поле питающих электродов измеряется в двух направлениях на дневной поверхности, одно из которых совпадает с направлением оси установки (осевая разность потенциалов ΔU_t), а второе составляет перпендикуляр с первым (азимутальная разность потенциалов $\Delta U_п$) . Этих двух параметров достаточно для определения характера и степени деформации поля на земной поверхности, по которым устанавливают форму и элементы залегания границ возмущающих объектов на каждом профиле, взятом в отдельности.

1.96. Вид измерительных установок и размеры их выбирают по тому же принципу, что и в случае непрерывного профилирования. Аналогично оценивается и максимальная глубинность исследований.

1.97. Результаты измерений ЭП МДС представляют в виде графиков $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_п/J$, построенных на каждом профиле друг под другом в одном и том же горизонтальном и вертикальном масштабе.

1.98. Интерпретация материалов ЭП МДС производится в два этапа.

1.99. На первом этапе (качественная интерпретация) по виду аномалий на графиках $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_п/J$ определяют форму и размеры возмущающих объектов, местоположение и примерное простирание их границ по отношению к линии профиля.

1.100. На втором этапе (количественная интерпретация) по величинам и знакам амплитуд аномалий на графиках $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_п/J$ определяют с помощью специальных номограмм более точное простирание границ объектов (с ошибкой $\pm 5\text{-}10^{\circ}$), глубину залегания (с погрешностью около 30-40%) и в благоприятных условиях углы падения (с точностью до $\pm 10^{\circ}$).

1.101. Результаты интерпретации по профилю изображают в виде геоэлектрического разреза, на котором показывают форму, местоположение и глубину залегания границ возмущающих объектов и помещенного под ним плана простирания геоэлектрических границ по отношению к линии профиля. Если на изучаемом участке имеется несколько профилей, то по ним составляется корреляционная схема аномалий. Критерием для прослеживания одних и тех же объектов служит сходство вида аномалий на графиках $\Delta U_t/J$ и $\Delta U_п/J$ на соседних профилях, а также совпадение простираний их границ.

1.102. Практика показывает, что применение ЭП МДС эффективно при изучении районов с осложненными и сложными геоэлектрическими условиями.

1.103. Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) используют для определения последовательности залегания в разрезе горизонтальных и пологопадающих слоев пород, их мощности и УЭС. С помощью ВЭЗ решаются следующие задачи:

выделение в разрезе слоев пород различного литологического состава и определение их элементов залегания;

определение мощности вечномерзлых пород;

обнаружение чередования талых и мерзлых пород в вертикальном направлении и оценка их мощности;

изучение изменений в составе, влажности (льдистости), криогенной текстуре и температуре вечномерзлых грунтов в вертикальном направлении.

1.104. В зависимости от характера изучаемого поля и измеряемых параметров могут быть выделены ВЭЗ на постоянном и низкочастотном переменном токе методом сопротивления и ВЭЗ на постоянном токе по методу двух составляющих (ВЭЗ МДС).

1.105. Суть ВЭЗ методом сопротивления заключается в измерении кажущегося сопротивления пород на дневной поверхности при постепенном увеличении глубины исследования.

1.106. ВЭЗ обычно выполняют с помощью симметричных четырехэлектродных установок. При изучении разрезов сложного строения рекомендуется применять двусторонние трехэлектродные или дипольные установки, позволяющие определить направление падения наклонных слоев и устанавливать местоположение крутопадающих контактов.

1.107. По степени сложности геоэлектрического строения массивы горных пород могут быть приближенно подразделены на простые, градиентные, осложненные и сложные.

1.108. В случае простых геоэлектрических массивов тип кривой ВЭЗ постоянен для всей изучаемой территории. Изменения в геоэлектрическом строении массива сопровождаются изменением положения экстремальных точек на кривых $\rho_к$ ВЭЗ. Подобные условия соблюдаются на обширных участках мерзлых или талых пород, состав льдистость которых выдержаны по простиранию.

1.109. В осложненных условиях тип кривой $\rho_к$ ВЭЗ меняется в пределах исследуемого района. Количество различных типов кривых $\rho_к$ ВЭЗ ограничено. На отдельных участках тип кривых может оставаться одним и тем же. Такими признаками обладает обширное пространство, сложенное мерзлыми или талыми породами, состав и влажность (льдистость) которых изменяются в широких пределах.

1.110. Для сложных геоэлектрических массивов характерно большое количество и разнообразие типов кривых $\rho_к$ ВЭЗ, часто сменяющих друг друга на небольших расстояниях. Этот тип геоэлектрических массивов пользуется широким распространением в районах островного развития мерзлоты, различного вида таликов, пластовых и полигональных льдов.

1.111. Степень сложности массивов пород в геоэлектрическом отношении предварительно оценивается по совокупности известных для района геоэлектрических и геологических данных и уточняется в ходе электроразведочных работ с помощью ЭП и рекогносцировочных ВЭЗ.

1.112. При горизонтальном залегании слоев разрешающая способность ВЭЗ зависит от:

типа геоэлектрического разреза, т.е. последовательности залегания по вертикали слоев с различными УЭС;

отношения $\nu_2 = \frac{h_2}{h_1}$, где h_2 - мощность изучаемого слоя; h_1 - мощность перекрывающей его толщи;

геоэлектрической контрастности разреза, т.е. от отношения $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$, где

ρ_2 - УЭС изучаемого слоя; ρ_1 - УЭС вышележащих пород.

1.113. Легче и с наименьшей ошибкой расчленяются, по данным ВЭЗ, разрезы вида K, в которых промежуточный горизонт обладает повышенным УЭС ($\rho_1 < \rho_2, \rho_2 > \rho_3$) и вида H, где промежуточный горизонт имеет пониженное УЭС ($\rho_1 > \rho_2; \rho_2 < \rho_3$). Значительно труднее и с большей ошибкой дифференцируются разрезы, УЭС слоев в которых либо возрастает (вид A с $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), либо убывает (вид Q с $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) с глубиной.

Промежуточный горизонт в разрезах вида A или Q может быть обнаружен практически всегда, если его мощность превышает мощность перекрывающей толщи, т.е. когда $\nu_2 \geq 1$. При значениях $\nu_2 < 1$, разрешающая способность зависит от геоэлектрической контрастности.

В контрастных ($\mu \gg 10$) разрезах видов K и H промежуточный горизонт надежно выделяется при $\nu_2 \geq 1/5$-$1/9$, а в разрезах видов A и Q - при $\nu_2 \geq 1/2$-$1/5$. С

уменьшением контрастности разрезов отношение ν_2 приближается к единице независимо от их вида.

1.114. Интерпретация кривых ВЭЗ делится на количественную и качественную.

1.115. Количественной интерпретации подвергаются кривые $\rho_к$ ВЭЗ, полученные на участках с простым и осложненным геоэлектрическим строением. Традиционный способ интерпретации заключается в том, что по внешнему виду кривых $\rho_к$ ВЭЗ и по совокупности известных геологических данных устанавливают тип геоэлектрического разреза, т.е. возможное количество слоев в изучаемой толще и примерное соотношение их УЭС. Мощность слоев и более точные значения УЭС определяют путем сравнения экспериментальных (полевых) кривых с эталонными (палеточными), вычисленными или построенными для различных типов геоэлектрических разрезов. Точность результатов интерпретации таким способом вполне удовлетворительна в том случае, если известны УЭС или мощность промежуточного слоя. При отсутствии этих данных точность количественной интерпретации снижается из-за действия принципа эквивалентности.

1.116. Количественная интерпретация кривых $\rho_к$ ВЭЗ, полученных над сложными геоэлектрическими разрезами, затруднена из-за искажений за счет крутопадающих границ. Эти искажения часто невозможно отличить от влияния горизонтальных пластов. Попытки интерпретации искаженных кривых $\rho_к$ ВЭЗ с помощью палеток для горизонтально слоистых сред приводят к очень крупным ошибкам, не поддающимся учету. Для выявления искаженных кривых необходимо выполнять на каждой точке крестовые или круговые ВЭЗ. Путем сопоставления кривых $\rho_к$, полученных в различных азимутах, иногда удается обнаружить и установить характер влияния боковых контактов. Количественная интерпретация в таких случаях проводится с помощью палеток для вертикальных, наклонных и горизонтально-вертикальных контактов.

1.117. Форма изображения результатов количественной интерпретации зависит от характера решаемых задач и расположения точек ВЭЗ на местности.

1.118. При прослеживании изменений геоэлектрического строения по отдельным профилям и достаточно частом расположении точек ВЭЗ результаты количественной интерпретации изображают в виде геоэлектрических разрезов. На таких разрезах в заданных горизонтальном и вертикальном масштабах проводятся границы слоев, обладающих близкими значениями УЭС и занимающих сходное структурное положение. В пределах каждого слоя проставляют величины его УЭС. Особое внимание при этом уделяется геоэлектрическим горизонтам, прослеживающимся по всему профилю. Эти горизонты называются опорными. Они достаточно точно отражают характер геологических, гидрогеологических, мерзлотных и инженерно-геологических структур. При проведении геоэлектрических границ на разрезе осредняют значения, полученные в результате интерпретации единичных кривых $\rho_к$ ВЭЗ, что способствует повышению точности окончательных данных до ±5-10%.

1.119. При площадных электроразведочных исследованиях и достаточной густоте точек ВЭЗ следует составлять карты равных глубин залегания кровли или подошвы опорных горизонтов и детальные геоэлектрические разрезы к ним. Методика построения карт равных глубин обычная.

1.120. При изучении площадей с осложненными геоэлектрическими условиями полезно составлять карты типов кривых $\rho_к$ ВЭЗ. На этих картах проводятся контуры участков, в пределах которых тип кривой $\rho_к$ ВЭЗ не меняется, а следовательно, не меняется и геоэлектрическое строение.

1.121. Качественной интерпретации подвергаются кривые $\rho_к$ ВЭЗ, полученные над сложными разрезами. Целью ее является приблизительная оценка изменений геоэлектрических условий с глубиной и по площади.

1.122. Результаты качественной интерпретации представляются в виде схематических геоэлектрических разрезов, карт типов кривых $\rho_к$ ВЭЗ и карт кажущихся сопротивлений, построенных для одного или нескольких разносов питающих линий.

1.123. Геологическое, гидрогеологическое, мерзлотное или инженерно-геологическое истолкование результатов качественной и количественной интерпретации кривых $\rho_к$ ВЭЗ заключается в совместном анализе всех имеющихся по району материалов о геологическом строении и электрических свойствах пород в талом и мерзлом состоянии, устанавливается природа каждого выделенного геоэлектрического горизонта.

1.124. Критерием для выделения вечномерзлых пород на геоэлектрических разрезах и картах служит увеличение УЭС пород в верхней части разреза при сохранении общего структурного строения и появление в связи с этим двух или более дополнительных геоэлектрических границ, контуры которых в значительной степени повторяют рельеф и в большинстве случаев не совпадают с известными литолого-стратиграфическими и тектоническими границами.

Все остальные признаки (тип кривой $\rho_к$ ВЭЗ, угол наклона левой и правой ее частей, координаты экстремумов и пр.) должны рассматриваться как вспомогательные при выделении многолетнемерзлых пород и определении строения мерзлой толщи.

1.125. Для изучения строения дна водоемов используются трехэлектродные ВЭЗ. Их удобно применять в донном варианте. Опыт показывает, что в большинстве случаев целесообразно применять двустороннее трехэлектродное зондирование, позволяющее обнаруживать и учитывать искажающее влияние боковых границ, связанных с резкой сменой пород на береговой линии или контактами подозерных и подрусловых таликов в области развития вечномерзлых пород. На каждой точке донного ВЭЗ необходимо определять мощность и УЭС воды, для повышения точности и однозначности результатов интерпретации.

1.126. Интерпретация левых частей кривых $\rho_к$ донных ВЭЗ производится с помощью специальных палеток для морских и пресных водоемов.

1.127. При небольших глубинах водоемов и сравнительно высоком УЭС пресных вод кривые $\rho_к$ донных ВЭЗ в средней и правой частях приближаются к кривым, полученным на дневной поверхности без водного слоя. Эти части кривых $\rho_к$ можно интерпретировать с помощью двухслойных палеток и номограмм, рассчитанных для наземных ВЭЗ. Вся интерпретация выполняется по обычным правилам.

1.128. Результаты интерпретации кривых $\rho_к$ донных зондирований представляются в виде геоэлектрических разрезов, если измерения производятся по отдельным профилям. При площадных съемках акваторий следует составлять карты глубин залегания опорных горизонтов.

1.129. Особенности ВЭЗ МДС заключаются в том, что на каждой точке ВЭЗ и на каждом разносе питающей линии измеряются две разности потенциалов в двух взаимно перпендикулярных направлениях, одно их которых совпадает с направлением оси установки. По данным измерений, на одной точке при одном азимуте разносов питающих электродов получают кривую $\rho_к$, отражающую изменение кажущегося сопротивления с увеличением разносов питающих линий, и кривую отношения осевой и азимутальной разностей потенциалов $\Delta U_n / \Delta U_t$, указывающую на присутствие в разрезе крутопадающих контактов пород, их местоположение, простирание и их форму.

1.130. Методика полевых работ и аппаратура принципиально те же, что и при проведении ВЭЗ методом сопротивления. Отличия заключаются в прокладке на местности двух приемных линий и измерении величин и знаков разностей потенциалов на каждом разносе питающей линии.

1.131. Для увеличения объема и точности получаемой информации о свойствах и строении изучаемых геоэлектрических массивов ВЭЗ МДС необходимо выполнять двусторонними трехэлектродными (AMN, MNB и $C \to \infty$) или дипольными двусторонними установками. Разрешающая способность ВЭЗ МДС при изучении горизонтально-слоистых разрезов такая же, как и у ВЭЗ методом сопротивления.

1.132. Результаты измерений на каждой точке ВЭЗ МДС представляются в виде кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n / \Delta U_t$, построенных одна под другой в одинаковом масштабе по оси абсцисс.

1.133. Интерпретация результатов ВЭЗ МДС выполняется в три этапа.

1.134. На первом этапе (качественная интерпретация) производится анализ кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n / \Delta U_t$ ВЭЗ МДС, в результате которого устанавливается на каждой точке ВЭЗ:

количество границ в разрезе, параллельных земной поверхности;

форма и местоположение в разрезе наклонных и крутопадающих границ;

положение особых точек на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n / \Delta U_t$, которые необходимы для количественной интерпретации данных ВЭЗ МДС.

1.135. Второй этап (количественная интерпретация) состоит в том, чтобы по координатам особых точек на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n / \Delta U_t$ ВЭЗ найти геоэлектрические и структурные параметры разреза. С помощью специальных номограмм определяют глубину залегания границ и УЭС контактирующих сред с ошибкой ±20-40%, простирание наклонных границ и крутопадающих контактов с ошибкой ±5-10°, их истинный угол падения с погрешностью ±2-5° по данным интерпретации кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n / \Delta U_t$ каждого единичного ВЭЗ МДС.

1.136. Третий этап заключается в построении геоэлектрических разрезов по данным интерпретации кривых ВЭЗ МДС. На геоэлектрические разрезы выносят глубины залегания геоэлектрических границ, направление и видимый угол падения. Под разрезом помещается план простирания наклонных и крутопадающих контактов. Анализ геоэлектрических разрезов позволяет выявить участки, на которых наблюдается систематическое завышение мощностей промежуточных горизонтов или глубин залегания опорных горизонтов за счет экранирования нижележащих пород высокоомным слоем или анизотропии пород. Путем приведения в соответствие глубин залегания

границ с их элементами залегания устанавливают величину коэффициента анизотропии пород в пределах промежуточных горизонтов. Суммарную мощность и УЭС пластов, пропущенных в случае их экранирования, определяют с помощью специальных вспомогательных номограмм.

1.137. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ МДС представляют в виде карт глубин залегания кровли или подошвы опорных горизонтов, карт изменения по площади УЭС пород опорного горизонта, геоэлектрических разрезов и планов простирания геоэлектрических границ к ним.

1.138. Специфика электрического каротажа мерзлых скважин заключается в том, что они всегда находятся в сухом состоянии, а породы на стенках скважины имеют отрицательную температуру. Это затрудняет проведение в мерзлых скважинах многих традиционных видов каротажа, например резистивиметрии или ПС. Физические предпосылки и технические возможности наиболее благоприятны для электрического каротажа методом сопротивлений ЭК КС. Он может быть использован для расчленения вскрытого скважиной разреза по составу, льдистости и типам криогенной текстуры и для определения льдистости и коэффициента анизотропии мерзлых пород по величинам ρ_t и t^0.

1.139. При ЭК КС используют стандартные электроразведочные автокомпенсаторы и комплексные каротажные станции. Выбор аппаратуры производится с учетом конструкции скважины и условий, в которых производится измерение.

1.140. Конструкция зондов должна предусматривать надежный гальванический контакт питающих и приемных электродов со стенками скважины при достаточно низких температурах (до -10°С). Из всех опробованных типов и форм электродов (щеточных, пружинных, точечных, кольцевых и цилиндрических) наилучшими показателями обладают шаровые, изготовленные из поролона или войлока, пропитанного концентрированным раствором $CuSO_4$ или $NaCl$. Диаметр шара должен быть равен диаметру скважины или несколько больше его.

1.141. Каротаж неглубоких скважин (до 15-30 м) удобно проводить потенциал-зондами АМ ($N \to \infty$, $B \to \infty$), рабочее расстояние которых (длина) превышает в 5-10 раз диаметр электродов. В этом случае можно пренебречь влиянием ствола скважины на результаты наблюдений, а электроды можно считать точечными. Величина $\rho_к$ вычисляется по формуле (10) и относится к приемному электроду М:

$$\rho_к = \frac{\Delta U}{J} \frac{4\pi}{AM} \cdot \qquad (10)$$

1.142. Трехэлектродные кровельные (MNA, $B \to \infty$) и подошвенные (AMN, $B \to \infty$) зонды применимы в глубоких скважинах, когда можно подобрать рабочее расстояние AO и длину приемной линии MN такими, чтобы электроды зонда можно было принять за точечные. Кажущееся сопротивление относится к центру приемных линий и вычисляется по формуле

$$\rho_к = \frac{\Delta U}{J} \frac{4\pi AM AN}{AN - AM} \cdot \qquad (11)$$

1.143. Результаты измерений изображаются в виде графиков $\rho_к$ (диаграмм ЭК КС), отражающих изменение кажущегося сопротивления с глубиной. Если каротаж скважины произведен кровельными и подошвенными зондами, то соответствующие им графики $\rho_к$ строятся на одной диаграмме.

1.144. Интерпретация каротажных диаграмм производится по стандартной методике. Поперечные размеры и форма возмущающих объектов устанавливаются по внешнему облику и размерам аномалий на диаграммах КС, для чего следует широко использовать типичные аномалии $\rho_к$ для кровельных и подошвенных зондов, получаемые над пластами различной мощности. Положение верхних границ возмущающих объектов определяется по экстремумам основных аномалий: для кровельных зондов MNA или МА, а нижних - по экстремумам на кривх $\rho_к$ для подошвенных зондов AMN и AM. Величина ρ_t, которая используется для оценки льдистости и коэффициента анизотропии мерзлых пород, берется в средней части аномалии, если поперечные размеры выделяющегося пласта в 1,5-2 раза превосходят длину зондов. В случае пластов средней и малой мощности продольное сопротивление толщи вычисляется по формуле

$$\rho_t = \frac{\Sigma h_i}{\Sigma h_i / \rho_{ki}}, \qquad (12)$$

где h_i - мощность отдельных высокоомных и низкоомных пластов малой и средней мощности;

$\rho_к$ ↑ кажущееся сопротивление в области экстремумов над высокоомными и низкоомными пластами малой и средней мощности.

1.145. Льдистость и коэффициент анизотропии мерзлых пород определяют по номограммам (см. рис. 3-6), изображающим зависимости вида $\rho_t/\rho_{пр} = f(n_в, \lambda, t^o)$.

1.146. Результаты интерпретации изображаются в виде колонки, на которой показывается положение границ в разрезе, состав, льдистость и коэффициент анизотропии выделенных слоев.

СЕЙСМОРАЗВЕДКА

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

1.147. Основными изучаемыми параметрами при сейсмоакустических исследованиях являются скорости распространения продольных волн, сравнительно легко определяемые и в полевых, и в лабораторных условиях.

1.148. Сейсмоакустические свойства горных пород зависят от параметров компонент, их процентного содержания и характера распространения в объеме. Особый интерес представляют данные об упругих характеристиках льда, входящего в мерзлые породы в качестве одного из основных породообразующих минералов.

1.149. Монокристаллы льда обладают ярко выраженной анизотропией упругих свойств по различным кристаллографическим направлениям.

1.150. Скорость продольных волн в монокристаллах льда в зависимости от температуры и направления распространения различна. В поликристаллическом чистом льду скорости распространения продольных волн вдоль образца существенно выше, чем в перпендикулярном направлении. Причиной разницы значений скоростей явилась преимущественная ориентация главных оптических осей кристаллов льда перпендикулярно фронту промерзания. Это необходимо учитывать при исследованиях мерзлых грунтов со шлировой криогенной текстурой, в которых анизотропия упругих свойств может быть обусловлена не только наличием ориентированных шлиров льда, но и анизотропией самого льда.

1.151. Во льду с включениями воздушных пузырьков соотношение $V_p^{\perp}/V_p^{\parallel}$ может быть и обратным. Значение скоростей продольных волн во льду с включениями воздуха ниже, чем в чистом льду (рис. 11).

1.152. Зависимости скоростей продольных волн во льду от температуры показаны на рис. 12. Характер изменения $V_p(t^o)$ при понижении температуры близок к линейному

$$V_p = V_0 + \alpha|t| .$$

Значения V_0 и коэффициенты α приведены в табл. 4.

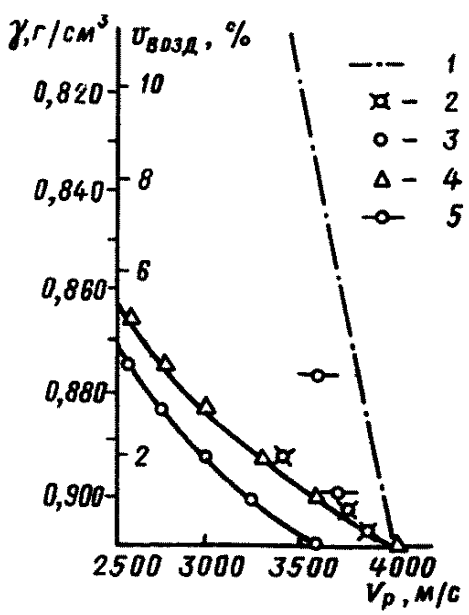


Рис. 11. Зависимость V_p во льду от содержания в нем воздуха
1 - по В.И. Чернигову; 2 - по В.В. Богородскому ($t = -4^o$); 3 и 4 - рассчитанные по формуле среднего времени при скорости в чистом льде 3600 и 4000 м/с соответственно; 5 - экспериментальные данные для жильного льда при $t = -50^oC$

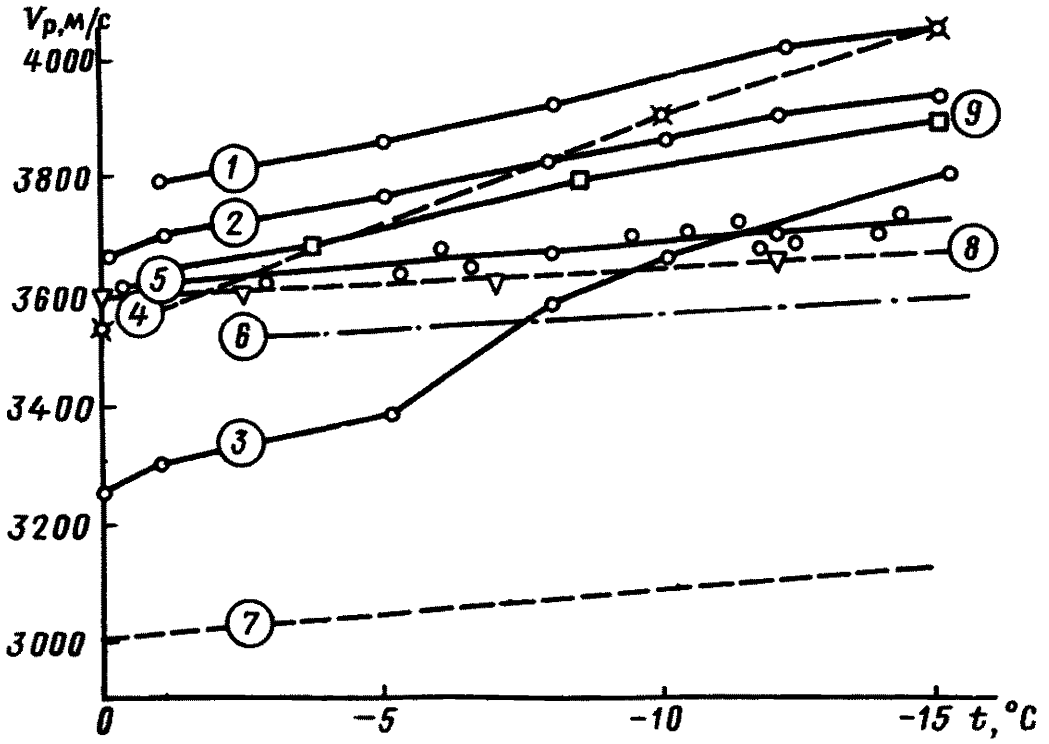


Рис. 12. Зависимость V_p во льду от температуры: 1-3 по В.В. Богородскому (1 - γ =0,902; 2 - γ =0,9; 3 - γ =0,89); 4 - вычисленная по формуле среднего времени по данным В.В. Богородского; 5 - по В.И. Чернигову; 6 - по G. Müller; 7 - по C. Kaplar; 8 - по В.И. Джурику и Ф.Н. Лещикову; 9 - по Ю.Д. Зыкову

Таблица 4

Скорость и температурный коэффициент	Номер кривых (рис. 12)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_0, м/с	3760	3680	3250	3540	3600	3500	3000	3600	3620
α, м/(с·г)	20	18	39	27	8	6	8	5	20

Таким образом, скорость во льду зависит от нескольких параметров, вследствие чего можно говорить лишь об основном диапазоне скоростей, который в интервале от 0 до -10°С ограничен значениями 3600-3800 м/с.

1.153. Влияние давления на упругие свойства льда выражается в возрастании значений скоростей распространения упругих колебаний и модуля Юнга с увеличением напряжений. В процессе деформирования льда изменение упругих свойств в нем обусловлено не только напряженным состоянием, но и переориентацией кристаллов льда и последующим их механическим разрушением.

1.154. Упругие свойства мерзлых грунтов во многом предопределяются изменчивостью сейсмоакустических характеристик льда. Скорости распространения упругих волн в мерзлых грунтах являются сложной функцией большого количества параметров, описывающих состав грунтов, их строение и состояние. Эти параметры находятся в тесной взаимосвязи. Так, например, изменение температуры мерзлого грунта приводит к изменению содержания незамерзшей воды: увеличение влажности к изменению степени заполнения пор и уменьшению содержания газовой компоненты либо к изменению пористости при полном влагонасыщении.

1.155. В грунтах, влажность которых превосходит предел полного влагонасыщения, зависимость скорости от состава и температуры выражена менее явно, но если учесть, что точность определения ультразвуковыми методами составляет не менее

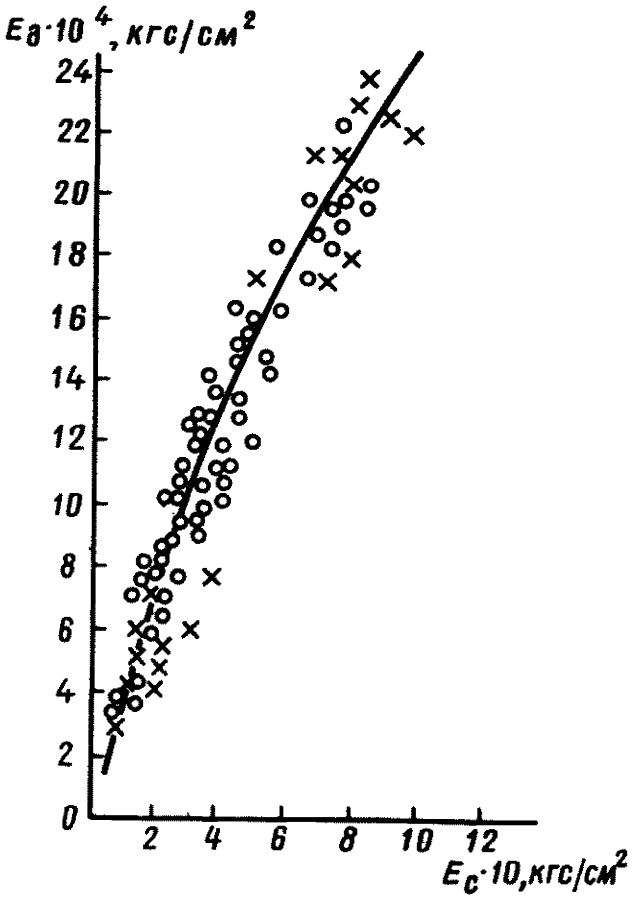


Рис. 13. Связь между $E_д$ и E_c для мерзлых пород по Б.Г. Хазину

1-2%, то по измеренным на образцах или в горных выработках значениям V_p и $t°$ можно получить необходимые для инженерно-геологических расчетов параметры состава грунта с достаточной для практического применения точностью.

1.156. Сейсмоакустические методы позволяют определить величины динамического модуля упругости пород, что представляет интерес при изысканиях.

1.157. Величина динамического коэффициента Пуассона μ полностью зависит от отношения скоростей поперечных и продольных волн и вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{1-2(V_s/V_p)^2}{2-2(V_s/V_p)^2}. \qquad (13)$$

1.158. Для определения динамического модуля Юнга E и динамического модуля сдвига G необходимо дополнительно знать величину плотности σ. Вычисления этих величин ведутся по известным формулам теории упругости

$$E = 2V_s^2\sigma(1+\mu) = V_p^2\sigma\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} = \frac{\sigma V_s^2(3V_p^2-4V_s^2)}{2(V_p^2-V_s^2)}; \qquad (14)$$

$$G = V_s^2\sigma. \qquad (15)$$

Значения σ берутся по таблицам или оцениваются по результатам сейсмоакустических измерений.

1.159. Связь между динамическим и статистическим модулем упругости для мерзлых горных пород показана на рис. 13. Статистическая обработка экспериментальных данных позволила предложить в качестве эмпирической формулы квадратичную зависимость

$$E_c = 0{,}6+0{,}16E_g + 0{,}01E_g^2. \qquad (16)$$

Этой зависимостью можно воспользоваться для практической оценки E_c по результатам сейсмоакустических определений E_g.

1.160. Сейсмические методы находят все большее применение для определения прочностных свойств горных пород и в первую очередь предела прочности на сжатие $\tau_{сж}$ по скорости продольных волн. Установлено, что между скоростью в исходном состоянии и предельным значением прочности существует прямая зависимость: большим значениям V_p соответствуют большие значения $\tau_{сж}$ независимо от того, изменением какого параметра вызвано увеличение скорости. При высоких температурах диапазоны изменения скорости и прочности для грунтов различного литологического состава перекрываются. С понижением температуры прочность грунта увеличивается. При этом происходит дифференциация грунтов по величинам V_p и $\tau_{сж}$. Для каждого фиксированного значения температуры величина $\tau_{сж}$ может быть определена по формуле

$$\tau_{сж} = a V_p^2 - b V_p \sqrt{c}, \qquad (1)$$

где $\tau_{сж}$ - сопротивление одноосному сжатию;

a, b, c - коэффициенты, одинаковые для песка, супеси и суглинка и существенно отличные для глины.

1.161. В скальных породах $\tau_{сж}$ зависит от величины коэффициента Пуассона μ. Породы с малыми значениями μ при одной и той же величине V_p обладают более высокой прочностью по сравнению с породами, имеющими высокие μ.

1.162. В табл. 5 приведены обобщенные данные о скоростях продольных и поперечных волн в талых и мерзлых породах верхней части разреза. Минимальные значения скоростей в скальных и полускальных породах относятся к сильнотрещиноватым их разностям.

Таблица 5

Порода	Состояние породы	V_p, м/с	V_s, м/с	V_s/V_p
Галечники	Неводонасыщенные, талые	400-800	250-500	0,6-0,7
Пески		200-500	150-300	0,5-0,7
Супеси		250-550	120-280	0,45-0,6
Суглинки		300-600	100-250	0,3-0,55
Глины		400-1800	100-400	0,1-0,35
Песчаники		800-4000	500-2500	0,5-0,7
Известняки		1000-4500	500-2800	0,5-0,65
Граниты		1500-5000	800-3000	0,5-0,65
Галечники	Водонасыщенные, талые	2000-2700	250-500	0,2-0,1
Пески		1500-2000	150-300	0,07-0,2
Супеси		1450-1800	120-280	0,07-0,15
Суглинки		1500-1900	100-250	0,05-0,15
Глины		1800-2500	100-400	0,05-0,12
Песчаники		1800-4500	500-2500	0,4-0,6
Известняки		2000-5000	500-2800	0,35-0,55
Граниты		2500-5500	800-3000	0,4-0,6
Галечники	Мерзлые при $t \neq -3^{\circ}C$	3800-4800	2000-2600	0,5-0,6
Пески		3400-4000	1800-2200	0,5-0,6
Супеси		2800-3500	1500-1900	0,45-0,6
Суглинки		2200-2800	1200-1500	0,4-0,55
Глины		1900-2300	800-1200	0,4-0,5
Песчаники		3600-5000	1900-2800	0,5-0,6
Известняки		3800-5500	2000-3000	0,5-0,6
Граниты		4000-6000	2200-3200	0,5-0,6

СХЕМАТИЧЕСКИЕ ГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ И ТИПИЧНЫЕ ГОДОГРАФЫ НАД НИМИ

1.163. Область применения сейсмоакустических методов при изучении территории, сложенных мерзлыми породами, определяется сейсмоакустическими свойствами изучаемых пород, а также наличием связей между скоростями распространения упругих волн в мерзлых грунтах и их составом, состоянием и физико-механическими свойствами.

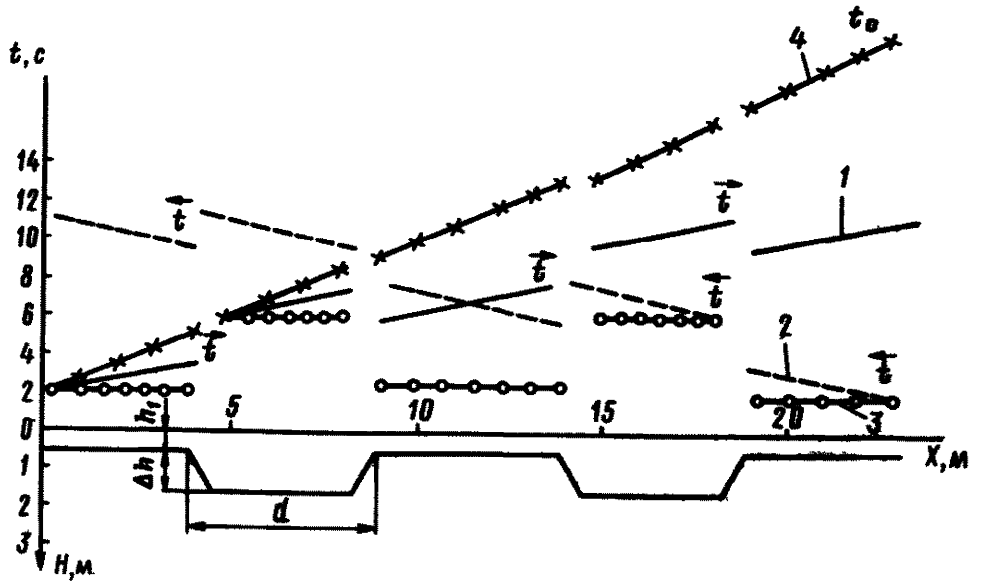


Рис. 14. Теоретические годографы головной волны при неровной кровле мерзлоты
1 и 2 встречные годографы головной волны; 3 - линия t_0 ; 4 - разностный годограф

1.164. Возможность использования сейсмических методов для изучения строения многолетнемерзлых пород базируется на том, что важные в инженерно-геологическом отношении границы совпадают с сейсмическими. Так, слой грунта полного влагонасыщения, кровля мерзлых или скальных пород представляют собой сильные преломляющие границы.

1.165. Задача определения мощности мерзлой толщи является очень сложной для сейсмических методов, поскольку подошва многолетнемерзлых пород может быть выявлена только с помощью отраженных волн, регистрация которых возможна, когда она залегает на глубинах более 200-300 м.

1.166. Геосейсмическая модель верхней части мерзлой толщи в весенне-летне-осенний период может быть аппроксимирована двухслойной средой с пониженными скоростями в первом от поверхности слое. Граница между слоями не плоская вследствие различной глубины сезонного протаивания мерзлых пород на различных участках. При расчетах принято, что глубина залегания кровли мерзлоты меняется от 0,5 до 1,5 м.

1.167. Теоретический годограф головной волны, соответствующий границе между талыми и мерзлыми породами, показан на рис. 14. Неровности границы на годографе отражаются в виде изменений t_0, которые при заданных условиях (V_1 = =500 м/с; V_2 = 2500 м/с) достигают 4 мс. Следует отметить, что в случае выпуклой границы (выступа) нарушается скольжение волны вдоль границы и регистрируются преломленно-дифрагированные волны. Это приводит к изменению наклона, соответствующих участков годографа. Участки, где не регистрируется головная волна (зоны дифракции), по протяженности не превышают даже минимального шага (1 м) и нами не рассматриваются.

1.168. Информация, которая может быть получена в полевых условиях, недостаточно дифференцирована. Кроме неровностей в кровле мерзлоты, значительные искажения годографов вызывает неидентичность условий возбуждения и приема, а также неустойчивость значений скоростей распространения упругих волн в сезонно-талом слое. При отсутствии дополнительной информации можно получать лишь осредненные характеристики разреза (мощность сезонно-талого слоя, скорость распространения упругих колебаний в талых породах в верхней части мерзлой толщи).

1.169. Рассмотрение модели несквозного талика (рис. 15) подтверждает возможность применения сейсморазведки для определения глубины несквозных таликов и уровня грунтовых вод (УГВ) в них.

1.170. Возможность применения сейсмических методов для определения УГВ основана на различии скоростей продольных волн в неводонасыщенных и полностью водонасыщенных породах. Для нескальных пород переход от неполного водонасыщения к полному сопровождается скачкообразным возрастанием скоростей продольных волн и граница между неводонасыщенными и водонасыщенными зонами является сильной пре-

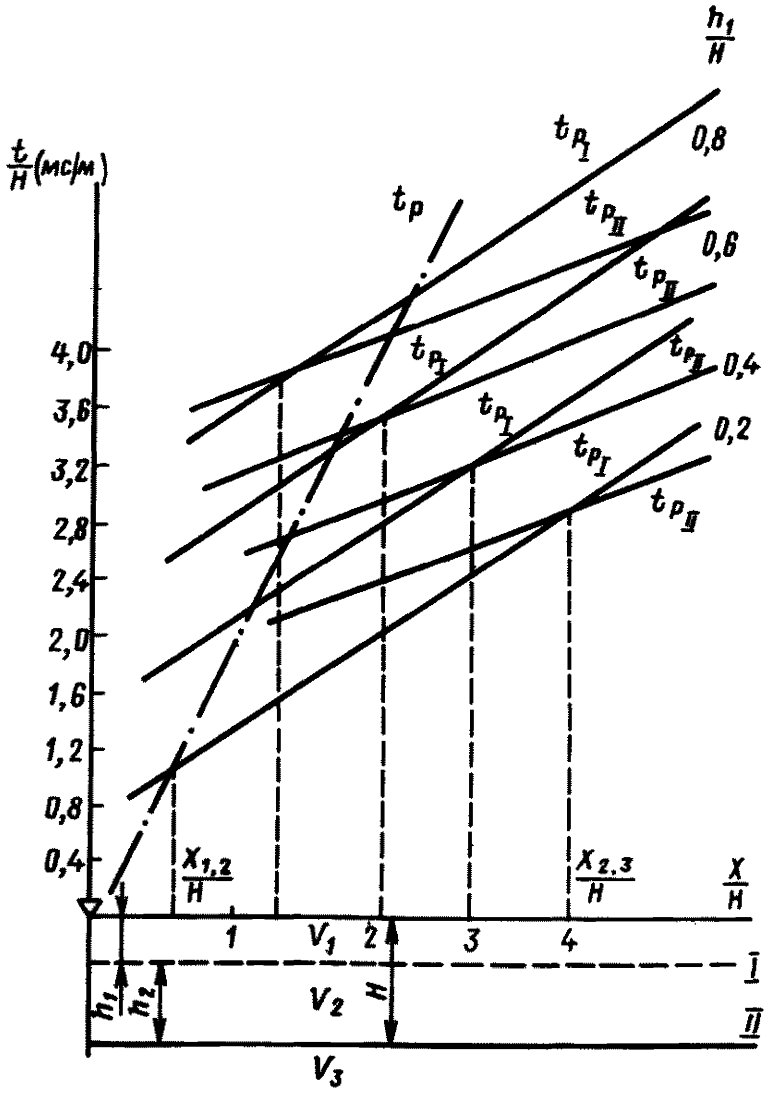


Рис. 15. Теоретические годографы головной волны над несквозным и обводненным таликом

ломляющей границей для продольных волн. Дополнительным и очень надежным признаком появления в разрезе подземных вод является прекращение регистраций поперечной S и обменной PSP волн.

1.171. Теоретические годографы головных волн, соответствующие УГВ t_{p_I} и границе талых и мерзлых пород $t_{p_{II}}$, а также теоретический годограф прямой волны t_p приведены на рис. 15.

Годографы t_{p_I} и $t_{p_{II}}$ вычислены по формулам:

$$\frac{t_{p_I}}{H} = \frac{X}{H} - \frac{1}{V_2} + \frac{h_1}{H}\,\frac{2\cos i_{2,1}}{V_1}; \qquad (18)$$

$$\frac{t_{p_{II}}}{H} = \frac{X}{H} - \frac{1}{V_3} + \frac{h_1}{H}\,\frac{2\cos i_{3,1}}{V_1} + \frac{h_2}{H}\,\frac{2\cos i_{3,2}}{V_2}, \qquad (19)$$

где V_1, V_2 V_3 - скорости распространения продольных волн соответственно в неводонасыщенных талых, водонасыщенных талых и мерзлых породах; h_1 - мощность неводонасыщенных талых пород, которая и определяет положение УГВ; h_2 - мощность водонасыщенных талых пород; H - полная глубина талика.

При расчете были взяты следующие значения скоростей: V_1 = 500 м/с, V_2 = = 1500 м/с, V_3 = 2500 м/с. Годографы построены в координатах X/H и t/H и соответствуют различным значениям h_1/H.

1.172. На теоретических годографах вслед за прямой волной в первых вступлениях регистрируется головная волна, соответствующая УГВ. Протяженность зоны

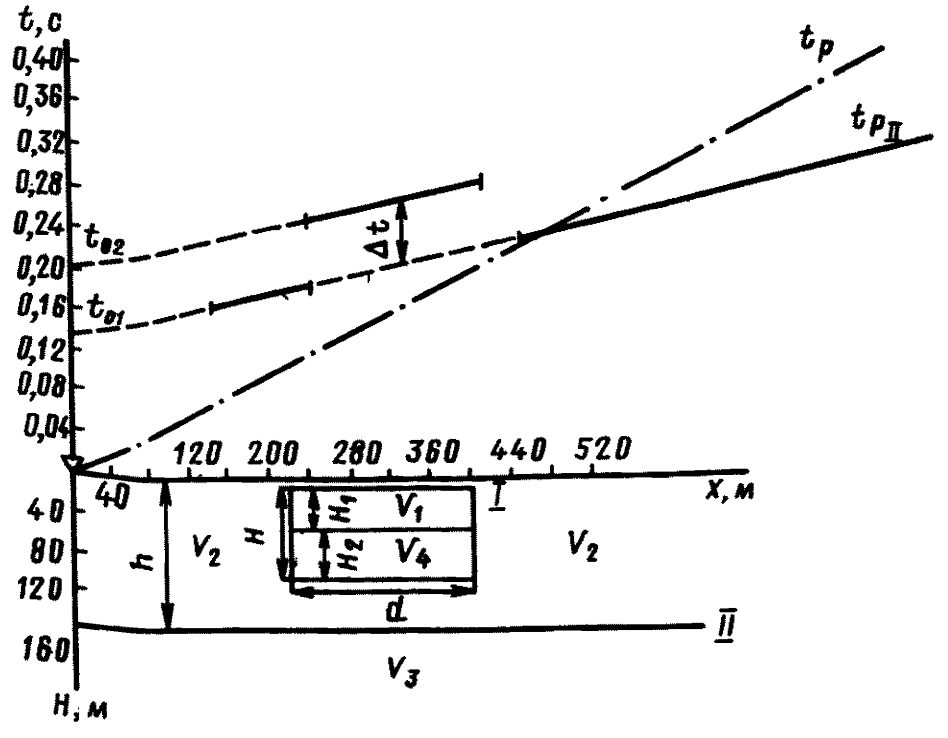


Рис. 16. Геосейсмическая модель межмерзлотного талика

первых вступлений ограничена определенным значением $X/H \leq X_{2,3}/H$, зависящим от глубины залегания преломляющих границ и величины скоростей V_1, V_2, V_3. При X/H, превышающих $X_{2,3}/H$, в зону первых вступлений попадает головная волна, соответствующая границе талых и мерзлых пород (см. рис. 15).

1.173. Ширина талика d и глубина H определяют ту часть годографов, которая реально может быть получена над таликом. При $X/H \geq d/H$, т.е. за пределами талика, годографы преломленных волн для этих границ не существуют. Если ширина талика невелика ($d/H < X_{2,3}/H$), волна, соответствующая кровле мерзлых пород, регистрируется только в последующих вступлениях.

Признаком преломленной на УГВ волны является отсутствие на записи обменной волны типа PвP и меньшая по сравнению с мерзлотой величина граничной скорости.

1.174. Геосейсмическая модель межмерзлотного талика представлена на рис. 16. Определение УГВ в межмерзлотных таликах невозможно из-за экранирующего влияния высокоскоростного покрывающего слоя мерзлых пород. При наличии нижележащей преломляющей границы можно сделать вывод о присутствии в разрезе отдельной низкоскоростной неоднородности обусловленной линзой талых пород. В этом случае анализируется характер записи волны, преломленной на ней.

1.175. Прохождение волны через низкоскоростную неоднородность приводит к увеличению t_0 (см. рис. 16). Одновременно меняется характер записи волны (интенсивность и форма записи) в отличие от случая, когда изменение t_0 связано с увеличением глубины залегания этой границы. В зависимости от расстояния пункта возбуждения до талика волна, соответствующая повышенному значению t_0 может регистрироваться в первых или последующих вступлениях.

1.176. Рассмотренные модели позволяют обоснованно ограничить область применения наземной сейсморазведки и определить круг решаемых с ее помощью задач:

определение глубины и характера залегания кровли мерзлоты и динамики сезонного протаивания;

изучение распространения, мощности и обводненности сквозных и несквозных таликов;

определение инженерно-геологических характеристик деформативных и прочностных;

при наличии в мерзлой толще глубоко залегающей преломляющей границы ее можно использовать для изучения распространения межмерзлотных таликов и выделения участков сильнольдистых пород и крупных скоплений льда.

1.177. С целью расширения круга решаемых задач, а также для уточнения результатов наземной сейсморазведки следует проводить сейсмические наблюдения и во внутренних точках среды.

1.178. Акустический каротаж (АК) является средством для детального расчленения разреза по упругим свойствам вдоль ствола скважины. Сведения о скоростях упругих волн могут быть использованы для оценки инженерно-геологических характеристик грунтов в массиве, что представляет особый интерес при бескерновом бурении.

По диаграммам АК возможно определить состав и строение грунтов, выделить пропущенные при описании скважин пропластки пород, а также уточнить положение, связанных со сменой литологии и льдистости.

1.179. Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) позволяет исследовать околоскважинное пространство. Оно основано на изучении особенностей распространения упругих волн вдоль наклонных относительно оси скважины лучей при расположении пунктов возбуждения и приема колебаний на поверхности и во внутренних точках среды.

1.180. Применение ВСП в комплексе с АК позволяет уточнить строение окружающего скважину массива мерзлых грунтов и обоснованно распространить упругие характеристики грунтов, полученные при наземных и скважинных наблюдениях, на околоскважинное пространство.

1.181. Акустическая керноскопия (АКС) заключается в измерении скоростей на образцах с ненарушенной структурой (монолитах, кернах) непосредственно в полевых условиях. С одной стороны, АКС служит для подтверждения данных АК, а с другой - для более тесной увязки скоростей продольных волн с параметрами состава и строения мерзлых грунтов. Кроме того, прозвучивание образцов естественного сложения в различных направлениях позволяет судить о скоростной анизотропии, что важно как для интерпретации сейсмических данных, так и для изучения криогенных текстур. АКС делает возможным переход от лабораторных к полевым методам определения физико-механических свойств грунтов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИЕМОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1.182. На основании сказанного выше можно сделать вывод о целесообразности использования не отдельных сейсмоакустических методов, а всего комплекса.

1.183. При исследовании мерзлых грунтов с поверхности земли применяется сейсмическое профилирование методом преломленных волн (МПВ) или корреляционным методом преломленных волн (КМПВ).

1.184. Аппаратура для инженерной сейсморазведки должна обеспечивать надежную корреляцию различных типов волн, высокую точность регистрации времени (не ниже 0.0001 с), а также быть мобильной, малогабаритной, экономичной и надежной при эксплуатации.

1.185. Модернизированная одноканальная установка ОСУ-1, снабженная 11-канальной косой с вмонтированными в нее сейсмоприемниками и специальным коммутирующим устройством, удовлетворяет почти всем предъявляемым требованиям.

1.186. Упругие колебания возбуждаются ударами металлической кувалды весом 5-8 кг по специальной деревянной или металлической подставке, стабилизирующей ударное воздействие на грунт.

1.187. Глубинность исследований при благоприятных сейсмогеологических условиях составляет 15-20 м, что в большинстве случаев оказывается достаточным для инженерно-строительных целей.

1.188. Волновая картина фотографируется с экрана электронно-лучевой трубки.

1.189. Предварительная обработка сейсмических данных заключается в изучении особенностей волнового поля и корреляции регистрируемых волн.

1.190. Для сейсмогеологических разрезов в условиях вечной мерзлоты в весенне-летне-осенний период характерна следующая волновая картина: сначала прослеживается прямая волна, приуроченная к слою сезонного протаивания, затем в первые вступления входит интенсивная преломленно-рефрагированная продольная волна, связанная с кровлей мерзлоты. При наличии скальных пород со скоростями, большими, чем в мерзлой песчано-глинистой толще, на значительном удалении от пункта возбуждения прослеживается волна, связанная с их кровлей. В последующих вступлениях прослеживается интенсивная обменная волна PSP, связанная с кровлей мерзлоты.

1.191. Присутствие волны PSP помогает различить преломления, соответствующие кровле мерзлых пород и уровню грунтовых вод, т.е. способствует однозначности интерпретации. Это также дает возможность получения дополнительной информации о скорости распространения поперечных волн в мерзлых породах и повышает точность определения мощности сезонно-талого слоя.

1.192. Интерпретация данных наземных наблюдений производится с помощью стандартных приемов, описанных в специальной литературе по инженерной сейсморазведке.

1.193. Результаты интерпретации представляются в виде сейсмогеологических разрезов, на которые наносятся полученные сейсмические границы и их скоростные характеристики. В случае площадной съемки строится карта глубины залегания опорного сейсмического горизонта (кровли мерзлоты), на которую наносятся скорости всех зарегистрированных волн (продольных, поперечных и поверхностных) или их отношения. Такие данные служат для определения инженерно-геологических параметров разреза (характеристик грунтов).

1.194. Точность определения параметров разреза (глубины залегания границы, величины граничных скоростей) зависит от соотношения мощностей покрывающей и подстилающей толщи, длины интервала наблюдений, шага наблюдений и абсолютных значений скоростей. Для реальных разрезов ошибки определения указанных параметров лежат в пределах 5-10%.

1.195. Метод ВСП применяется в комплексе с другими модификациями сейсморазведки в районах развития вечной мерзлоты.

1.196. Наблюдения по методу ВСП проводятся по системе, состоящей из ряда наземных (горизонтальных) и скважинных (вертикальных) профилей. Вертикальные профили отрабатываются из ряда пунктов возбуждения, расположенных на различных расстояниях от устья скважин, в то время как сейсмоприемники располагаются в скважине на разной глубине. Продольный вертикальный профиль является обязательным элементом системы.

1.197. Кроме методики прямого каротажа ВСП возможна методика обращенных наблюдений. Возбуждение колебаний при этом производится в скважине, а сейсмоприемники располагаются на поверхности. ВСП желательно проводить по трехкомпонентной схеме, при этом возбуждение колебаний производится на поверхности земли по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Соответственно ориентируют и приемники в скважине.

1.198. При наблюдениях по методу ВСП используется та же сейсмическая аппаратура, что и при наземной сейсморазведке. Вместо сейсмической косы на вход установки подключается скважинный зонд, представляющий собой гильзу с заключенными в ней разноориентированными сейсмоприемниками. Количество сейсмоприемников в зонде в зависимости от характера решаемых задач, технических возможностей и диаметра скважины колеблется от 1 до 6 и более.

1.199. Необходимым условием для получения качественного материала при ВСП является обеспечение надежного прижима зонда к стенкам скважины. Для этой цели может использоваться механический способ прижима.

1.200. Наблюдения по методу ВСП могут проводиться в сухих необсаженных и в обсаженных скважинах, если обсадная труба прочно вмонтирована в грунт.

1.201. Пункты возбуждения располагаются обычно на расстоянии 5-10 м друг от друга вдоль линии профиля, проходящего через устье каротируемой скважины: зонд перемещается по скважине с шагом 0,5-1 м. Максимальное удаление пункта возбуждения от скважины не превышает обычно 40-50 м.

1.202. Методика обработки и представления результатов ВСП рассмотрена подробно в инструкции по проведению ВСП.

1.203. Результаты работ представляются в виде диаграмм изохрон мнимого источника возбуждения. Диаграммы изохрон рекомендуется строить для первых вступлений или наиболее характерных фаз продольных и поперечных волн. Представленные на диаграммах поля времени являются сложной функцией состава (литология, влажность), состояния (температура, давление) и строения (криогенная текстура) грунтов в разрезе. Разделить влияние перечисленных факторов можно путем построения так называемых разностных диаграмм. Параметром, наносимым на диаграмму, является разность времен наблюденного и теоретически рассчитанного для некоторой модели разреза.

1.204. При проведении АК в качестве измерительной аппаратуры могут быть использованы ультразвуковые приборы ИПА-59, УКБ-1, ДУК-20, УК-10П и различные варианты переделанных для этой цели приборов ИКЛ-5 и Р-5-5.

1.205. Для АК применяются различные конструкции зондов, выполненные по разработкам Гидропроекта.

1.206. Методика наблюдений при АК сводится к регистрации волновой картины на электронно-лучевой трубке акустического прибора при данном положении зонда и при попеременном использовании пьезоэлементов в качестве излучателей и приемников. При этом применяются системы нагоняющих и встречных годографов. Регистрация производится путем фотографирования или зарисовки волновой картины.

1.207. Измерения производятся при поднятии зонда с шагом, равным расстоянию между датчиками (база) или кратным ему, но обеспечивающим перекрытие предыдущей и последующей стоянки зонда. База и шаг выбираются исходя из дифференцированности и необходимой детальности разреза, с учетом аппаратуры возможностей и наличия помех. Минимальная база, удовлетворяющая инженерно-геологическим целям, составляет 10 см, максимальная - 25-30 см.

1.208. Обработка данных заключается в корреляции волн, установлении значений времени и графическом или расчетном определении скоростей. По первым вступлениям определяют V_0 и V_P, по экстремумам волны, обладающей большей амплитудой, более низкой частотой и приблизительно в 2 раза большим временем регистрации, чем время τ_P, определяется V_R. Возможны также измерения периодов и амплитуд соответствующих волн, дающие дополнительные сведения, отражающие спектральные особенности регистрируемых волн и описывающие поглощающие способность среды. Для оценки последних используется отношение амплитуд, измеренных на различных базах.

1.209. Результаты представляются в виде соответствующих диаграмм изменения V_P и V_R по глубине, периода колебаний и отношения амплитуд.

1.210. Для проведения акустической керноскопии (АКС) используются те же приборы, что и для АК, и высокочастотные пьезодатчики. Для улучшения контакта датчиков с образцом используется солидол.

1.211. Измерение скорости производится сразу же после извлечения керна на поверхность по методике просвечивания в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Основным недостатком такой методики является отепление открытой поверхности образца. Несмотря на указанный недостаток, величины скоростей, полученные при измерениях АК и АКС, в основном совпадают (см. рис. 34). Разброс значений можно отнести за счет разницы температур и нарушения сохранности образцов при извлечении на дневную поверхность.

1.212. Результаты АКС представляются в виде диаграмм скоростей $V_P = V_P(H)$ отдельно для различных направлений $V_{P(x,y)}$ и $V_{P(z)}$ и диаграммы отношений скоростей $V_{P(x,y)} / V_{P(z)}$.

ГРАВИРАЗВЕДКА

ПЛОТНОСТЬ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЗАВИСИМОСТЬ ЕЕ ОТ СОСТАВА И ЛЬДИСТОСТИ

1.213. Различие в плотности горных пород служит предпосылкой для применения гравиразведки при решении задач геологического картирования.

1.214. Любую горную породу можно рассматривать как трехфазную систему, состоящую из твердых, жидких и газообразных частиц. Плотность ее будет равна отношению

$$\sigma = \frac{m_т + m_ж + m_г}{V_т + V_ж + V_г}, \qquad (20)$$

где $m_т, m_ж, m_г$ - массы твердых, жидких и газообразных частиц некоторого объема горной породы, а $V_т, V_ж, V_г$ - соответствующие этим массам объемы.

1.215. Так как пористость изверженных и метаморфических пород мала (доли процента), то их плотность в основном зависит только от минералогического состава. Она увеличивается в направлении от кислых к ультраосновным по мере уменьшения процентного содержания кварца и ортоклаза, увеличения основности плагиоклаза и содержания биотита и амфиболов.

1.216. Плотность же осадочных пород определяется в первую очередь их пористостью, во вторую - их минералогическим составом.

1.217. Средние значения плотности основных разновидностей пород в талом состоянии приведены в табл. 6.

1.218. Плотность изверженных и метаморфических пород практически не изменяется при переходе в область отрицательных температур в силу их малой пористости.

1.219. Изменения плотности при промерзании осадочных пород невелики, если влажность их равна или меньше полного влагонасыщения. Исключения составляют рыхлые осадочные породы, которые в мерзлом состоянии могут содержать гораздо больше воды (льда), нежели в талом. В этом случае пористость мерзлых грунтов может значительно увеличиться за счет выделения льда, а плотность соответственно уменьшается.

1.220. В табл. 7 приведены результаты расчетов зависимости плотности различных рыхлых осадочных пород от степени заполнения пор льдом (льдистости).

Таблица 6

Генезис и наименование породы	σ, г/см^3		
	минимум	максимум	среднее значение
1. Изверженные породы:			
граниты, гранодиориты	2,65	2,67	2,66
кварцевые диориты, диориты, андезиты, порфириты	2,75	2,81	2,8
базальты, диабазы, габбро	2,88	2,98	2,9
нориты, оливиновые габбро, друзиты, перидотиты	3	3,2	3,1
2. Метаморфические породы:			
скарны, роговики	2,8	3,4	3
3. Осадочные породы:			
ангидриты	2,8	3	2,8
песчаники, известняки, доломиты	2,4	2,7	2,5
гипсы, каменная соль	2,1	2,5	2,4
пески, супеси, суглинки, глины	1,2	2,7	1,7-2
торф	0,4	0,95	0,86

Таблица 7

Льдистость $Л_в$	Плотность σ, г/см^3				
	песка	супеси	суглинка	глины	торфа
0	2,45	2,42	2,35	2,32	0,93
0,1	2,4	2,34	2,2	2,02	0,93
0,3	2,12	2	1,9	1,76	0,925
0,5	1,77	1,69	1,61	1,52	0,92
0,7	1,43	1,37	1,32	1,27	0,915
0,9	1,09	1,07	1,04	1,02	0,91
1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

1.221. Плотность песчано-глинистых отложений быстро убывает по мере увеличения их льдистости (см. табл. 7), создавая тем самым предпосылки для применения гравиметрии с целью обнаружения и картирования сильнольдистых пород и льда. В отличие от этого, изменение льдистости торфа практически не отражается на его плотности.

СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

1.222. В связи с существующей дифференциацией мерзлых пород по плотности (см. табл. 7) представляют практический интерес следующие случаи.

1.223. Гидролакколиты и линзы льда в песчано-глинистых отложениях (рис. 17) располагаются в верхней части мерзлой толщи и их можно аппроксимировать в первом приближении шаром.

1.224. Для расчета аномального поля над указанной моделью была использована формула

$$\Delta g_ш = \frac{4}{3}\pi f R^3(\sigma_1-\sigma_2)\frac{R+h_1}{[x^2+(R-h_1)^2]^{3/2}}, \qquad (21)$$

где f - гравитационная постоянная, равная $6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м^2/кг^2; R - радиус шара; $(\sigma_1-\sigma_2)$ - разность плотностей пород шара и вмещающих пород; h_1 - глубина залегания верхней точки шара.

В расчетах принималась плотность льда, равная 0,9 г/см^3, а плотность вмещающих пород бралась равной 1,8 г/см^3. Глубина залегания принималась 1 м. Характер

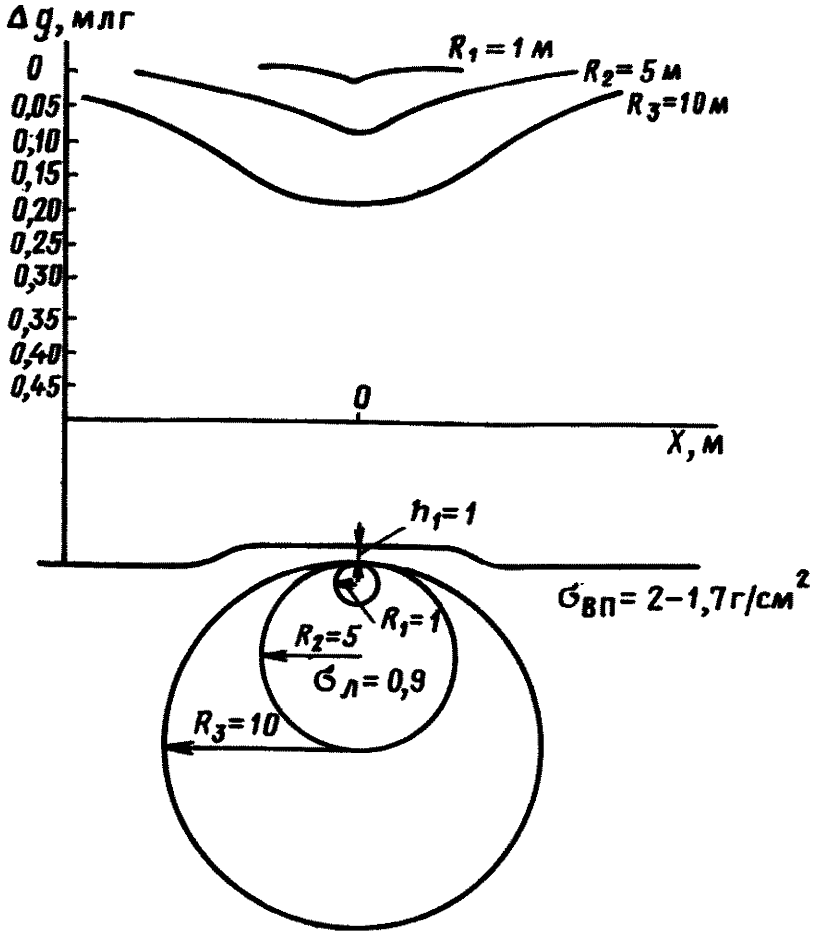


Рис. 17. Расчетная аномалия силы тяжести над гидролакколитами различных размеров

изменения аномалии силы тяжести над рассматриваемой моделью мерзлой толщи при различных размерах возмущающего объекта показан на рис. 17. Амплитуды аномалий Δg над центром шара не доступны для обнаружения при высокоточных измерениях.

1.225. Модель пласта льда или сильнольдистых пород, залегающих в мерзлой толще с меньшей льдистостью, изображена на рис. 18. Расчет аномалии силы тяжести над мерзлой толщей, содержащей в верхней части разреза горизонтальный пласт льда или пласт сильнольдистых песчано-глинистых пород, проводился по формуле

$$\Delta g_a = f\Delta\sigma\left[\pi(h_2-h_1) - 2h_1 \operatorname{arctg}\frac{x}{h_1} + 2h_2 \operatorname{arctg}\frac{x}{h_2} + x\ln\frac{x^2+h_2^2}{x^2+h_1^2}\right], \qquad (22)$$

где h_1 и h_2 - глубина залегания кровли и подошвы пласта; $\Delta\sigma$ - разность плотностей вмещающих пород и пород возмущающего объекта; f - гравитационная постоянная.

При расчетах аномалий силы тяжести над пластом $\Delta\sigma$ бралась равной минус 0,8 г/см^3. Такое значение $\Delta\sigma$ может соответствовать либо разности плотностей между льдом и песчано-глинистыми отложениями, имеющими льдистость около $Л_в$ = 0,3, либо разности плотностей между сильнольдистыми породами $Л_в$ = 0,5-0,9 и менее льдистыми с $Л_в$ = 0,1-0,2.

Из анализа графиков изменения аномалий силы тяжести (рис. 18) видно, что пластовые тела мощностью более 10 м и глубиной залегания кровли пласта 1-5 м можно надежно выделить с помощью высокоточной гравиметровой съемки.

1.226. Модель мерзлого торфяника различной мощности, залегающего в мерзлой толще, показана на рис. 19. Поскольку плотность торфа равна 0,94 г/см^3 и практически не зависит от льдистости, достаточно крупные торфяники могут служить причиной аномалий силы тяжести. С целью оценки формы и амплитуды аномалии Δg выполнены расчеты по формуле (22). В расчетах принималось $h_1 = 0$. Плотность песчано-глинистых пород бралась равной 1,7 г/см^3. На рис. 19 показаны результа-

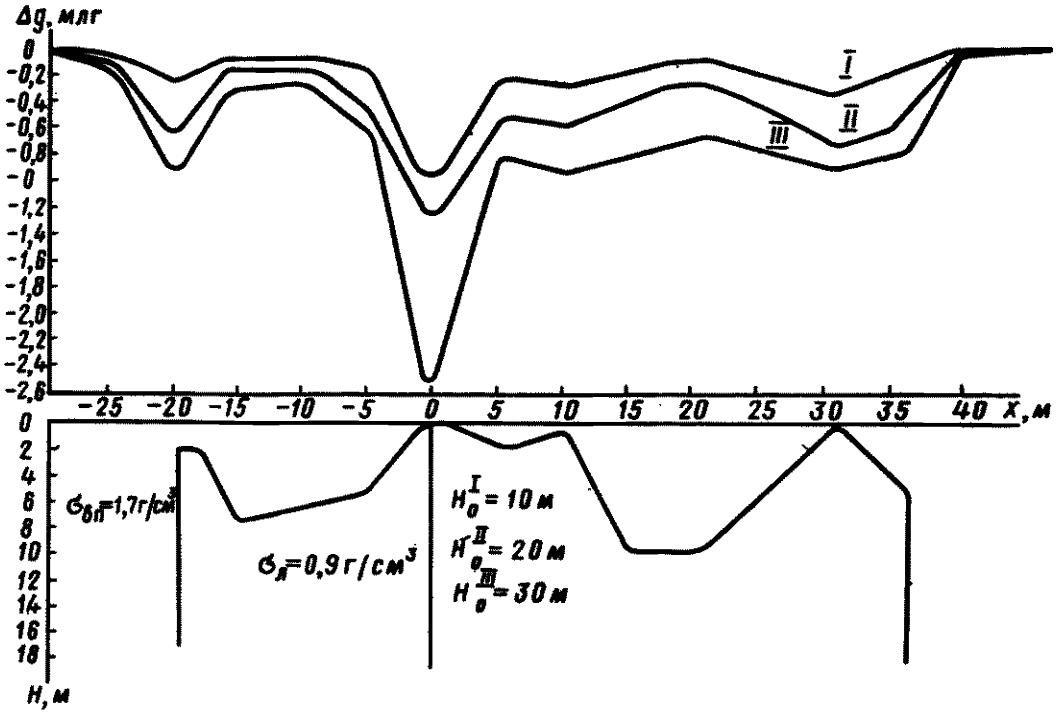


Рис. 18. Модель пласта льда, залегающего в мерзлой толще, и расчетная аномалия силы тяжести над ней

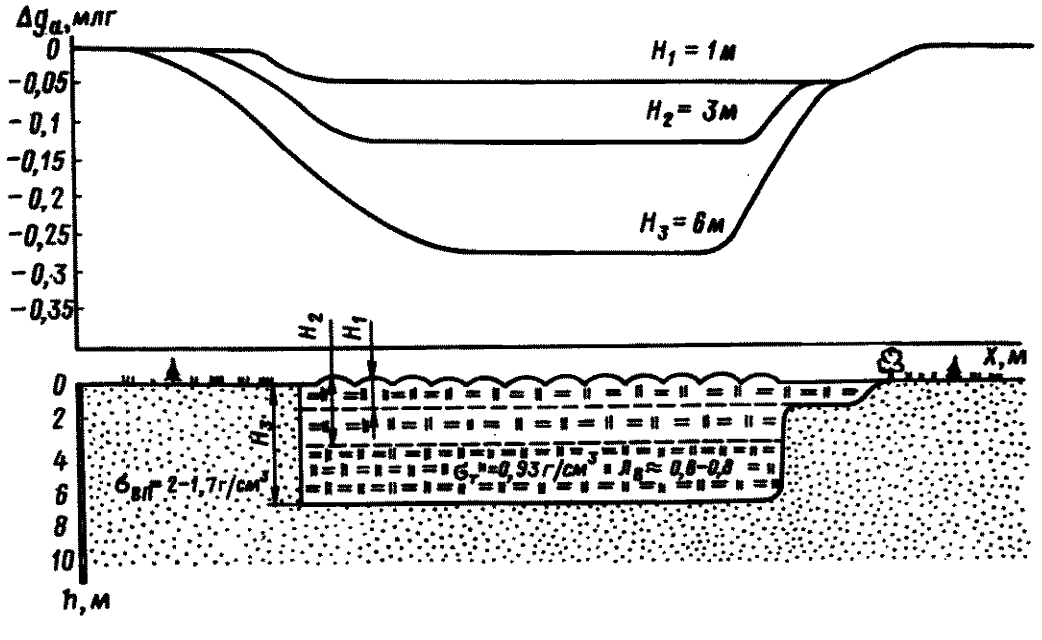


Рис. 19. Модель мерзлого торфяника и расчетная аномалия силы тяжести над ней

ты вычислений Δg. из которых следует, что торфяники, имеющие мощность более 2 м, могут быть зафиксированы при гравиметровой съемке.

1.227. Модель мерзлой толщи с жильными льдами, ограниченными по глубине, аппроксимировалась вертикальными цилиндрами, имеющими конечные размеры, залегающими в толще песчано-глинистых пород с плотностью 1,8 г/см^3.

Аномалия силы тяжести над осью цилиндра (X=0) рассчитывалась по формуле

$$\Delta g_ц = 2\pi f(\sigma_1 - \sigma_2)\left[(h_2 - h_1) - \sqrt{h_2^2 + R^2} + \sqrt{h_1^2 + R^2}\right], \qquad (23)$$

где σ_1 и σ_2 - плотность вмещающей породы и льда; R - радиус цилиндра; f - гравитационная постоянная; h_1 и h_2 - глубины залегания верхнего и нижнего оснований цилиндра. Расчет выполнен при $\Delta\sigma$ = -0,9 г/см^3, $2R$ = 2в, где в - горизонтальная мощность жильного тела; $h_2 - h_1 = H$ - вертикальная мощность жильного тела. Результаты вычислений аномалии силы тяжести над центром жилы помещены в табл. 8.

Таблица 8

Горизонтальная мощность жилы льда 2в, м	Вертикальная мощность жилы льда H, м	Приращение поля силы тяжести Δg_α, мгл
2	10	0,035
3	15	0,065
4	20	0,105
5	25	0,138
6	30	0,162
8	34	0,195

1.228. Физические предпосылки таковы, что гравиметровую съемку можно применять для:

поисков и картирования пластов льда или сильнольдистых пород ($Л_в$ более 0,5), залегающих среди малольдистых пород;

картирования повторно-жильных льдов, горизонтальная мощность которых превышает 4 м;

оконтуривания торфяных массивов с мощностью торфа более 2 м.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАБОТ И ПРИЕМОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1.229. При решении задач геологического картирования проводят площадную и профильную гравиметровую съемку по методике, основные положения которой изложены в действующей инструкции по гравиразведке.

1.230. Картирование льдов и торфяников возможно проводить только в условиях высокоточной съемки, потому что аномалии силы тяжести от этих тел малы и изменяются от 0,04 до 2,5 мгл. Для обнаружения таких аномалий необходимо:

съемку проводить высокоточными гравиметрами, порог чувствительности которых равен 0,007-0,01 мгл;

приборы перед работой отрегулировать и проверить;

в соответствии с режимом работы приборов выбрать продолжительность и структуру рейса;

опорную сеть строго закрепить на местности в соответствии с масштабом съемки;

для повышения точности наблюдений проводить большой объем контрольных замеров;

обязательное обеспечение топоосновной соответствующего масштаба.

1.231. Для надежного определения аномального эффекта от ледяных тел профиль следует начинать и заканчивать на участках, где искомое тело отсутствует.

1.232. В результате наблюдений надо вводить поправки:

за нормальное поле;

за высоту и влияние промежуточного слоя (поправка Буге);

за рельеф.

Обычно для разведочных съемок высоту отсчитывают от условного уровня.

1.233. Результаты вычисления аномалий Δg представляются в виде графиков по профилям наблюдений или карт изоаномал.

1.234. Интерпретация гравиметровых данных подразделяется на качественную и количественную.

1.235. При качественной интерпретации по характеру изменения аномалий силы тяжести определяется местоположение тел, создающих эту аномалию: делаются предположения о форме и характере их контактов.

1.236. Качественная интерпретация проводится по графикам Δg и картам изоаномал. На них выделяют региональные и локальные аномалии, определяют степень сложности поля на каждом участке. Наиболее трудным этапом качественной интерпретации является определение числа и формы возмущающих тел.

1.237. При количественной интерпретации определяют размеры и глубину залегания исследуемых объектов при известной их плотности или их плотность при известных размерах и глубине залегания.

1.238. При количественной интерпретации аномалий силы тяжести, полученных от небольших тел достаточно правильной формы и неглубокого залегания, используется способ характерных точек. Глубина залегания тел h определяется по формуле

$$h = \frac{x_к}{p_к}, \qquad (24)$$

где $x_к$ - абсцисса точки, в которой $\Delta g = 1/к \Delta g_{макс}$ $p_к$ для каждой фигуры вычисляется по формулам:

для шара - $$p_к = \sqrt[6]{\left(\frac{1}{к}\right)^2 - 1}, \qquad (25)$$

для цилиндра - $$p_к = \sqrt{\frac{1-к}{к}}, \qquad (26)$$

для горизонтальной плоскости - $$p_к = tg\left[\frac{\pi}{2}(2к-1)\right] \qquad (27)$$

1.239. Точность решения обратной задачи зависит от многих факторов, в первую очередь от точности определения координат особых точек. В условиях слабых аномалий силы тяжести точность интерпретации составляет ±50%.

МАГНИТОРАЗВЕДКА

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

1.240. Физико-геологической основой применения магниторазведки является зависимость наблюдаемого на поверхности земли магнитного поля от магнитных свойств горных пород.

1.241. Основным параметром, характеризующим магнитные свойства пород, является магнитная восприимчивость $к_m$, которая изменяется в зависимости от содержания в них магнитных породообразующих минералов.

1.242. В табл. 9 помещены значения магнитной восприимчивости основных разновидностей горных пород.

Таблица 9

Генезис и наименование пород	$к_m \cdot 10^{-6}$		
	минимум от	максимум до	среднее значение
I. Практически немагнитные породы			
А. Изверженные и метаморфические - кварциты	0	0	0
Б. Осадочные полускальные - соль, мрамор, лед	-1	+1	0
II. Слабомагнитные породы			
А. Изверженные и метаморфические - кислые граниты, различные гнейсы и сланцы	2	460	70-130
Б. Осадочные полускальные - песчаники, алевролиты, известняки, доломиты, мергели	2	300	3-80
В. Осадочные рыхлые - пески, глины	2	220	90
III. Магнитные породы			
А. Изверженные и метаморфические - основные порфириты, базальты, диабазы, роговики	200	17700	1700-3600
Б. Осадочные породы - песчаники рудных складчатых районов			до 40000
IV. Сильномагнитные породы			
А. Изверженные породы - ультраосновные пироксениты, перидотиты	2400	170000	24000-70000
Б. Метаморфические породы - скарны	1000	60000	5000-8000

1.243. Магнитные свойства всех без исключения пород практически не изменяются при переходе в область отрицательных температур.

1.244. Присутствие в осадочных породах льда в виде жил, пластов или каких-либо других форм крупных размеров может послужить причиной отрицательных аномалий ΔZ, ΔT или ΔH.

СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

1.245. На основании существующей дифференциации мерзлых пород и льда по магнитным свойствам можно указать тип мерзлых толщ, изучение которых с помощью магниторазведки может иметь самостоятельное значение.

1.246. Жильные льды можно аппроксимировать серией вертикальных жил, выклинивающихся на некоторой глубине (рис. 20, 21 и 22). Аномалия вертикальной составляющей магнитного поля ΔZ_a над ними вычисляется по формуле

$$\Delta Z_a = 2BJ\left[\frac{h_1}{(h_1^2+x^2)^{3/2}} - \frac{h_2}{(h_2^2+x^2)^{3/2}}\right] \qquad (28)$$

где h_1 и h_2 - глубины залегания верхней и нижней границ жил; 2в - мощность жил; $J = K_m H$ - интенсивность намагничивания, которое принято вертикальным; H = 0,398 А/м - напряженность магнитного поля Земли. При расчетах K_m льда принималась равной нулю, а вмещающих пород - 10^{-4}.

1.247. Модель горизонтального пласта льда, залегающего на небольшой глубине в мерзлых песчано-глинистых отложениях, показана на рис. 23. Расчет аномалий вертикальной составляющей ΔZ_a над пластом осуществляется по формуле

$$\Delta Z_a = 2BJ\left\{\frac{h_1^2+b^2-x^2}{[h_1^2+(x+b)^2][h_1^2+(x-b)^2]} - \frac{h_2^2+b^2-x^2}{[h_2^2+(x+b)^2][h_2^2+(x-b)^2]}\right\}, \qquad (29)$$

где h_1 и h_2 - соответственно глубины залегания кровли и подошвы пласта льда; 2в - горизонтальная мощность пласта; $J = K_m H$ - интенсивность вертикального намагничивания. При расчетах значение K_m льда принималось равным нулю, а вмещающих пород - 10^{-4}.

1.248. Над пластом льда формируется характерная знакопеременная аномалия. Особенность ее состоит в том, что основные изменения ΔZ_a приурочены к боковым границам пласта, а над средней его частью значения ΔZ_a близки к уровню нормального поля во вмещающей среде (см. рис. 23).

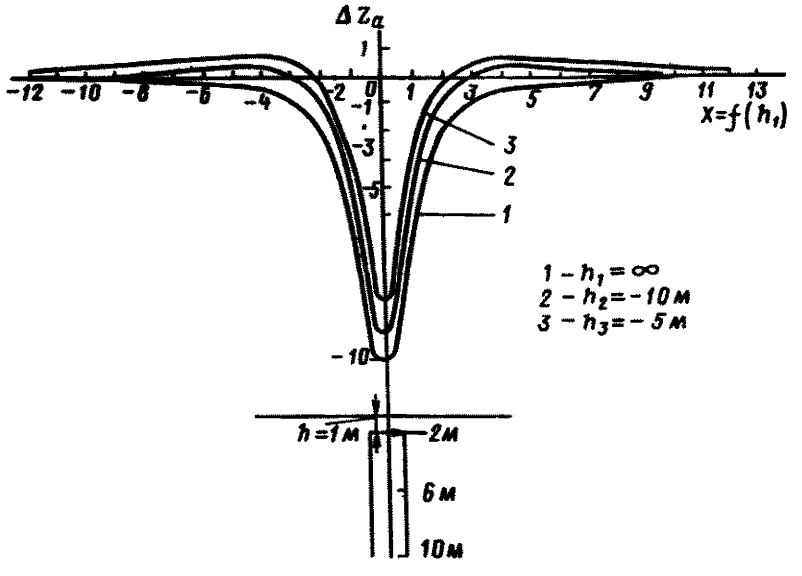


Рис. 20. Геомагнитная модель жильного тела и расчетная аномалия над ним при различных значениях h_1

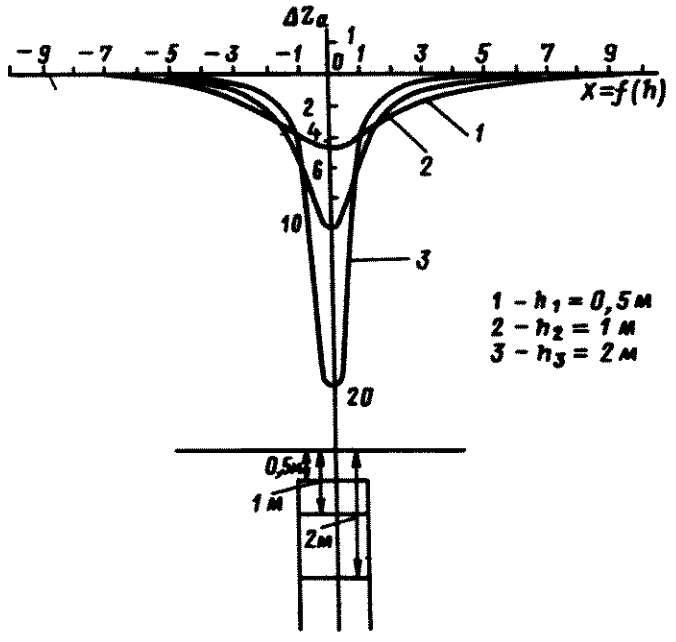


Рис. 21. Геомагнитная модель жильных льдов и расчетная аномалия над ними при 2 в = 2 м, бесконечном простирании их в глубину и при различных значениях h_1

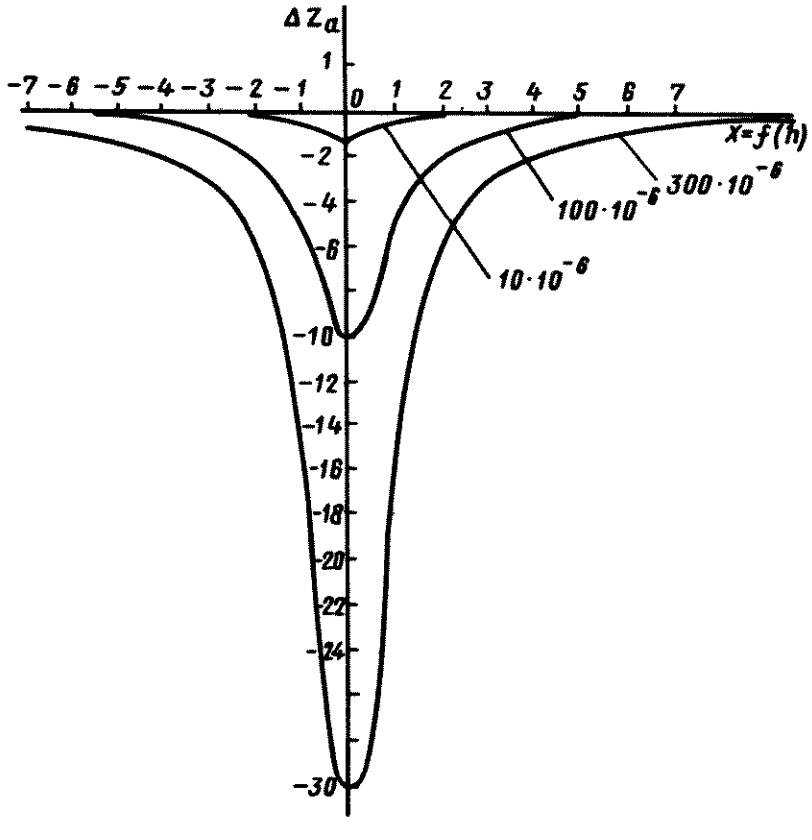


Рис. 22. Геомагнитная модель жильных льдов при различных значениях $K_{пт}$ вмещающих пород

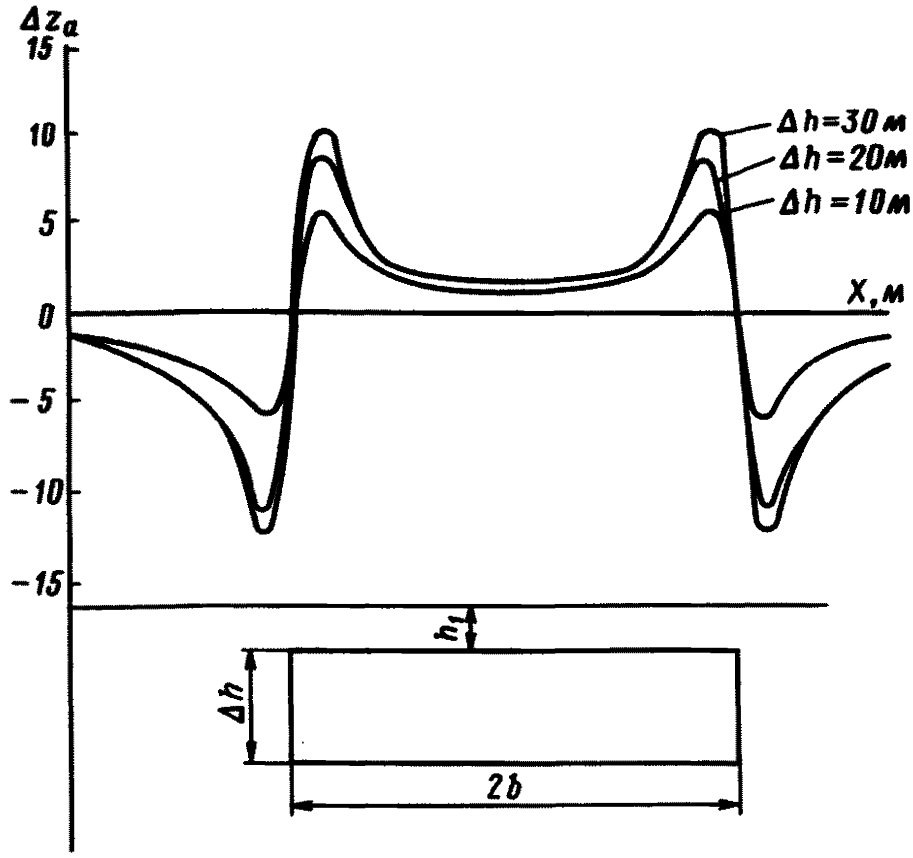


Рис. 23. Аномалия Z над горизонтальным пластом льда с 2 в/h_1 = 100 при различной мощности пласта льда

По мере увеличения вертикальной мощности пласта амплитуды краевых аномалий возрастают и могут достигать ±20 мА/м при $\Delta h_1 = H$ = 30 м. При увеличении глубины залегания верхней кромки горизонтального пласта величины амплитуд краевых аномалий интенсивно убывают и при h_1 = 10 м они уменьшаются до 0,7-2 мА/м в зависимости от мощности пласта.

1.249. Принимая во внимание вышеизложенное, можно признать возможным применение магниторазведки при мерзлотной съемке и районировании главным образом для расчленения и картирования мерзлых пород по составу и генезису. В благоприятных случаях можно использовать ее для поисков и картирования погребенных льдов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ПОЛЕВЫХ РАБОТ И ПРИЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1.250. Для решения задач геологического картирования применяются профильные и площадные съемки по общепринятой методике, основные положения которой изложены в действующей инструкции по проведению магниторазведочных работ.

1.251. При картировании льдов аномалии ΔZ и ΔT исчисляются десятками мА/м и выделение их возможно только при условии очень точной микромагнитной съемки.

1.252. Требования, предъявляемые к такой съемке: аппаратура должна обладать высоким порогом чувствительности; необходимо иметь непрерывную запись вариаций магнитного поля в районе работ и вести учет суточных вариаций.

необходимо иметь хорошо увязанную и строго закрепленную на местности опорную сеть;

для повышения точности измерений следует вести большой объем контрольных измерений;

необходимо вести учет за смещением нуль-пункта прибора;

при съемке по отдельным профилям шаг наблюдений не должен превышать 5 м;

при площадной микромагнитной съемке расстояния между пунктами наблюдения должны быть равными половине предполагаемой с глубины залегания кровли исследуемого объекта;

микромагнитная съемка должна быть обеспечена топоосновой соответствующего ей масштаба.

1.253. При полевой обработке результатов наблюдений в значения ΔZ или ΔT вводят поправки за смещение нуля и вариации магнитного поля.

1.254. Результаты наблюдений изображают в виде графиков ΔZ или ΔT по отдельным профилям или в виде карт изодин.

1.255. Интерпретация магнитных измерений может быть качественной и количественной.

1.256. При качественной интерпретации на основании исследованных магнитных свойств пород района, устанавливаются факторы, обсуловливающие характер магнитного поля, а также местоположение и простирание границ исследуемого объекта.

1.257. Количественная интерпретация магнитных аномалий может производиться как путем математических расчетов, так и при помощи специальных номограмм. При математической обработке аномалий магнитного поля определяются по формулам глубина залегания, форма и размеры геологического объекта, вызвавшего данную аномалию. Одним из таких расчетных способов при интерпретации магнитных аномалий является способ характерных точек.

1.258. Для горизонтального пласта с вертикальным намагничиванием имеем:

$$h_1 = \frac{x_0^2 - x_1^2}{2x_1};$$

$$b = \sqrt{x_1^2 - h_1^2}; \qquad (31)$$

$$J = \frac{Z_{макс}}{4\,arctg\,h/b}, \qquad (32)$$

где x_2 - абсцисса точки, в которой величина $\Delta Z = 0{,}25\Delta Z_{макс}$; x_1 - абсцисса точки, в которой величина $\Delta Z = 0$.

1.259. Для вертикального пласта с вертикальным намагничиванием имеем:

$$h_1 = \frac{1}{2x_1}\left(\sqrt{x_0^4 - x_1^4} - \sqrt{x_0^4 - x_1^4 - 4x_0^2x_1^2}\right); \qquad (33)$$

$$h_2 = 1/2x_1\left(\sqrt{x_0^4 - x_1^4} + \sqrt{x_0^4 + x_1^4 - 4x_0^2x_1^2}\right); \qquad (34)$$

$$\lambda = \frac{Z_{макс}x}{2} - \frac{h_1h_2}{h_1 - h_2}, \qquad (35)$$

где x_0 - абсцисса точки, в которой вертикальная компонента $\Delta Z = 0$; x_1 - абсцисса точки, в которой вертикальная компонента $\Delta Z = 1/2\Delta Z_{макс}$

1.260. Для получения объективного представления о преобладающем направлении осей микроаномалий при площадной микромагнитной съемке строят карты изодинам. Обрабатывая их способом касательных, строят розы направлений изодинам, которые указывают преимущественное простирание жильных тел.

1.261. При интерпретации аномалий ΔT следует пользоваться формулой пересчета поля ΔT в Z_a:

$$\Delta T = Z_a \sin J_0, \qquad (36)$$

где J_0 - угол нормального наклонения в районе работ.

1.262. Точность решения обратной задачи магнитной разведки зависит от точности выбора особых точек и многих других факторов. В условиях слабых аномалий точность определения глубины залегания возмущающих тел составляет ±50%.

2. КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕРЗЛОТНОЙ СЪЕМКИ И РАЙОНИРОВАНИЯ

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И МОЩНОСТИ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

КАРТИРОВАНИЕ БОКОВЫХ ГРАНИЦ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

2.1. По физическим предпосылкам и технико-экономическим показателям электроразведка в различных ее модификациях является наиболее рентабельным геофизическим методом картирования боковых границ мерзлых пород.

2.2. Сейсморазведка более трудоемка и может быть использована лишь для получения попутной информации о положении боковых границ при решении других задач, например при определении глубины и обводненности таликов.

2.3. Гравиразведку и магниторазведку следует отнести в данном случае к числу вспомогательных методов, ограничив область их применения уточнением общего геологического строения района работ.

2.4. Возможности электропрофилирования рассмотрены на примере работ в осложненных геоэлектрических условиях.

Пример 1. Для получения максимального количества информации о распространении и строении мерзлых пород в районе было выполнено непрерывное двустороннее дипольное ЭП МДС с шагом 10 м, результаты которого приведены на рис. 24.

Качественная интерпретация графиков $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_n/J$ позволяет установить, что мерзлые породы фиксируются аномалиями большой амплитуды, которые по форме и положению экстремумов соответствуют горизонтальному пласту (пк 10), ограниченному с одной стороны, и вертикальному контакту (пк 5).

Уровень нормального поля на графиках $\Delta U_t/J(\rho_к)$ существенно понижается (до 500 - 1500 Ом·м) над талыми породами. На его фоне формируются небольшие по амплитуде аномалии, относящиеся к высокоомным (пк 20-15) и низкоомным (пк 15-10) пластам средней мощности.

Количественная интерпретация выделенных аномалий производится с помощью специальных номограмм. Результаты интерпретации данных ЭП МДС приведены в табл. 10.

2.5. Метод ВЭЗ был привлечен для мерзлотно-геологической привязки аномалий ЭП МДС в связи с тем, что предположительно талые породы выделились на графиках ЭП сравнительно высокими значениями $\Delta U_t/J(\rho_к)$. Ожидая по данным ЭП МДС сложные геоэлектрические условия, ВЭЗ выполнялись двусторонней трехэлектродной установкой МДС. Типичные кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС, полученные над талыми и мерзлыми породами, представлены на рис. 25. Последовательность интерпретации рассмотрим в примере 2.

Пример 2. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ МДС № 54 и 58 позволяет установить, что в области развития талых пород геоэлектрический массив имеет многослойное строение с пологим падением границ слоев относительно земной поверхности. УЭС слоев преимущественно уменьшается с глубиной, формируя сложный геоэлектрический массив вида $QHKQ$ с неявным элементом НК.

Таблица 10

№ пикета	Тип аномалий	$\Delta U_n/\Delta U_t$	A_n/A_t	$A_t^{мин}/A_t^{макс}$	φ^0	α^0	h, м
20-15	Высокоомный пласт средней мощности	0,1	0,15	-	110	90	3,5
9	Наклонный пласт высокого сопротивления и малой мощности	0,185	0,19	0	103	0	0-1,5
6-5	Вертикальный контакт двух сред	-0,17	-0,35		135	90	12-14

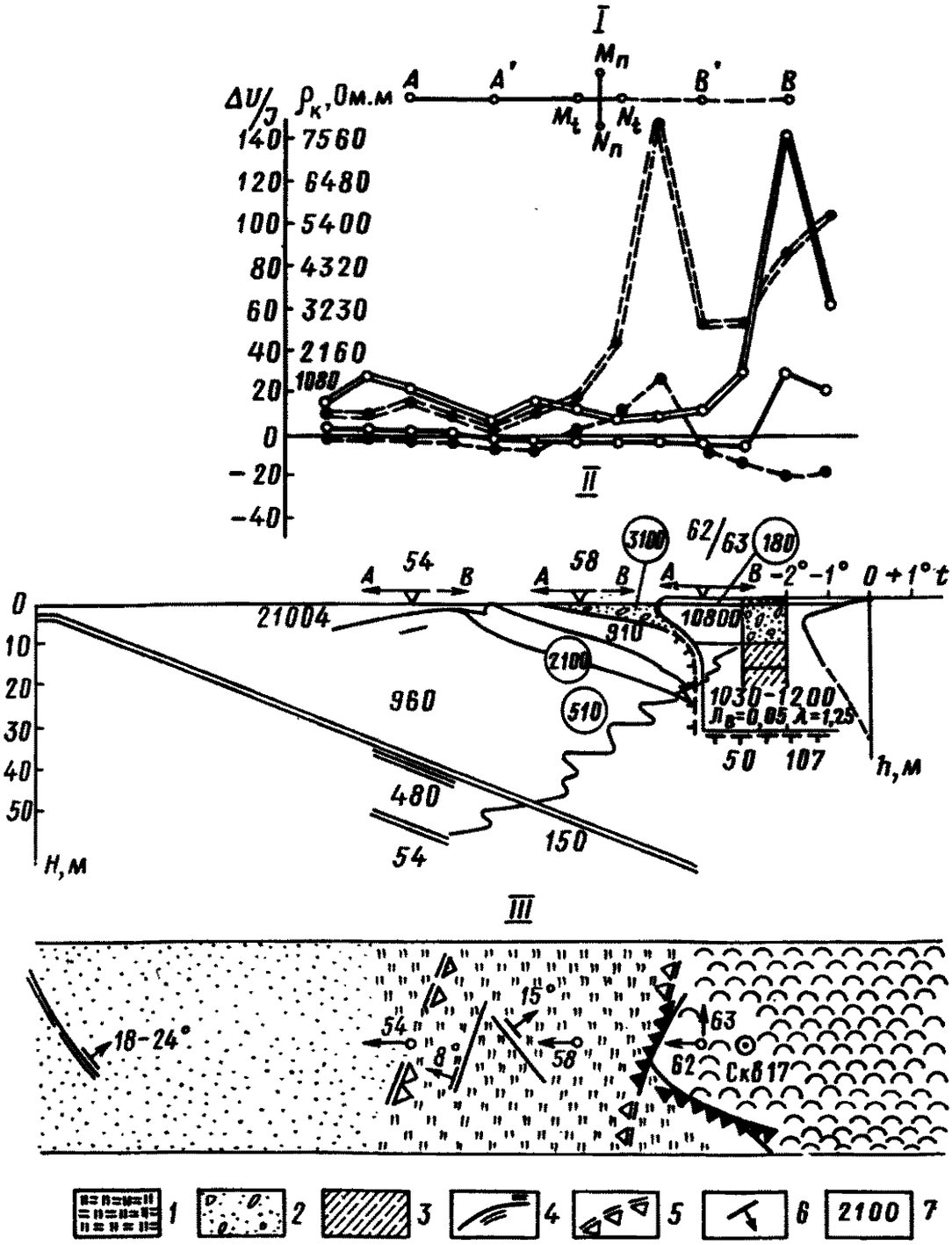


Рис. 24. Результаты непрерывного двустороннего дипольного ЭП МДС и ВЭЗ МДС над контактом талых и мерзлых пород

I - график непрерывного дипольного ЭП МДС; II - геоэлектрический разрез; III - простирание геоэлектрических границ - 1 - торфяник; 2 - песок с гравием и галькой; 3 - супесь; 4 - геоэлектрические границы и глубины залегания по данным интерпретаций кривых единичных ВЭЗ МДС; 5 - боковые границы мерзлоты по данным ЭП МДС и ВЭЗ МДС; 6 - простирание и истинный угол падения геоэлектрических границ; 7 - УЭС пород в пределах геоэлектрического горизонта

Количественная интерпретация производится по особым точкам на кривых $\rho_к$ и $\Delta u_н/\Delta u_t$ для секущей и удаляющейся установок с применением специальных номограмм. Результаты интерпретации приводятся ниже.

ВЭЗ 54. СГМQНК (II-ДС - δ -1 "-") Q(II-ДС-δ-1 "-").

Строение по вертикали:

h_1 =3; h_2 =2,7; h_3+h_4 =15; h_5 =18; $h_6=\infty$

ρ_1 =2100; ρ_2 =1450; ρ_3 =227; ρ_4 =15000/?/; ρ_5 =530; ρ_6 =230.

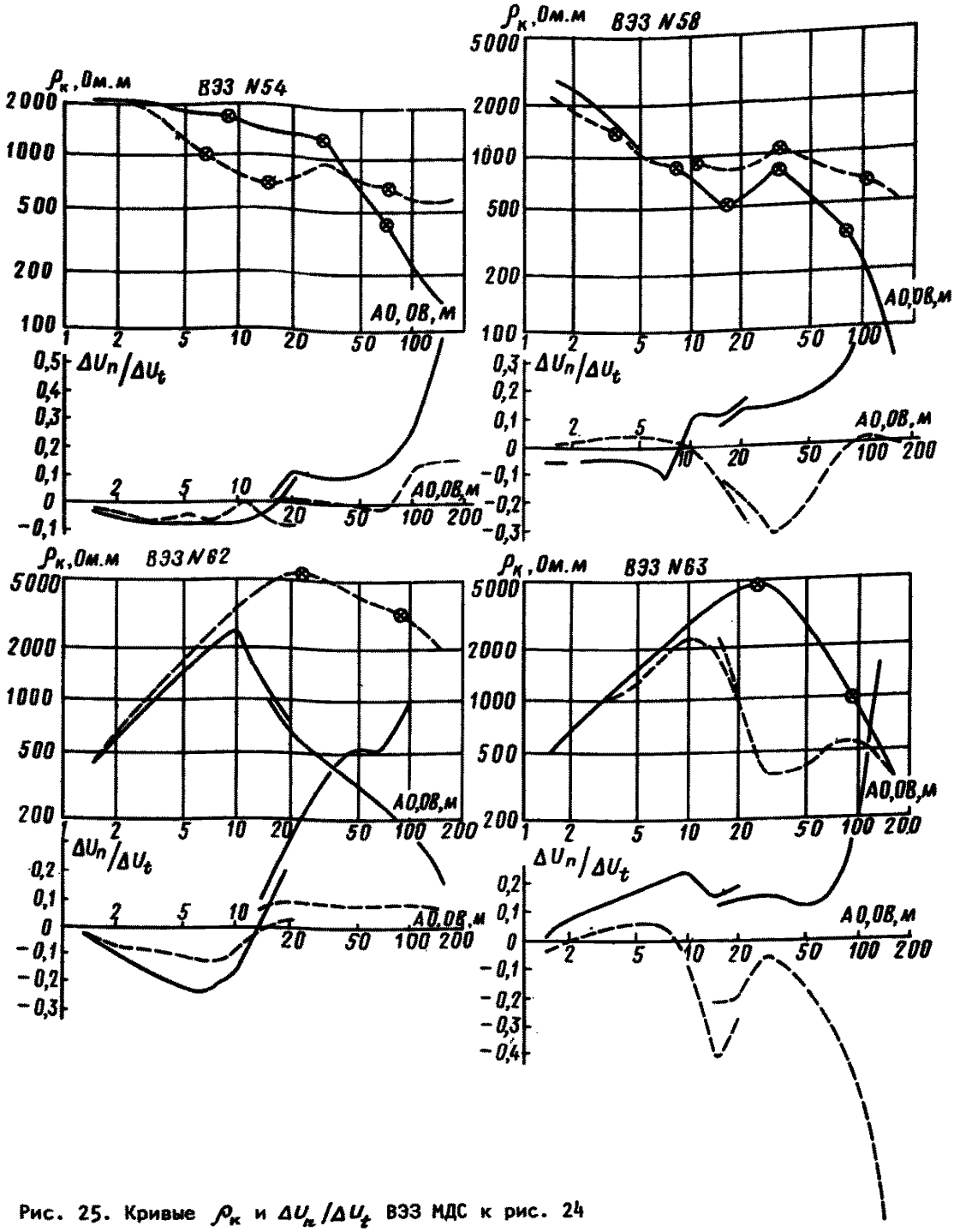


Рис. 25. Кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС к рис. 24

Здесь и далее h приводится в м, а ρ – в Ом·м.

Элементы залегания первой от поверхности границы (ЭГМ II-ДС-б-1 "–")

H =3 м; h_0 =0,75 м; φ = 106°; α =8°.

Элементы залегания пятой от поверхности геоэлектрической границы (ЭГМ II-ДС-б-1 "–"):

H_2 =21 м; h_0 =4,9 м; φ =55°; α =11°.

ВЭЗ 58. СГМQ (П-ДС-б-1 "–") НКQ.

Строение по вертикали:

h_1=1; h_2 =6,25; h_3+h_4 =7,5; h_5 =33,5; h_6 = ∞.

ρ_1 =3100; ρ_2 =910; ρ_3 =50; ρ_4 =24000; ρ_5 =510; ρ_6 =150.

Элементы залегания третьей от поверхности границы (ЭГМ II-ДС-б-1 "–"):

H =7,25 м; h_0 =2,9 м; φ =48°; α =18°.

Элементы залегания пятой от поверхности границы:
H =15 м; h_0 =0 м; φ =60°; α =6°.

Геологическая привязка геоэлектрических горизонтов не вызывает затруднений. Первые от поверхности четыре горизонта сложены крупнозернистыми и среднезернистыми талыми песками, влажность которых увеличивается с глубиной.

Ниже залегают мелкозернистые пылеватые пески и супеси. Повышение значений на графиках $\frac{\Delta U_t}{J}(\rho_к)$ ЭП МДС наблюдается там, где мощность крупнозернистых песков возрастает. Простирание границ таких участков устанавливается по данным ЭП и ВЭЗ МДС с точностью до ±5°.

Над мерзлой толщей характер геоэлектрического разреза меняется.

На кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ крестовых ВЭЗ МДС № 62 и 63 (см.рис.25) формируются аномалии, соответствующие четырехслойному строению среды вида KQ с крутопадающим контактом на расстоянии 10 м от центра зондирования.

Количественная интерпретация кривых $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС, выполненная по особым точкам с помощью соответствующих номограмм, дает следующее:

ВЭЗ № 62 СГМ (1-ДС-б-1 "+") KQ.

Строение по вертикали:
h_1 =0,6; h_2 =10,9; h_3 =27,5; h_4 = ∞
ρ_1 =180; ρ_2 =18000; ρ_3 =2800; ρ_4 =700.

Элементы залегания вертикального контакта (ЭГМ 1-ДС-б-1 "+"):
h_1=0,6 м; d =10 м; φ =112°; α =90°.

ВЭЗ №63 СГМ (1-ДС-б-1 "+") KQ.

Строение по вертикали:
h_1=0,6; h_2 =9,6; h_3 =21,6; h_4 = ∞
ρ_1=180; ρ_2 =18 000; ρ_3=1030; ρ_4 =50.

Элементы залегания ступени: h_1 =0,6 м; Δh > 6 м; d =10 м; φ =112°.

Мерзлотно-геологическая привязка выделенных геоэлектрических горизонтов достаточно однозначна. Первый слой с ρ_1 =180 Ом·м представлен талым торфом.

Пользуясь номограммой, приведенной на рис.2, можно установить, что второй горизонт с ρ_2 =18 000 Ом·м сложен либо мерзлыми песками с массивной криогенной текстурой и температурой около -2°С, либо пылеватыми песками или супесями с температурой ниже -4°С, что не характерно для района работ, и правильным следует признать первый вариант, хорошо согласующийся с результатами, полученными над талыми породами. Третий горизонт с ρ_3 = 1030-2800 Ом·м может соответствовать мерзлым пылеватым пескам, температура которых меняется от 0 до -1°С. Четвертый горизонт с УЭС около 50-700 Ом·м следует отнести к талым супесям или пескам. Нижняя граница мерзлоты залегает на глубине 32-39 м; ее боковые границы находятся в 10 м от центра ВЭЗ и простираются под углом 112° по отношению к направлению разносов питающих электродов основного и крестового ВЭЗ. Полученная информация хорошо согласуется с данными бурения, термометрии (скважина 17) и мерзлотного микрорайонирования территории.

2.6. При картировании мерзлых пород сейсморазведку можно применять только как вспомогательный метод, поскольку определение положения вертикальных и крутопадающих границ возможно лишь по косвенным признакам (изменение волновой картины, значений скоростей и глубины преломляющих границ).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРОЕНИЯ, СОСТАВА И МОЩНОСТИ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

2.7. Наиболее полно и практически в любых условиях эта задача решается с помощью ВЭЗ и комплексного каротажа скважин. Остальные методы могут быть привлечены в качестве вспомогательных, при наличии благоприятных физико-технических предпосылок.

2.8. В случае простых геоэлектрических условий применяется ВЭЗ КС.

2.9. Центр ВЭЗ необходимо располагать на местности так, чтобы избежать искажающего влияния боковых границ мерзлой толщи, для чего следует широко применять данные ЭП и микрорайонирования.

2.10. Расстояние между соседними точками ВЭЗ выбирают чтобы проследить нижнюю границу мерзлоты. Обычно расстояние между точками ВЭЗ берется в 2-3 раза большим предполагаемой мощности мерзлоты.

Возможности применения ВЭЗ КС покажем на примере, который относится к мерзлой толще, сложенной преимущественно скальными осадочными и изверженными породами.

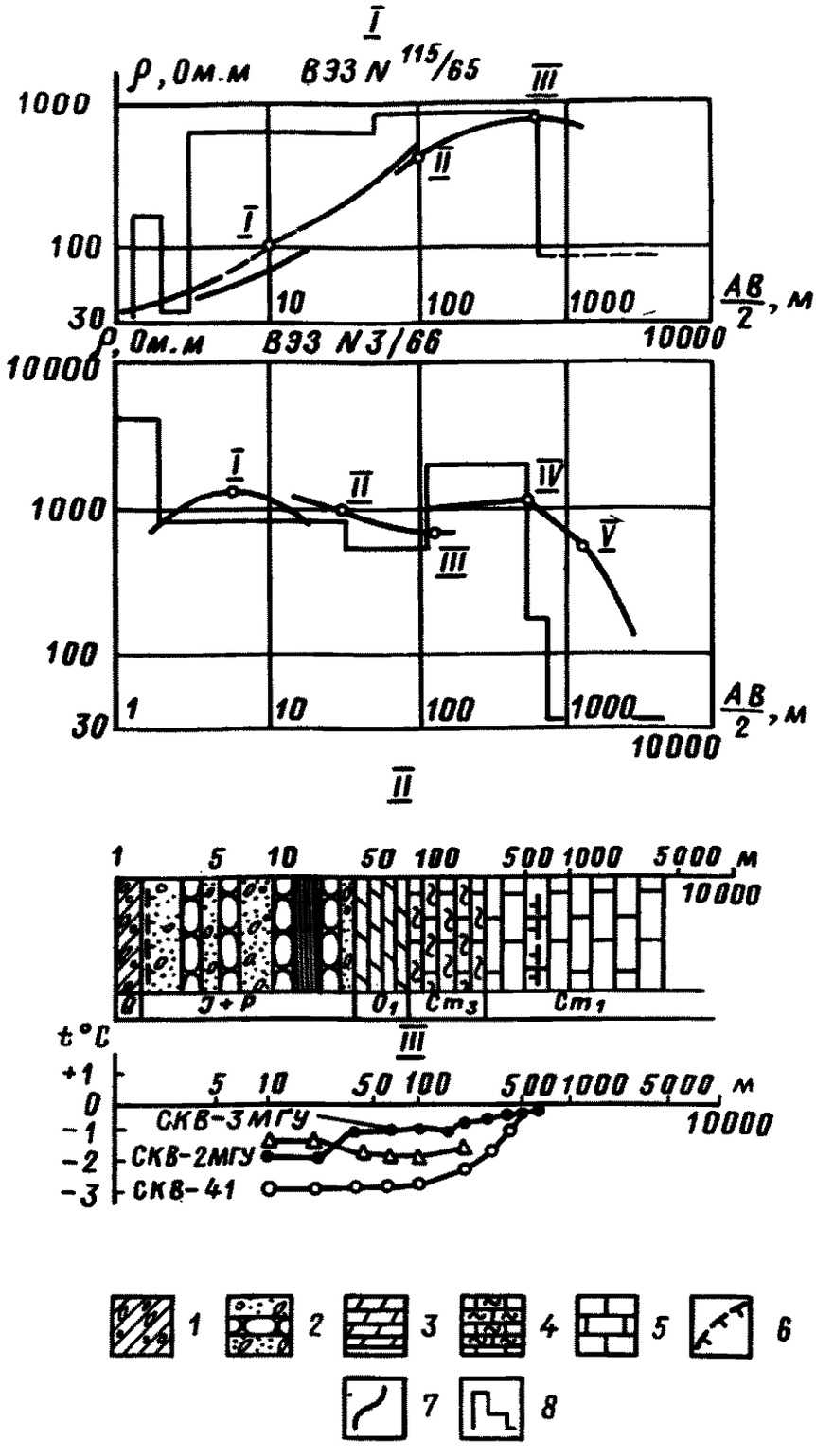


Рис. 26. Кривые $\rho_к$ ВЭЗ над разрезом с мерзлыми скальными породами

I - геологический разрез в районе ВЭЗ №115/65 и 3/66; II - температурные кривые; 1 - четвертичные щебенисто-суглинистые отложения; 2 - терригенные отложения юрского и пермского возраста; 3 - мергели нижнего ордовика; 4 - известняки верхнего кембрия; 5 - доломиты нижнего кембрия; 6 - верхняя и нижняя границы мерзлоты 7 - кривые ВЭЗ; 8 - график изменения УЭС пород с глубиной по данным интерпретации кривых $\rho_к$ ВЭЗ

Пример 3 (рис. 26). На рисунке представлены кривые $\rho_к$ ВЭЗ, полученные в одном пункте наблюдений до и после удаления рыхлых отложений. Количественная интерпретация кривых, выполненная по координатам особых точек дает следующие результаты:

ВЭЗ 115/65. СГМ ААК (до удаления рыхлых отложений):

h_1=1,5; h_2=6; h_3=45; h_4=760; $h_5 = \infty$;
ρ_1=35; ρ_2=140; ρ_3=685; ρ_4=840; ρ_5=90.

ВЭЗ 3/66. СГМ КОКО (после удаления рыхлых отложений):

h_1=0,45; h_2=1,7; h_3=30; h_4=79; h_5=404;
ρ_1=245; ρ_2=4680; ρ_3=850; ρ_4=540; ρ_5=1890;
h_6=158; $h_7 = \infty$ (м);
ρ_6=190; ρ_7=70 (Ом·м).

Сопоставляя данные интерпретации ВЭЗ с данными бурения и термометрии расположенных рядом скважин, убеждаемся, что подошва мерзлой толщи определена по данным интерпретации ВЭЗ 3/66 с ошибкой -4% и ВЭЗ 115/65 - с ошибкой +15%. Промежуточные геоэлектрические границы хорошо совпали с контактами различных литолого-стратиграфических горизонтов. Детальность и точность расчленения разреза, по данным интерпретации ВЭЗ, возросла после удаления из разреза низкоомного экрана, каковым являлся талый слой в четвертичных отложениях.

2.11. Для определения строения, состава и мощности мерзлой толщи в сложных геоэлектрических условиях необходимо использовать ВЭЗ МДС двусторонними трехэлектродными или дипольными установками.

2.12. Точки ВЭЗ намечаются по данным ЭП или микрорайонирования.

2.13. Точки ВЭЗ располагают вблизи крутопадающих контактов с тем, чтобы можно было определить элементы залегания последних и учесть их влияние при оценке мощностей и УЭС горизонтально залегающих слоев. Типичный пример, относящийся к такому случаю, рассмотрен в пп. 2.4. и 2.5.

2.14. Состав методов, входящих в комплексный каротаж мерзлых скважин, и круг решаемых с их помощью задач во многом зависит от назначения скважин, способа их проходки, конструкции и состояния их на момент измерений.

2.15. Основную группу составляют мелкие инженерно-геологические скважины, проходка которых осуществляется сухим способом. Они, как правило, вскрывают только верхнюю часть мерзлой толщи и длительное время остаются сухими, если приняты меры против проникания в них поверхностных и подмерзлотных вод. В таких скважинах целесообразно проводить ЭК КС, АК и термометрию, с целью уточнения состава, строения и льдистости верхней части мерзлой толщи, а также для определения различных инженерно-геологических характеристик мерзлых пород в коренном залегании.

2.16. Во вторую группу входят глубокие разведочные и промысловые скважины. Они, как правило, вскрывают всю мерзлую толщу. Эти скважины имеют большой диаметр в верхней части разреза и проходятся с буровым раствором, т.е. обводнены и отеплены.

2.17. Геофизические исследования в таких скважинах имеют своей целью решение специальных задач, которые и определяют состав применяемых методов, конструкции и размеры зондов, масштаб и скорость записи результатов наблюдений, местоположение и длину обследуемых интервалов.

2.18. Определение состава, строения и мощности мерзлых толщ относится в этих случаях к второстепенным задачам, поэтому в промысловых скважинах обычно проводят каротаж КС, термометрию, иногда резистивиметрию и ПС.

2.19. При интерпретации данных каротажа промысловых скважин следует иметь в виду, что на значения $\rho_к$ может оказывать влияние слой пород, растепленных в процессе бурения скважин. Это влияние велико в верхней части разреза мерзлой толщи, для которой характерны наиболее низкие температуры. Оно ослабевает по мере приближения к ее подошве. Учитывая большие размеры зондов, можно принять, что получаемые в нижней части мерзлой толщи значения $\rho_к$ близки к истинным УЭС пород.

2.20. Применение резистивиметрии и каротажа ПС позволяет надежно выделить интервалы глубин, на которых скважина прошла водоносные горизонты. На диаграммах $\rho_к$ или термограммах - им будут соответствовать аномалии, характерные для талых пород или для обширных каверн.

2.21. Таким образом, все материалы промыслово-геофизических исследований должны рассматриваться в комплексе, так как только тогда можно уверенно установить состав пород и распространение вечномерзлых пород по разрезу с точностью до ±3-10 м.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ПРЕДЕЛАХ АКВАТОРИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕБОЛЬШИХ АКВАТОРИЙ

2.22. К их числу относятся заполненные водой термокарстовые понижения, озера и русла рек, занимающие значительные площади в лесотундровых и тундровых районах. Для них характерны небольшие глубины (0-5 м) и поперечные размеры (10-500 м), разобщенность и разбросанность. В таких условиях наиболее доступными и технико-экономически обоснованными являются ЭП и ВЭЗ КС в донном варианте.

2.23. ЭП КС применяется для картирования боковых границ мерзлоты в достаточно широких и протяженных водоемах (100x200 м и более).

2.24. В качестве измерительных установок рекомендуется применять симметричные, двусторонние трехэлектродные или дипольные установки, которые следует собирать в косы.

2.25. Размеры установок подбирают таким образом, чтобы можно было пренебречь влиянием водного слоя на результаты ЭП.

2.26. Профили рекомендуется располагать на расстоянии от 50 до 200 м друг от друга по направлению малой оси водоема.

2.27. Измерения по профилю следует вести в виде непрерывного профилирования.

2.28. К точечному профилированию следует прибегать, когда проведение непрерывного профилирования становится невозможным по техническим причинам.

2.29. Результаты наблюдений изображают в виде графиков $\rho_к$ по профилям и схем корреляции геоэлектрических границ по площади.

2.30. Построение карт равных сопротивлений нецелесообразно из-за большого искажающего влияния переменной мощности водного слоя.

2.31. Интерпретация данных ЭП КС заключается в выделении и прослеживании по профилям однотипных аномалий $\rho_к$, связанных с контактами мерзлых и талых пород различного состава. Основное внимание следует обращать на тип аномалий на графике $\rho_к$, а не на абсолютные значения последних.

2.32. Положение границ в разрезе определяются по экстремумам в области основных аномалий с точностью до $\pm MN$.

2.33. Донные вертикальные зондирования (ДЗ) используются для определения состава и мощности талых и мерзлых пород. Во всех случаях, когда для этого есть возможность, измерения следует проводить двусторонними трехэлектродными или дипольными установками, чтобы получить дополнительную информацию о форме и местоположении боковых границ мерзлоты и учесть их влияние. Для иллюстрации основных положений методики проведения ДЗ и приемов интерпретации кривых $\rho_к$ рассмотрим результаты работ на одном из озер.

Пример 4. Измерения выполнялись двусторонними трехэлектродными ВЭЗ с АО-ОВ = 150 м. Установка ДЗ была собрана в виде косы, которая перемещалась по дну. Учитывая большие размеры озера (300x500 м), наблюдения велись по сети 50x70 м (рис. 27, I и II). На каждой стоянке определялись глубина водоема, распределение УЭС воды по глубине с помощью оттарированного резистивиметра. Типичные кривые двусторонних трехэлектродных ДЗ приведены на рис. 28.

Интерпретация кривых ДЗ велась в два этапа.

На первом этапе по внешнему виду аномалий на кривых ДЗ устанавливались количество и последовательность залегания горизонтальных слоев в разрезе, форма и местоположение по профилю наклонных контактов.

На втором этапе проводилась количественная интерпретация кривых $\rho_к$ ДЗ. По палеткам для донных ВЭЗ находили УЭС и мощность первого от дна водоема геоэлектрического горизонта, а также оценивали степень влияния водного слоя на характер аномалии на больших разносах питающих электродов. В рассмотренном случае влиянием водного слоя оказалось возможным пренебречь из-за высоких значений УЭС воды (более 1000 Ом·м) и проинтерпретировать средние и правые ветви $\rho_к$ ДЗ по правилам для наземных ВЭЗ. Интерпретация проводилась по координатам особых точек с помощью специальных номограмм.

ДЗ 22. Среда имеет двухслойное строение (здесь и далее водный слой не принимается во внимание). В кровле второго горизонта присутствуют наклонный контакт на расстоянии 3 м от центра ДЗ по направлению разносов АО и узкий грабен на расстоянии 50-70 м также по направлению АО. Строение массива может быть записано формулой: СГМ (I-ДС-б-1''+'' + I-ДС-г-1''+''). Интерпретация кривой $\rho_к$ для удаляющейся установки ОВ дает:

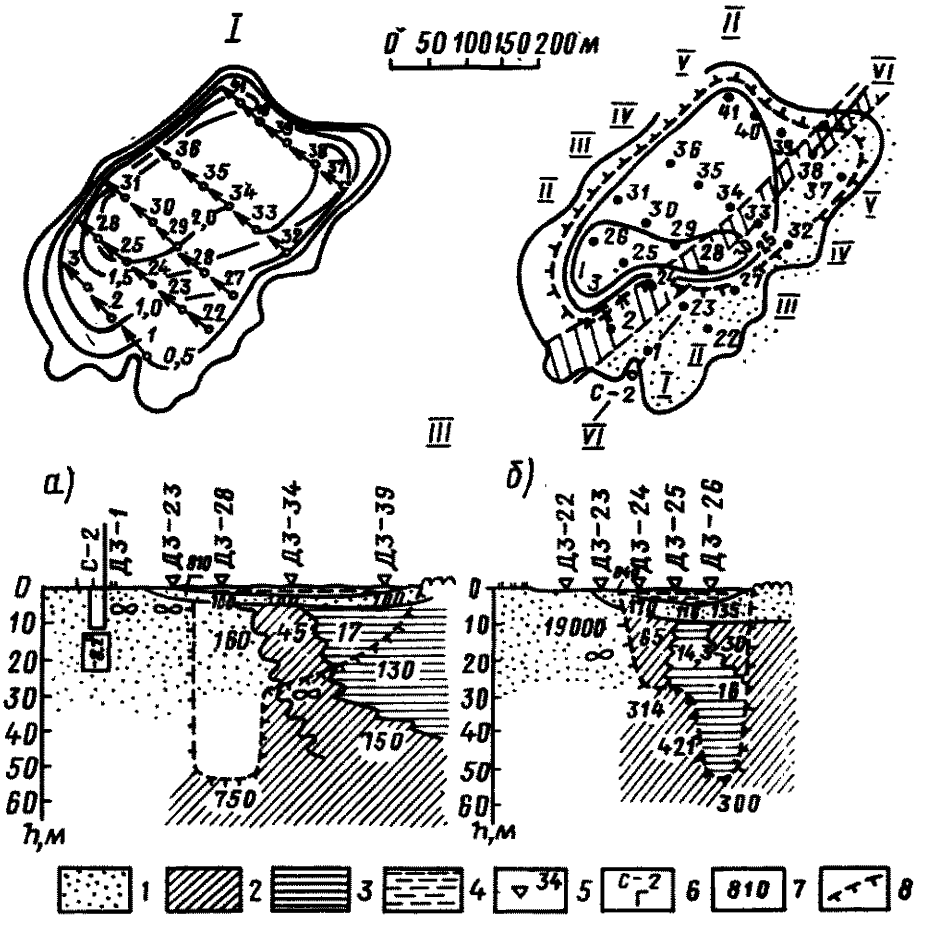


Рис. 27. Результаты донного зондирования
1 - карта глубин озера; II - карта глубин залегания кровли мерзлых пород под озером; III - геоэлектрические разрезы по профилям VI-VI и II-II; 1 - песок; 2 - суглинок; 3 - глина; 4 - вода; 5 - пункты ДЗ; 6 - скважины; 7 - величины УЭС; 8 - граница мерзлых и талых пород

h_0=0,55; h_1=0,55; $h_2=\infty$;
ρ_0=1200; ρ_1=190; ρ_2=19 000.

С помощью номограмм для наклонного контакта находим, что видимый угол падения высокоомного горизонта равен 1°.

ДЗ 25. Массив под центром зондирования имеет трехслойное строение со встречным падением кровли высокоомного опорного горизонта, которая образует стуктуру типа грабена или воронки СГМ Q_{III}^{H} (I-ДС-г-1 "-").

Интерпретации подвергаются обе кривые ρ_K, для чего используются номограммы для горизонтально-слоистой среды и палетка ЦС-2-1 для определения глубины грабена. Строение массива под центром ДЗ вычисляется, как среднее арифметическое между результатами интерпретации правой и левой кривых ρ_K ДЗ:

h_0=3,8; h_1=1; h_2=5,3; h_3=49,8; $h_4=\infty$;
ρ_0=1000; ρ_1=210; ρ_2=116; ρ_3=14,3; ρ_4=421.

По данным интерпретации построены геоэлектрические разрезы по профилям (см. рис. 27, III). На основании имеющихся зависимостей УЭС пород от состава, строения и температуры, льдистости и криогенной текстуры можно дать следующую мерзлотно-геологическую привязку геоэлектрическим горизонтам. Первые два от дна горизонта прослеживаются повсеместно и представлены талым слаборазложившимся торфом (200-400 Ом·м) и крупнозернистыми влагонасыщенными песками (100-170 Ом·м). Третий геоэлектрический горизонт неоднороден по составу и сложен талыми песками (160 Ом·м), супесями и суглинками (65-30 Ом·м), фациально замещающими друг друга по простиранию. Четвертый высокоомный горизонт прослеживается повсеместно и связан с мерзлыми породами. По величинам УЭС выделяются

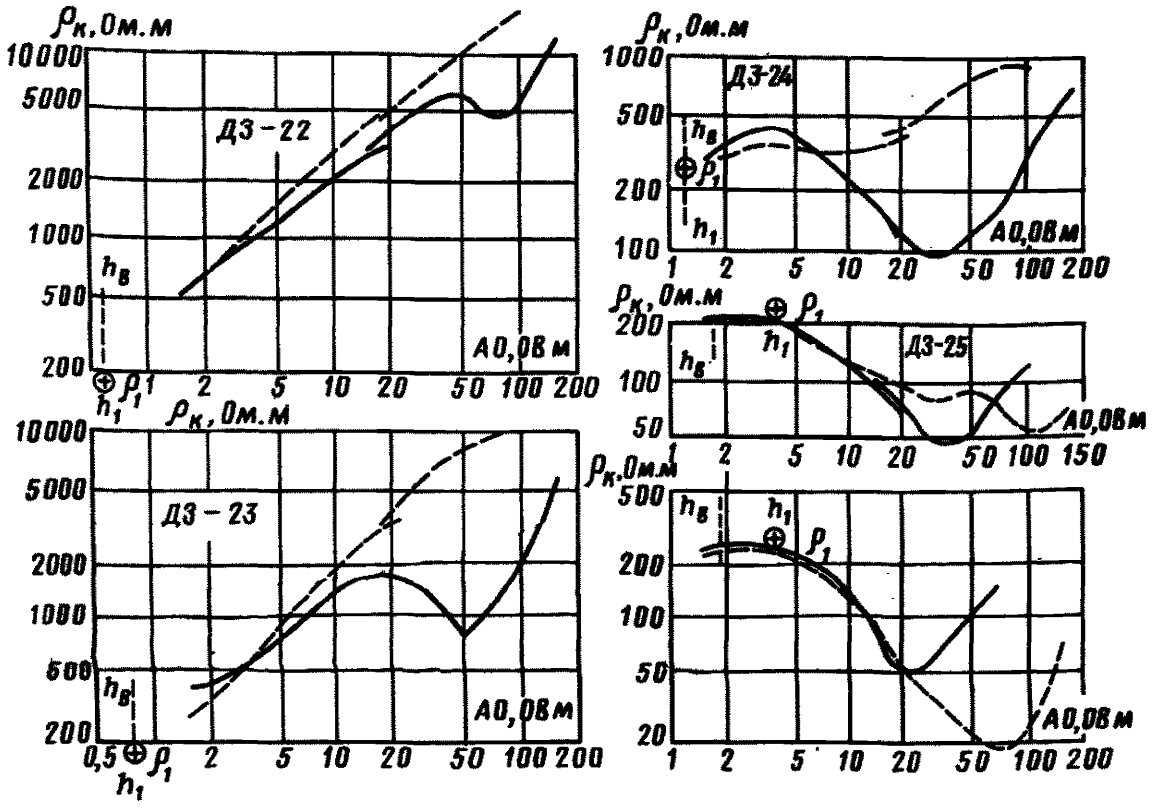


Рис. 28. Кривые $\rho_к$ донных зондирований

мерзлые крупнозернистые пески с массивной криогенной текстурой и температурой около $-4°C$ (19 000 - 31 000 Ом·м), мерзлые супеси со шлировой криогенной текстурой и льдистостью около 0,05 (750 Ом·м), мерзлые суглинки и глины со шлировой криогенной текстурой и льдистостью от 0,05 до 0,3 (130-421 Ом·м).

На основании геоэлектрических разрезов составлены карты глубин залегания дна озера (см. рис. 27, I), верхней границы мерзлоты (см. рис. 27, II) и границ фациального замещения пород. Результаты электроразведочных работ соответствуют мерзлотной обстановке в окрестностях озера и представлениям о формировании подозерных таликов.

ИЗУЧЕНИЕ КРУПНЫХ ВОДОЕМОВ

2.34. Наиболее универсальными способами изучения состава, строения и состояния пород в пределах акваторий являются геозвуколокация и ВЭЗ в надводном или донном вариантах.

2.35. Методика измерений, аппаратура и приемы интерпретации результатов наблюдений принципиально не зависят от того, в пределах каких пород располагается изучаемая акватория.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ, МОЩНОСТИ И ОБВОДНЕННОСТИ ТАЛИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКИХ ТАЛИКОВ

2.36. К широким относятся талики, поперечные размеры которых значительно в (5-10 раз) превосходят их глубину. Мерзлотно-геологические условия в пределах таких таликов обычно выдержаны и для их исследования целесообразно использовать комплекс геофизических методов, включающий ЭП КС, ВЭЗ КС и наземную сейсморазведку.

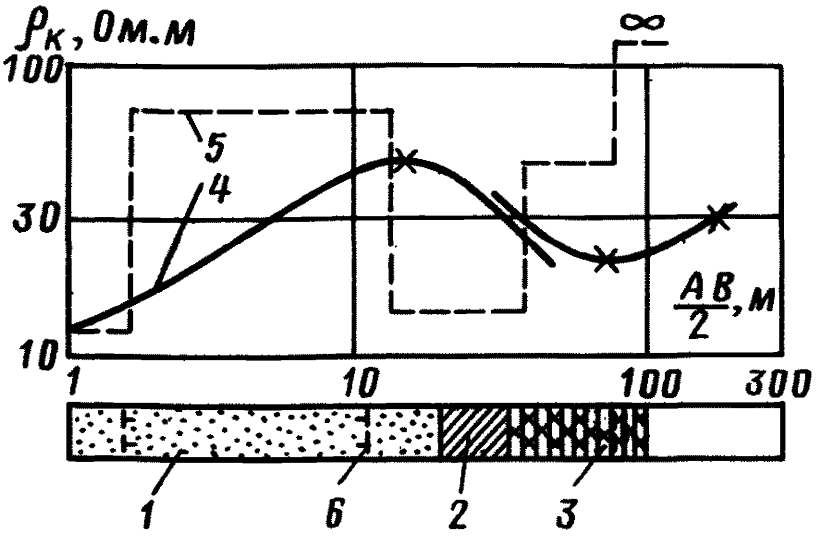


Рис. 29. Кривая $\rho_к$ ВЭЗ над новообразованием мерзлоты в талых породах (по В.Б. Пугачу)
1 - пески; 2 - суглинки с гравием; 3 - юрские аргиллиты и песчаники; 4 - кривая $\rho_к$ ВЭЗ и особые точки на ней; 5 - диаграмма УЭС, полученная по данным интерпретации кривой ВЭЗ КС; 6 - граница мерзлоты

2.37. ЭП КС применяется для картирования боковых границ таликов и островов мерзлоты, возникающих при современном промерзании пород. Поскольку геоэлектрические условия в окрестностях таликов могут быть отнесены к простым или осложненным, измерения следует производить симметричными или дипольными установками в непрерывном варианте. Методика полевых работ, приемы интерпретации и изображения ее результатов остаются теми же, что при картировании боковых границ мерзлых пород.

2.38. ВЭЗ КС имеют своей целью определение глубины талика, состава и условий залегания слагающих его пород. Точки ВЭЗ размещаются на местности с учетом данных ЭП КС так, чтобы свести к минимуму влияние границ талика и участков с современным промерзанием. Измерения производятся симметричной установкой, максимальные разносы питающей линии которой не должны превосходить поперечные размеры талика. Кривые $\rho_к$ ВЭЗ подвергаются количественной интерпретации методом подбора теоретических кривых, если известны геоэлектрические параметры промежуточных горизонтов, или методом особых точек с применением специальных номограмм. Результаты интерпретации изображаются в виде геоэлектрических разрезов и карт глубин залегания кровли мерзлоты подошвы талика .

Пример 5 (рис. 29). Кривая $\rho_к$ ВЭЗ относится к талику, сложенному четвертичными песками и суглинками с включением гравия и гальки, а ниже - юрскими аргиллитами и песчаниками. Скважина вскрыла талик глубиной 78 м, в верхней части которого отмечен горизонт новообразовавшихся мерзлых пород мощностью около 10 м.

Интерпретация этой кривой ВЭЗ методом особых точек дает следующий результат:

$h_1=1,2$; $h_2=10,8$; $h_3=32,5$; $h_4=29$; $h_5=\infty$,
$\rho_1=12$; $\rho_2=72$; $\rho_3=12$; $\rho_4=22$; $\rho_5=\infty$.

Выделенным геоэлектрическим горизонтам может быть дана следующая мерзлотно-геологическая привязка. Первый от поверхности слой соответствует талым породам. Второй горизонт представлен мерзлыми засоленными песками, если судить по низким значениям УЭС. Третий слой представлен теми же породами, но талыми. Четвертый горизонт относится к талым юрским песчаникам и аргиллитам, возможно обводненным. Опорный горизонт сложен мерзлыми юрскими породами. Нижняя граница мерзлоты залегает на глубине 73,5 м, что совпадает с результатами бурения.

2.39. Наземная сейсморазведка позволяет получить информацию об обводненности пород и глубине залегания уровня грунтовых вод. Это ставит ее в ряд основных геофизических методов при изучении широких таликов. Наиболее балагопри-

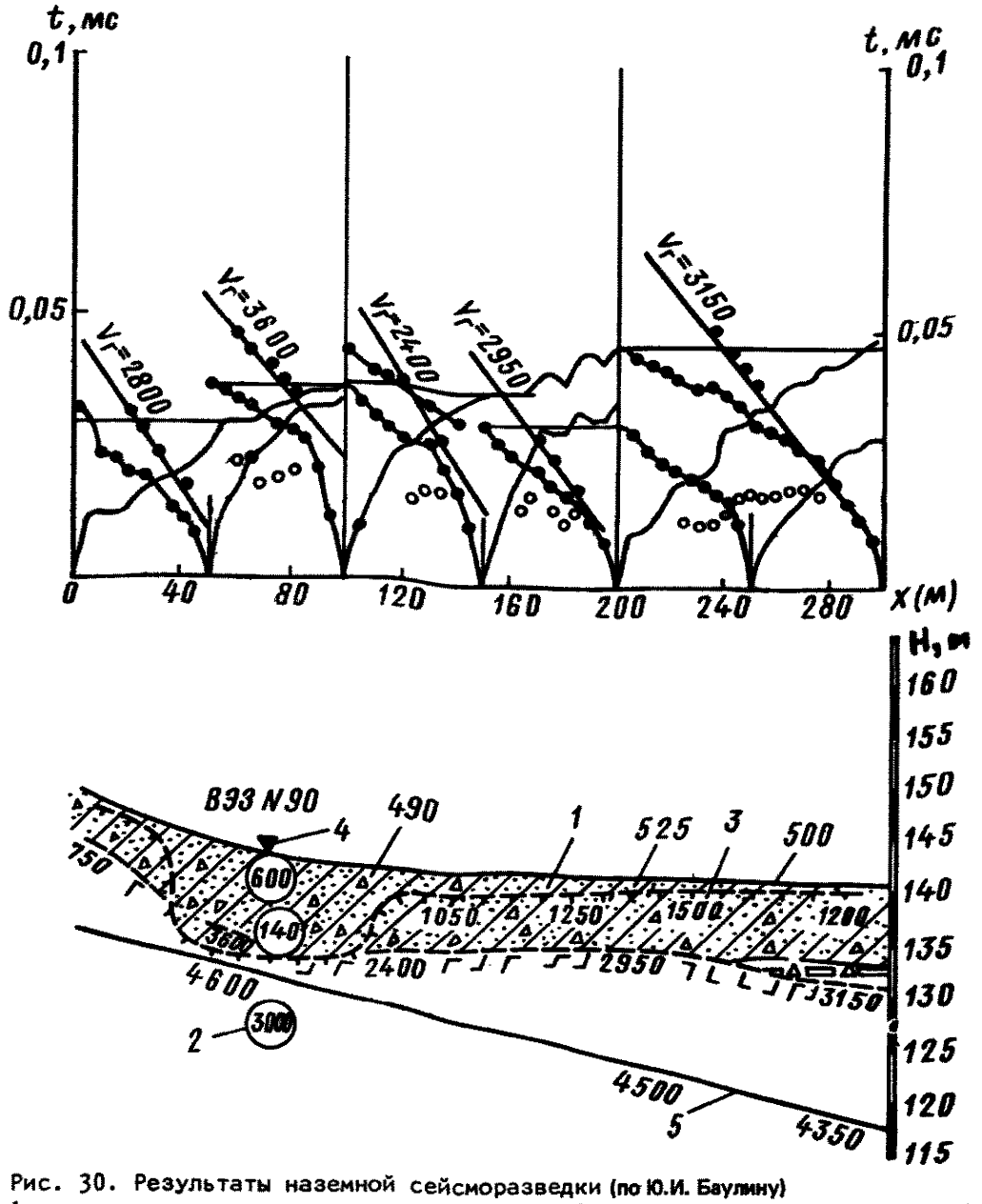


Рис. 30. Результаты наземной сейсморазведки (по Ю.И. Баулину)
1 - песчано-галечниковые отложения; 2 - УЭС пород по данным интерпретации ВЭЗ; 3 - границы мерзлоты; 4 - точки ВЭЗ; 5 - скоростная граница

ятны для применения сейсморазведки случаи, когда в верхней части разреза отсутствует слой современного промерзания.

Пример 6 (рис.30). Работы проводились корреляционным методом преломленных волн (КМПВ) с получением систем встречных и нагоняющих годографов. Возбуждение осуществлялось ударным способом по методике продольного профилирования $z - z$ (вертикальный удар - вертикальный прием). В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась модернизированная одноканальная сейсмическая установка ОСУ-1.

Первый (предварительный) этап интерпретации состоял из анализа волновой картины, корреляции зарегистрированных однотипных волн и построения годографов. В первых вступлениях прослеживается прямая волна, проходящая по слою сезонного протаивания. Она четко видна вблизи пункта возбуждения и быстро затухает по мере удаления от него. Затем ее сменяет волна, преломленная на кровле мерзлых пород. По ее годографу находят скорость распространения продольных волн в верхней части мерзлой толщи. В последующих вступлениях регистрируется обменная волна типа PSP, которая характеризуется бóльшей интенсивностью по сравнению с упоминавшимися ранее волнами. Используется она для определения

скорости распространения продольных волн в верхнем слое мерзлых пород. Годографы продольных волн приведены на рис. 31.

Второй (основной) этап интерпретации заключается в расчете по годографам глубины залегания сейсмических границ и скоростей распространения продольных волн в верхней части разреза. Интерпретация проводится методом t_0 и разностного годографа.

В результате интерпретации выделены два различных в сейсмическом отношении участка. На одном из них между пикетами 100 и 300 присутствуют в разрезе две скоростные границы. Верхний слой со скоростями 500-660 м/с соответствует сезонно-талому слою в песчано-глинистых отложениях. Первая от поверхности граница со скоростью $V_г$=1200 м/с связана с кровлей мерзлых пород, которые, судя по небольшим значениям скоростей, представлены теми же песчано-глинистыми отложениями с малой льдистостью и температурой, близкой к 0°С. Вторая граница с $V_г$ =2400-3200 м/с отвечает кровле сильновыветрелых мерзлых скальных пород.

На участке между пикетами 50 и 100 в разрезе присутствует лишь одна скоростная граница, которая связана с кровлей мерзлых скальных пород, о чем свидетельствуют большие значения граничной скорости $V_г$ =3800-4000 м/с. Граница располагается на глубине около 10 м. Сравнительно небольшие значения скоростей в верхней части разреза указывают на то, что здесь распространены талые песчано-глинистые отложения, далекие от полного влагонасыщения. Боковые границы талика устанавливаются довольно приблизительно по данным сейсморазведки. Точнее эта задача решается с помощью ЭП КС или МДС.

ИЗУЧЕНИЕ УЗКИХ ТАЛИКОВ

2.40. Условимся считать талики узкими, если их поперечные размеры превосходят глубину не более чем в 2-3 раза. По геоэлектрическим условиям узкие талики относятся, как правило, к категории сложных, поскольку имеют сложную конфигурацию в плане; поэтому ЭП МДС и ВЭЗ МДС наиболее эффективны при картировании узких таликов и определении их глубины.

2.41. ЭП МДС производится с целью картирования боковых границ узких таликов. Так как талики характеризуются пониженными значениями УЭС, ЭП МДС следует выполнять двусторонними дипольными или трехэлектродными установками. Шаг наблюдений по профилю и размеры приемных линий должны быть меньше поперечных размеров талика как минимум в 3 раза. Расстояния между соседними профилями выбираются так, чтобы обеспечивалось непрерывное прослеживание боковых границ таликов. В качестве примера рассмотрим результаты картирования таликов и зон отепления мерзлых пород в одном из районов Западной Сибири.

Пример 7 (рис.31). Измерения производились двусторонней дипольной установкой OO' =30 м. Профили располагались на расстоянии 50-100 м друг от друга, шаг наблюдений составлял 5 м.

Графики $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_n/J$ дипольного ЭП по одному из профилей приведены на рис. 32. Качественный анализ их позволяет обнаружить две широкие проводящие зоны, боковые границы которых выделяются аномалиями, характерными для вертикальных контактов двух сред (пикет -37) или вертикального проводящего пласта (пикеты -7 и -12). Вторую группу аномалий составляют локальные минимумы на кривых $\Delta U_t/J(\rho_к)$, которые, судя по совпадающим аномалиям на кривых $\Delta U_n/J$, обусловлены локальными переуглублениями в кровле мерзлых пород на пикетах -32, -26 и -27. Количественная интерпретация аномалий первой группы, выполненная по номограммам для дипольных установок, дает следующие результаты (см.табл.11).

Таблица 11

№ пикета	Тип аномалии	$\Delta U_n/\Delta U_t$	A_n/A_t	γ^o	α^o	h_0/OO'	h_0, м
-7	Контакт двух сред	-0,07	-0,08	82	90	0-0,1	0-3
-11	То же	-0,36	-0,48	48	90	0,1	3
-17	"	+0,16	+0,205	110	90	0,1	3
-37	"	-0,34	-0,37	58	60	0,15	4,5

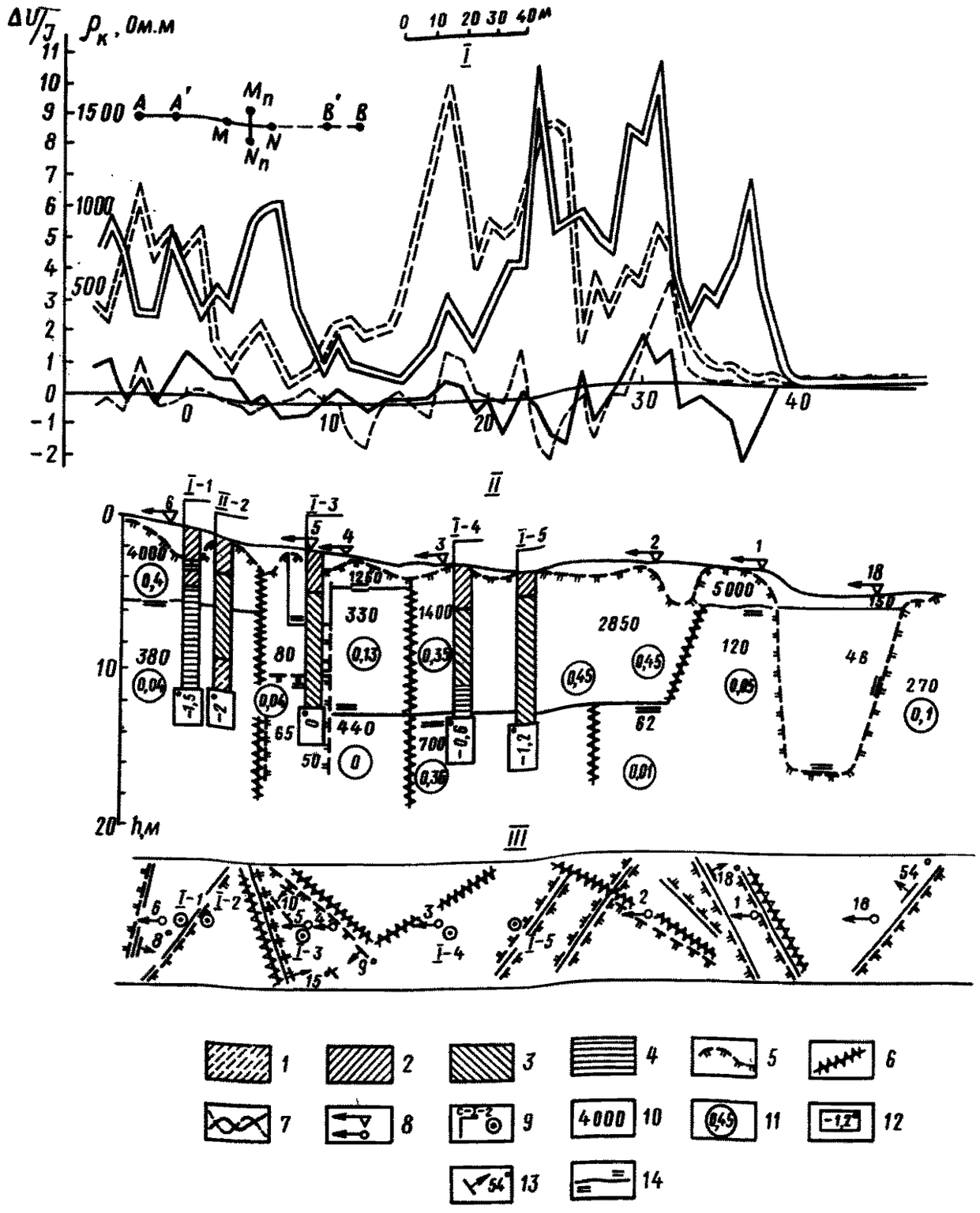
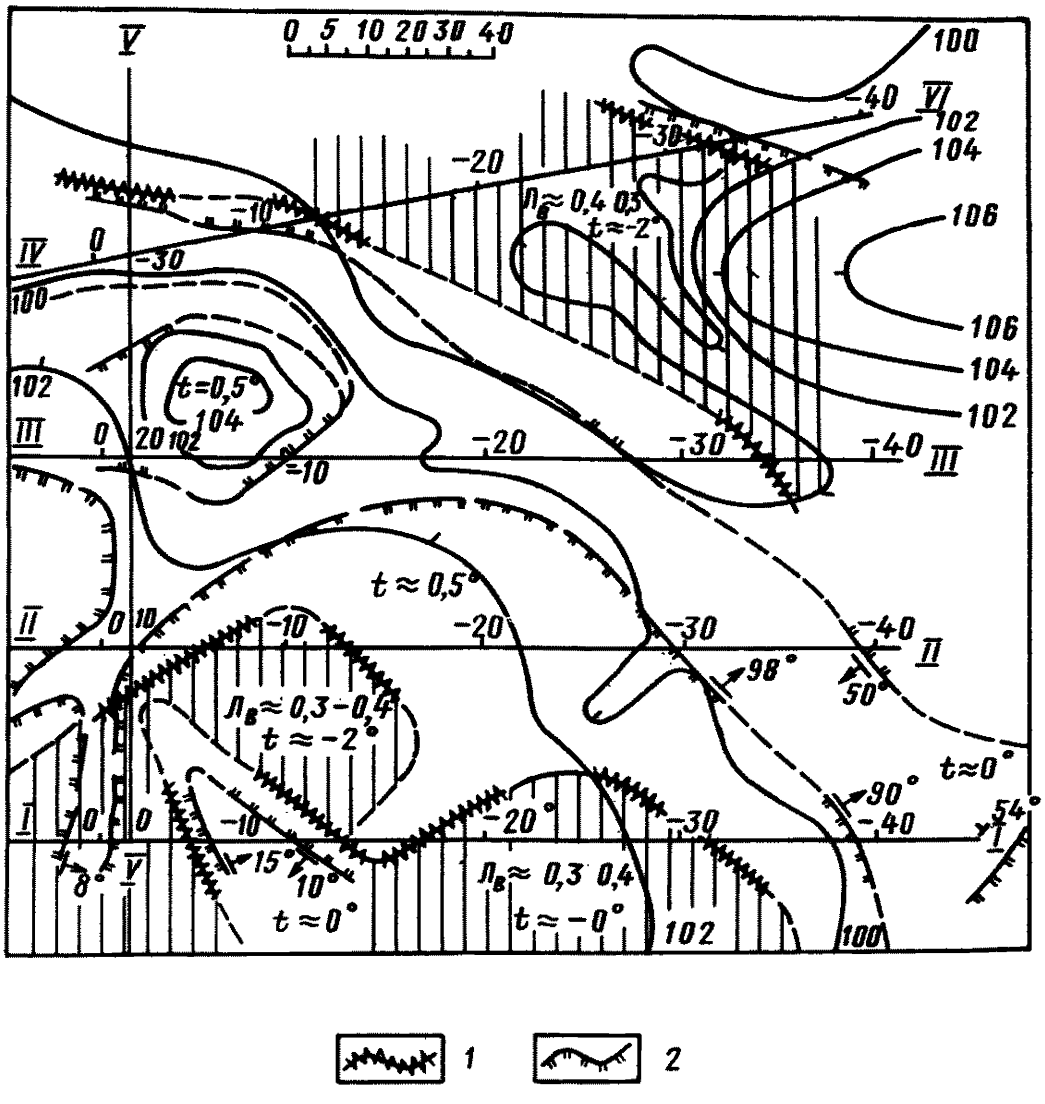


Рис. 31. Результаты ЭП и ВЭЗ МДС, полученные при изучении толщи мерзлых пород с переменной льдистостью и температурой

I - графики двустороннего дипольного ЭП МДС; II - геоэлектрический разрез по профилю I-I; III - план геоэлектрических границ к нему-1 - супесь; 2 - легкие суглинки; 3 - тяжелые суглинки; 4 - глина; 5 - граница между талыми и мерзлыми породами; 6 - граница между породами с нормальной и повышенной льдистостью; 7 - кривые $\Delta U_t/I$ и $\Delta U_n/I$ для левой и правой установок ЭП МДС; 8 - пункты ВЭЗ МДС и направление разносов АО; 9 - буровые скважины и их номера; 10 - величины УЭС, по данным интерпретации ВЭЗ МДС; 11- объемная льдистость пород $Л_в$, установленная по величинам $\rho_m / \rho_{пр}$; 12 - температура пород на забое скважин; 13 - простирание и истинный угол падения геоэлектрических границ; 14 - геоэлектрические границы и глубины их залегания по данным интерпретации кривых единичных ВЭЗ МДС



1 2

Рис. 32. Корреляционная схема расположения боковых границ проводящих зон 1 - геоэлектрические границы пород с повышенной льдистостью; 2 - геоэлектрические границы талых пород

Местоположение и простирание боковых границ проводящих зон вынесены на схему профилей (рис.32). Полученной информации оказалось достаточно для определения конфигурации проводящей зоны в плане. ВЭЗ и бурение подтвердили, что проводящие зоны связаны с участками повышенного протаивания и отепления до 0°С мерзлых пород. При этом точность проведения боковых границ талых и отепленных участков, по данным ЭП МДС, составила ±2,5 м в местах их пересечения профилями и ±5 м - между профилями.

2.42. ВЭЗ МДС производится для определения строения и глубины таликов, а также состава слагающих их пород. Пункты зондирований намечаются по данным ЭП МДС и размещаются так, чтобы одни из них располагались непосредственно над таликом или отепленным участком, а другие - за их пределами вблизи боковых границ. Примером такого размещения зондирований могут служить ВЭЗ № 18 и № 1 на рис. 32. Соответствующие им кривые $\rho_к$ и $\Delta u_п/\Delta u_э$ приведены на рис. 33. Все они указывают на присутствие в разрезе наклонных границ раздела сред и требуют соответствующего подхода к их интерпретации.

Пример 8 (рис. 33). ВЭЗ №1. Аномалии на кривых $\rho_к$ и $\Delta u_п/\Delta u_э$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС характерны для четырехслойного массива, содержащего крутопадающую ступень рядом с центром зондирования. Количественной интерпретации подвергается кривая $\rho_к$ для удаляющейся установки АО. В координаты особых точек на ней должны быть внесены поправки, учитывающие боковое влияние ступени. В результате количественной интерпретации устанавливается строение разреза по вертикали:

h_1 =1 м h_2 =1,6; h_3 =44 м h_4 = ∞,
ρ_1 =55 Ом·м ρ_2 =5500 Ом·м ρ_3 =121; ρ_4 =417.

Элементы залегания ступени:

α =0 γ =60-62°
h_1 =1 Δh =12,5 или α =45-60°.

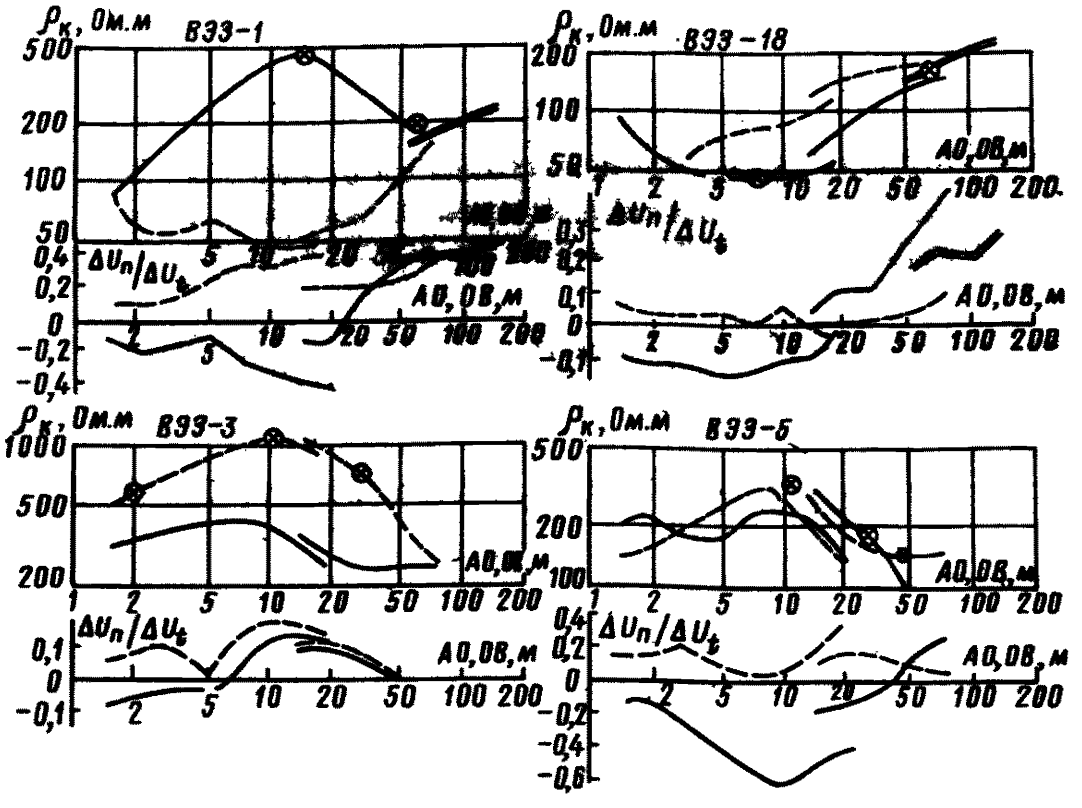


Рис. 33. Кривые ВЭЗ МДС и положение особых точек на них

ВЭЗ № 18. Среда имеет трехслойное строение с крутым падением кровли высокоомного опорного горизонта в направлении разносов питающих электродов установки АО. Количественной интерпретации подвергаются кривые $\rho_к$ для секущей АО и удаляющейся ОВ установок. Строение массива по вертикали определяется как среднее арифметическое из полученных данных:

h_1 =1 ; h_2 =5 ; h_3 = ∞ (м);
ρ_1 =120 ; ρ_2 =46; ρ_3 =270-340 (Ом·м).

Элементы залегания наклонного контакта равны:

h_0 =0,7 м ; γ =130°;
a =7 м ; α =54°.

На основании известных зависимостей УЭС пород от их состава, льдистости, типа криогенных текстур и температуры можно дать следующую привязку выделенных геоэлектрических горизонтов.

В районе талика (ВЭЗ № 18) сверху в разрезе залегают оторфованные суглинки мощностью 1 м. Ниже залегает пятиметровый слой талых суглинков. Вариант с мерзлыми глинами в верхней части разреза отпадает, так как для этого необходимо предположить невероятную для района работ отрицательную температуру. Третий геоэлектрический горизонт может быть представлен либо мерзлыми суглинками со слоистой криогенной текстурой, льдистостью около $J_в$ =0,05 и температурой -0,5°С, либо мерзлыми глинами со слоистой криогенной текстурой, льдистостью $J_в$ =0,12 - 0,33 при той же температуре.

За пределами талика (ВЭЗ № 1) массив имеет следующее строение. Первый от поверхности слой сложен талыми оторфованными суглинками. Второй горизонт представлен либо мерзлыми песками с массивной криогенной текстурой, либо мерзлыми суглинками или супесями с сетчатой криогенной текстурой, льдистостью $И_б$ =0,7 и температурой около -1°С. Суглинки наиболее вероятны, если принять во внимание состав пород в пределах талика. Третий слой сложен мерзлыми глинами, которые при температуре от -1 до -2°С должны обладать слоистой или сетчато-слоистой криогенной текстурой при льдистости $Л_б$ =0,05. Опорный горизонт представлен мерзлыми суглинками псетчато-слоистой криогенной текстурой и льдистостью $И_б$ =0,03.

Расхождения результатов ЭП МДС и ВЭЗ МДС не выходят за пределы ошибок интерпретации, характерных для каждого из этих методов. Бурение и каротаж скважин, произведенные на этом профиле по окончании наземных электроразведочных работ, полностью подтвердили полученные данные.

2.43. Применение наземной сейсморазведки в условиях узких таликов сложной формы не всегда эффективно из-за искажающего влияния крутопадающих границ и сложностей, сопряженных с его учетом.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО ПЛОЩАДИ И В РАЗРЕЗЕ СИЛЬНОЛЬДИСТЫХ ПОРОД И ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ

КАРТИРОВАНИЕ СИЛЬНОЛЬДИСТЫХ ПОРОД

2.44. Физические предпосылки таковы, что достоверное решение интересующей нас задачи может быть получено с помощью комплекса геофизических методов, включающего наземную электроразведку, комплексный каротаж скважин и гравиметрию.

2.45. ЭП используется для обнаружения и прослеживания границ участков, сложенных мерзлыми породами с различной льдистостью. Эти границы имеют, как правило, сложную конфигурацию и выделяются на графиках ЭП сравнительно слабыми аномалиями на фоне более интенсивных, возникающих при переходе от талых к мерзлым породам, а также при изменении глубины сезонного протаивания. Рассматриваемая задача решается во многих случаях неоднозначно по данным ЭП и требует привлечения дополнительной информации о строении и свойствах изучаемой среды.

2.46. ЭП МДС двусторонними дипольными или трехэлектродными установками позволяет получить информацию о форме и элементах залегания границ даже в сложных условиях, когда аномалии от различных возмущающих тел накладываются друг на друга.

Пример 9 (рис.31). Сложный характер аномалий на кривых ЭП МДС между пикетами -17 и -31 обусловлен в первую очередь колебанием глубины сезонного протаивания в пределах от 0,25 до 1,5 м. Участки, на которых мощность сильнольдистых пород ($Л_б$ =0,3 - 0,45) возрастает до 10-12 м, выделяются увеличением общего уровня поля на графиках $\Delta U_t/J(\rho_к)$. Количественная интерпретация аномалий на графиках $\Delta U_t/J(\rho_к)$ и $\Delta U_п/J$, приуроченных к границам сильнольдистых пород (см.табл.11), показывает, что они не связаны с границами отепленных зон или участков с повышенной мощностью сезонного протаивания и нередко занимают по отношению к ним секущее положение. Корреляция границ указанного типа по соседним профилям, произведенная с учетом их элементов залегания, позволяет оконтурить участки с повышенной мощностью сильнольдистых пород (см.рис.32).

2.47. С помощью ВЭЗ определяют мощность и УЭС сильнольдистых пород, по которым в свою очередь находят их состав и льдистость. Поскольку в сильнольдистой толще широко распространены наклонные и крутопадающие контакты, все зондирования необходимо выполнять двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих. Выбор пунктов зондирований производится с учетом данных ЭП МДС или микрорайонирования. С целью получения максимального объема информации о строении и свойствах льдистой толщи центры зондирований следует располагать вблизи ее боковых границ. Примером может служить ВЭЗ № 3 на рис. 33.

Пример 10 (рис.33). ВЭЗ № 3. Характер аномалий на кривых $\rho_к$ и $\Delta U_п/\Delta U_t$ двустороннего трехэлектродного ВЭЗ МДС соответствует четырехслойному строению среды, в которой первая от поверхности граница погружается в направлении разносов питающего электрода установки АО, а второй от поверхности высокоомный горизонт обрывается в 8-10 м от центра зондирования также по направлению разносов АО.

Количественной интерпретации должна подвергаться кривая ρ_k' для удаляющейся установки ОВ, в координаты особых точек которой необходимо внести поправки, учитывающие боковое влияние ступени или вертикального контакта. В результате находим строение массива по вертикали:

$h_1=0,5$; $h_2=10,5$; $h_3=30$; $h_4=\infty$,
$\rho_1=240$; $\rho_2=1400$; $\rho_3=690$; $\rho_4=250$.

Элементы залегания ступени:

$h_1=0,5$ м, $\varphi=115^\circ$
$a=10$ м; $\Delta h=8$ м.

Результаты интерпретации кривых ВЭЗ № 3 могут быть расшифрованы на основании известных зависимостей УЭС мерзлых пород, от их состава, льдистости, типа криогенной текстуры и температуры. Первый слой соответствует талому торфу. Второй горизонт представлен мерзлыми суглинками с $\sqrt{\Pi_в}=0,25$-$0,45$, сетчатослоистой криогенной текстурой и температурой около -1°С. Третий слой сложен теми же породами с $\Pi_в=0,1$-$0,15$. Опорный горизонт относится к мерзлым суглинкам или глинам с $\Pi_в=0,05$ при температуре около $-0,5^\circ$С.

По существу, аналогичные данные были получены при интерпретации кривых ВЭЗ № 2. Последующее бурение и каротаж скважин полностью их подтвердили.

2.48. Комплексный каротаж скважин имеет своей целью детальное расчленение мерзлой толщи по составу и льдистости, а также определение температуры, продольного УЭС и скорости упругих колебаний, величины которых необходимы для более точной оценки объемной влажности и льдистости пород, типа криогенной текстуры и коэффициента электрической анизотропии, плотности и упругих характеристик среды. Так как скважины в мерзлых породах в большинстве случаев сухие, комплексный каротаж их должен состоять из термометрии, каротажа КС, акустического каротажа (АК) и акустической керноскопии (АКС). Возможности комплексного каротажа скважин покажем на примере рассматривающегося выше участка.

Пример 11 (рис.34). Скважины были пробурены с целью уточнения результатов наземных электроразведочных работ. Термометрия выполнялась в выстоявшихся скважинах заленивленными ртутными термометрами через интервалы 0,5 м. Акустический каротаж производился пятиточечным комбинированным зондом с получением встречных и нагоняющих годографов. Пьезодатчики располагались на расстоянии 0,1 м друг от друга. В качестве измерительной аппаратуры использовался модернизированный прибор Р-5-5. Электрический каротаж КС выполнялся подошвенным А 0,1 М 0,1 N и кровельным М 0,1 N 0,1 В трехэлектродными зондами. Измерения велись в виде точечного профилирования с шагом 0,1 м. В качестве измерительной аппаратуры использовались электроразведочный автокомпенсатор ЭСК-1 и многопредельный миллиамперметр. Кажущееся сопротивление вычислялось по формуле

$$\rho_к = K \Delta U / J,$$

в которой коэффициент К учитывал влияние стенок скважины. Каротажные диаграммы по скважине 1-4, дополненные результатами интерпретации кривой ВЭЗ № 3, приведены на рис. 34.

По кривой АК выделяется одна граница между легкими и тяжелыми суглинками на глубине 3 м. Осреднив флуктуации скоростей, находим наиболее вероятные значения для исследуемых объемов пород. Располагая сведениями о составе и температуре пород, находим средние значения объемной влажности $\Pi_в$, льдистости $\Pi_в$, плотности γ и реакции на сжатие $\tau_{сж}$ с помощью соответствующих номограмм. Результаты определений приведены в табл. 12.

На диаграммах КС преобладают аномалии, свойственные непроводящим слоям малой (менее 0,1 м) и средней (около 0,2-0,4 м) мощности. Обусловлены они отдельными горизонтальными шлирами льда. По совокупности признаков, учитывающих уровень нормального поля по минимальным значениям $\rho_к$, форму и амплитуды аномалий на диаграммах КС, можно выделить четыре геоэлектрических горизонта в разрезе. Первый геоэлектрический горизонт имеет сравнительно высокий уровень нормального поля и небольшие амплитуды аномалий. Его подошва находится на глубине 5 м и с точностью до 10% совпадает с границей изменения мощности и частоты чередования шлиров льда в суглинках. Второй геоэлектрический горизонт отличается от первого более низким уровнем нормального поля и приурочен к переходной зоне от частослоистой к редкослоистой криогенной текстуре. Третий геоэлектрический горизонт обладает низким уровнем нормального поля и максимальными амплитудами аномалий. Он связан с интервалом, на котором шлиры льда имеют максимальную мощ-

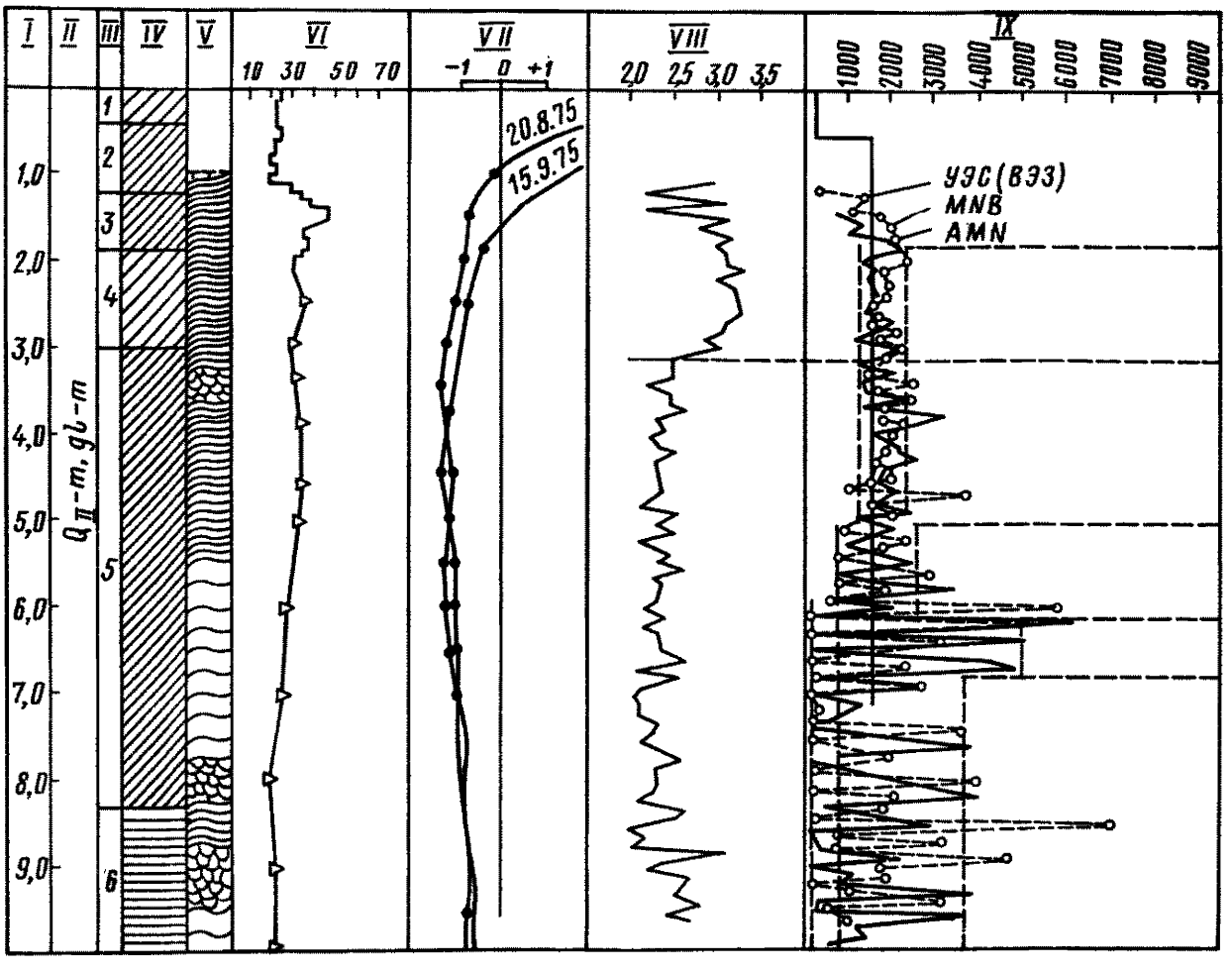


Рис. 34. Результаты комплексного каротажа скважины 1-4,
I - глубина выработки в м; II - геологический индекс отложений; III - номер слоя и его состав; 1 - суглинок легкий, пылеватый, темно-коричневый; 2 - суглинок средний, серовато-коричневый; 3 - суглинок средний, серый, криогенная текстура слоистая, мощность шлиров льда 0,1-0,2 см, расстояние между ними 0,5-0,1 см; 4 - суглинок легкий, серый, ожелезненный, криогенная текстура слоистая, мощность шлиров льда 0,1-0,4 см, расстояние между ними 0,5-2 см; 5 - суглинок тяжелый, серый, криогенная текстура слоистая и сетчатая, мощность шлиров льда с глубиной изменяется от 0,1 до 2 см, расстояние между шлирами 0,5 до 10 см; 6 - глина голубовато-серая, криогенная текстура слоистая, мощность шлиров льда от 0,5 до 1 см, расстояние между шлирами 2-5 см; IУ - разрез выработки; У - криогенная текстура; УI - влажность в %; УII - температура по С; УIII - диаграмма V_p, км/с; IX - диаграммы ρ_m и $\rho_к$, Ом·м

ность. Четвертый геоэлектрический горизонт отличается от третьего меньшими амплитудами аномалий и, следовательно, меньшей мощностью и большей частотой чередования шлиров льда. Геоэлектрический разрез не расходится с результатами визуальных определений состава и льдистости пород.

По данным каротажа КС следует определить льдистость, тип криогенной текстуры и коэффициент электрической анизотропии с помощью соответствующих номограмм. Для этого необходимо обработать диаграмму КС и вычислить продольное сопротивление по формуле (12) для каждого выделенного геоэлектрического горизонта. Мощности проводящих и непроводящих прослоев и относящиеся к ним значения $\rho_к$ определяют по положению экстремальных точек аномалий на диаграммах $\rho_к$ для кровельного и подошвенного зондов. Окончательные результаты обработки каротажной диаграммы КС по скважине 1-4 помещены в табл.12. Располагая сведениями о составе и температуре пород по разрезу скважины, необходимо найти по номограмме (см.рис.2) величины $\rho_{пр}$ для проводящих прослоев пород с массивной

Таблица 12

Номер слоя	Наименование породы	Интервал глубин, м	Результаты комплексного каротажа и ВЭЗ														
			Термометрия	Электрический каротаж (КС)										Акустический каротаж АК			
			$t°C$	$\rho_{пр}$, Ом·м	$\frac{\rho_в}{\rho_{пр}}$	ρ_t, Ом·м	ρ_m, Ом·м	$\frac{\rho_t}{\rho_{пр}}$	$\frac{\rho_m}{\rho_{пр}}$	$\lambda_в$	q/m	λ	Тип криогенной текстуры	V_p, км/с	$\bar{\lambda}_в$	γ, г/см³	$\tau_{сж}$
1	Суглинок легкий	0-3	-1	450	67	1800	1400	4	3,1	0,23	0,1	3	Сетчато-слоистая	3050	0,25	1,75	23
2	Суглинок средний	3-5	-1,3	240	125	1800	1400	7,55	6	0,18	1	1	Сетчатая	2350	0,2	1,6	13
3	Суглинок тяжелый	5-6	-1,1	110	230	1375	1400	12,2	12,5	0,19	1	1	Сетчатая	2350	0,2	1,6	13
4	Суглинок тяжелый	6-7	-1	110	230	197	1400	1,8	12,5	0,35	0,002	7,5	Слоистая	2350	0,2	1,6	13
5	Глина	7-10	-0,8	40	750	230	690	6	17	0,075	0,075	3	Сетчато-слоистая	2450	0,3	1,55	15

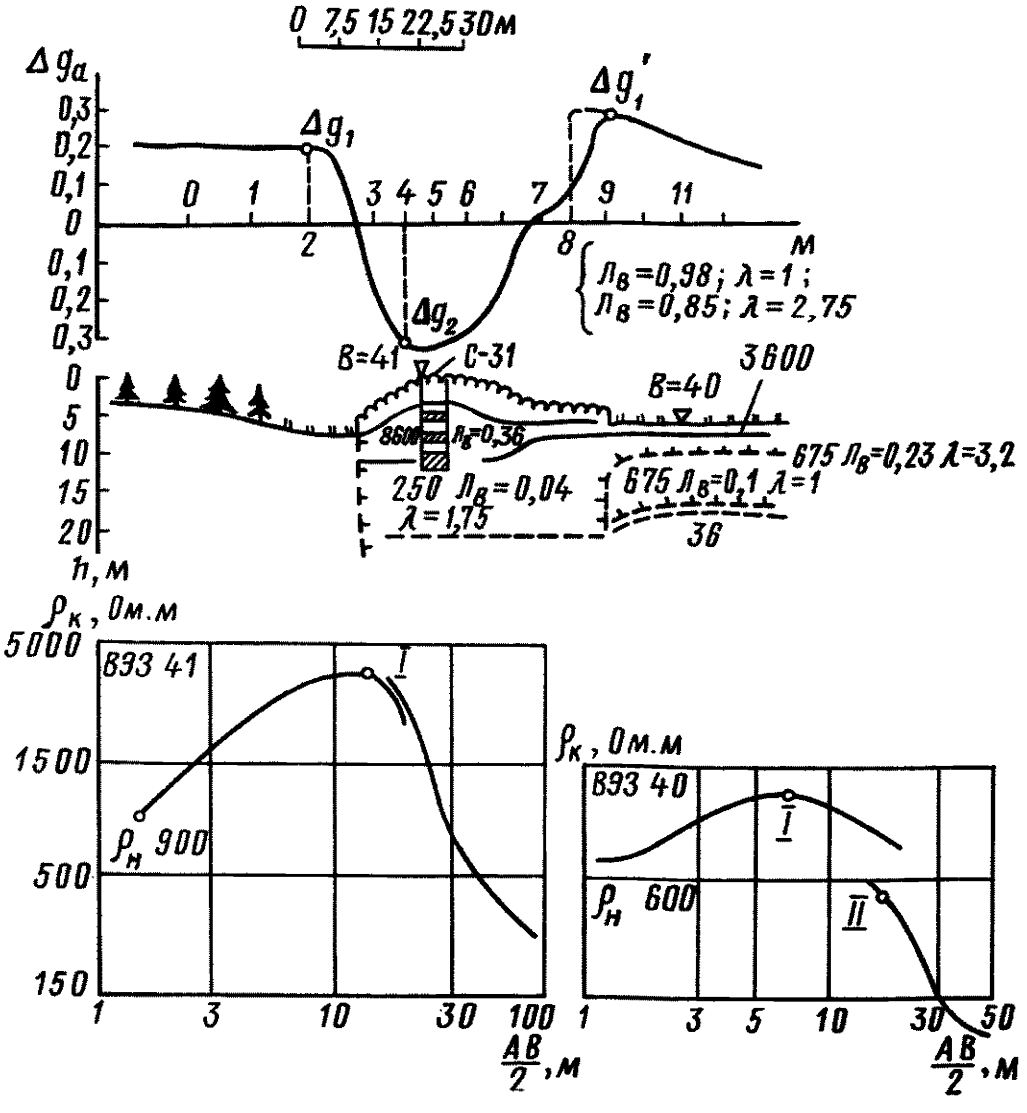


Рис. 35. Результаты комплексных работ методами гравиразведки, ВЭЗ КС и бурения над бугром пучения

криогенной текстурой в пределах каждого выделенного геоэлектрического горизонта. Вычислив отношение ρ_t/ρ_{ap}, следует определить значения $Л_в$, λ и q/m. Задача решается однозначно, поскольку известны значения ρ_m, установленные для каждого геоэлектрического горизонта в результате интерпретации данных ВЭЗ № 3. Все геоэлектрические и геокриологические параметры помещены в табл.12. Данные, полученные различными наземными и скважинными геофизическими методами, находятся в соответствии. Использованные вместе, они позволяют практически однозначно определить состав, льдистость, тип криогенной текстуры, суммарную влажность, плотность и ряд упругих характеристик мерзлых пород без привлечения дополнительной информации.

2.49. Гравиметрия может быть привлечена как вспомогательный метод для обнаружения и оконтуривания в массиве сильнольдистых пород и оценки их льдистости и плотности. Примером могут служить результаты опытных работ в одном из районов Западной Сибири.

Пример 12 (рис.35). Гравиметрические наблюдения выполнены по одному профилю с целью изучения строения бугра пучения. Шаг наблюдений менялся от 15 м в нормальном поле за пределами бугра пучения до 5 м в области аномалии. Измерения проведены по стандартной методике с многократным повторением всех точек. В качестве измерительной аппаратуры использовался гравиметр ГАК-7Н с чувствительностью 0,01 млг, достигнутой путем замены кварцевой нити на более тонкую. Точность съемки составила ±0,05 млг. Аномалии приращения силы тяжести вычислялись в относительной редукции.

Анализ графика Δg позволяет установить, что отрицательная аномалия приурочена к торфянику, границы которого фиксируются по абсциссам точек, в которых зна-

чения $\frac{1}{2}g$ составляют половину амплитуды аномалии. Плотность возмущающего тела можно определить по величине аномалии Δg, если известна его вертикальная мощность. Недостающую информацию можно получить в результате количественной интерпретации кривых $\rho_к$ ВЭЗ, относящихся к центральной и периферийной частям торфяника:

ВЭЗ № 41 (центр торфяника)

h_1=0,33; h_2=9,2; $h_3 = \infty$ (м);
ρ_1=220; ρ_2=6600; ρ_3=250 (Ом·м);

ВЭЗ № 40 (периферия торфяника)

h_1=0,55; h_2=2; h_3=8,25; $h_4 = \infty$ (м);
ρ_1=300; ρ_2=3600; ρ_3=675; ρ_4=36 (Ом·м).

Первый от поверхности слой представлен талым торфом. Второй геоэлектрический горизонт, учитывая его пониженную плотность, сложен сильнольдистыми глинистыми породами. Приняв $t^o = -0,5^oC$ и произведя необходимые определения по соответствующим номограммам, находим, что второй горизонт имеет сетчато-слоистую криогенную текстуру и льдистость, меняющуюся от 0,86-0,92 в центре торфяника до 0,58-0,7 на его периферии. Коэффициент анизотропии в обоих случаях равен единице, вследствие чего установленная с помощью ВЭЗ мощность второго горизонта должна быть близкой к истинной. Третий геоэлектрический горизонт сложен теми же породами с сетчатой криогенной текстурой и льдистостью около 0,2. Опорный горизонт представлен талыми суглинками.

Располагая значением мощности сильнольдистого слоя в центре торфяника, следует вычислить разность плотностей пород $\Delta\sigma$ по формуле (22). Полагая X=0, h_1=0 и h_2=9,2 м, находим $\Delta\sigma$=1,27 г/см^3. Так как плотность суглинков без льда равна 2,35 г/см^3, легко устанавливаем, что породы под торфяником имеют плотность около 0,96 г/см^3. Это соответствует льдистости около 0,95 (см.табл.7).

Скважина, пробуренная в центральной части торфяника, прошла в слоистой толще, представленной чередованием мощных до 0,1-0,2 м шлиров льда с маломощными 0,01-0,02 м прослоями суглинков, которые с глубины 9 м сменились слоистыми суглинками с нормальной льдистостью. Таким образом, данные электроразведки и гравиметрии оказались в соответствии с реальной обстановкой и, дополняя друг друга, позволили получить исчерпывающую информацию о форме, размерах, составе и льдистости такого сложного объекта, как бугор пучения.

КАРТИРОВАНИЕ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

2.50. Физические предпосылки таковы, что для решения этой задачи могут быть привлечены практически все геофизические методы. Однако возможности каждого из них существенно различны и во многом зависят от условий залегания ледяных тел. Исчерпывающая информация о присутствии в разрезе льда и его распространении по площади и в глубину может быть получена только с помощью комплекса геофизических методов, каждый из которых дает ответ на сравнительно узкий круг вопросов. Основными методами являются: гравиметрия, ВЭЗ МДС и комплексный каротаж скважин. Область применения различных модификаций ЭП, наземной сейсморазведки и магнитометрии ограничена, вследствие чего этим методам отводится роль вспомогательных.

2.51. Гравиметрия применяется для обнаружения в массиве крупных ледяных тел, определения их формы и глубины залегания. Исследования ведутся в виде высокоточной съемки с помощью гравиметров, обладающих высоким порогом чувствительности. Расстояния между профилями и пунктами наблюдений выбираются в соответствии с масштабом съемки, а также с учетом размеров и глубины залегания ледяных тел. В зависимости от указанных обстоятельств расстояние между соседними профилями может меняться от 50 до 500 м, а шаг наблюдений по ним - от 2,5 до 25 м. Это соответствует масштабам 1:1000 и 1:25000.

2.52. Результаты гравиметрической съемки изображаются в виде графиков Δg по отдельным профилям и карт изоаномал. Качественная и количественная их интерпретация производится стандартными приемами. Представление о последовательности решения этой задачи и точности получаемых решений можно получить на примере бугров пучения, которые при условии их высокой льдистости (более 0,9) являются уменьшенным аналогом крупных пластовых тел.

2.53. ВЭЗ применяются для определения глубины залегания верхней границы льда и его УЭС, по величине которого можно судить о минерализации льда или со-

держании в нем минеральных примесей. Вертикальная мощность ледяного пласта может быть определена по данным ВЭЗ, если она значительно (в 20 и более раз) меньше его поперечных размеров. Поскольку верхняя и боковые границы ледяных тел имеют, как правило, сложную конфигурацию, зондирование необходимо проводить двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих.

2.54. Точки ВЭЗ следует располагать вблизи боковых границ пластов льда, а также над основными структурными элементами (впадинами, поднятиями или ступенями) его кровли, для чего необходимо широко использовать данные гравиметрии или собственные возможности ВЭЗ МДС. Кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных или дипольных ВЭЗ МДС подвергаются качественной и количественной интерпретации с применением специальных номограмм для извлечения максимального количества информации о строении и свойствах ледяных тел.

Пример 13 (рис.36 и 37) Исследования проводились с целью изучения условий залегания подземных льдов. Измерения выполнены двусторонними трехэлектродными установками с максимальными разносами питающих электродов до 300-500 м. Точки ВЭЗ МДС располагались по профилям через 50-150 м, что обеспечивало непрерывное прослеживание кровли высокоомного опорного горизонта. На рис. 36 приведены типичные кривые ВЭЗ МДС, полученные за пределами пласта льда (ВЭЗ № 13), вблизи его боковых границ (ВЭЗ № 1) и над локальным переуглублением в кровле льда (ВЭЗ № 2).

Присутствие льда в массиве обнаруживается на правых ветвях кривых $\rho_к$ ВЭЗ, которые составляют в этом случае с осью абсцисс угол в 45^0 и больше. Максимумы на кривых $\rho_к$ ВЭЗ, связанные с этим высокоомным горизонтом, формируются на разносах АО или ОВ более 300-500 м, что указывает на достаточно большую мощность горизонта и его выдержанность по простиранию. На всех кривых $\rho_к$ и $\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС обнаруживаются признаки бокового влияния наклонных границ с большими углами падения. Интерпретацию таких кривых ВЭЗ МДС необходимо выполнять по особым точкам с применением специальных номограмм для внесения поправок, учитывающих боковое влияние наклонных контактов.

По данным качественной и количественной интерпретации кривых ВЭЗ МДС построен геоэлектрический разрез по профилю (см.рис. 37) и план простирания наклонных геоэлектрических границ в его окрестностях. Местоположение каждой геоэлектрической границы в разрезе практически однозначно устанавливается по величинам УЭС слоев, коэффициентам их анизотропии и элементам залегания их границ. Полученная информация не расходится с данными бурения и последующего каротажа скважин и дополняет их сведениями о строении мерзлой толщи и характере залегания верхней и боковой границ пласта льда.

2.55. Комплексный каротаж скважин имеет своей целью детальное расчленение разреза по составу и льдистости пород. Физические предпосылки, техника измерений и приемы интерпретации остаются теми же, что и при изучении сильнольдистых пород.

Пример 14 (рис. 38). Скважина 1 пробурена вблизи центра ВЭЗ № 1 с целью привязки выделенных геоэлектрических горизонтов. Комплексный каротаж состоял из термометрии и измерений КС потенциал-зондами АМ и МА с действующим расстоянием 0,5 м. Электроды зондов были изготовлены из пластин поролона, пропитанного концентрированным раствором медного купороса. Диаметр электродов несколько превышал диаметр скважины с целью обеспечения надежного контакта. Измерения производились поточечно с шагом 0,2 м. В качестве измерительной аппаратуры использовались автокомпенсатор АЭ-72 и многопредельный миллиамперметр. Кажущееся сопротивление вычислялось по формуле

$$\rho_к = \frac{\Delta U}{J} \frac{4\pi}{\bar{r}},$$

где $\bar{r}$ - действующее расстояние АМ = МА. Результаты измерений относились к приемному электроду М. Получены две контролирующие друг друга диаграммы КС для кровельного МА и подошвенного АМ зондов.

Диаграммы $КС_{AM}$ и $КС_{MA}$ по скважине 1 приведены на рис. 38. Они дополнены диаграммой УЭС пород, полученной в результате интерпретации кривых ВЭЗ МДС. Их анализ позволяет установить следующее.

Пласты льда обнаруживаются с помощью каротажа КС, когда их видимая мощность по скважине соизмерима с длиной зонда или превышает ее. Границы пласта фиксируются достаточно точно максимумами на кривых $\rho_к$ для кровельного и подошвенного зондов. Величины $\rho_к$ в области максимумов или минимумов на диаграммах КС приближаются к значениям продольного УЭС в случае слоистых сред и истинного УЭС для сетчатых или изотропных сред. Это открывает широкие возможности для

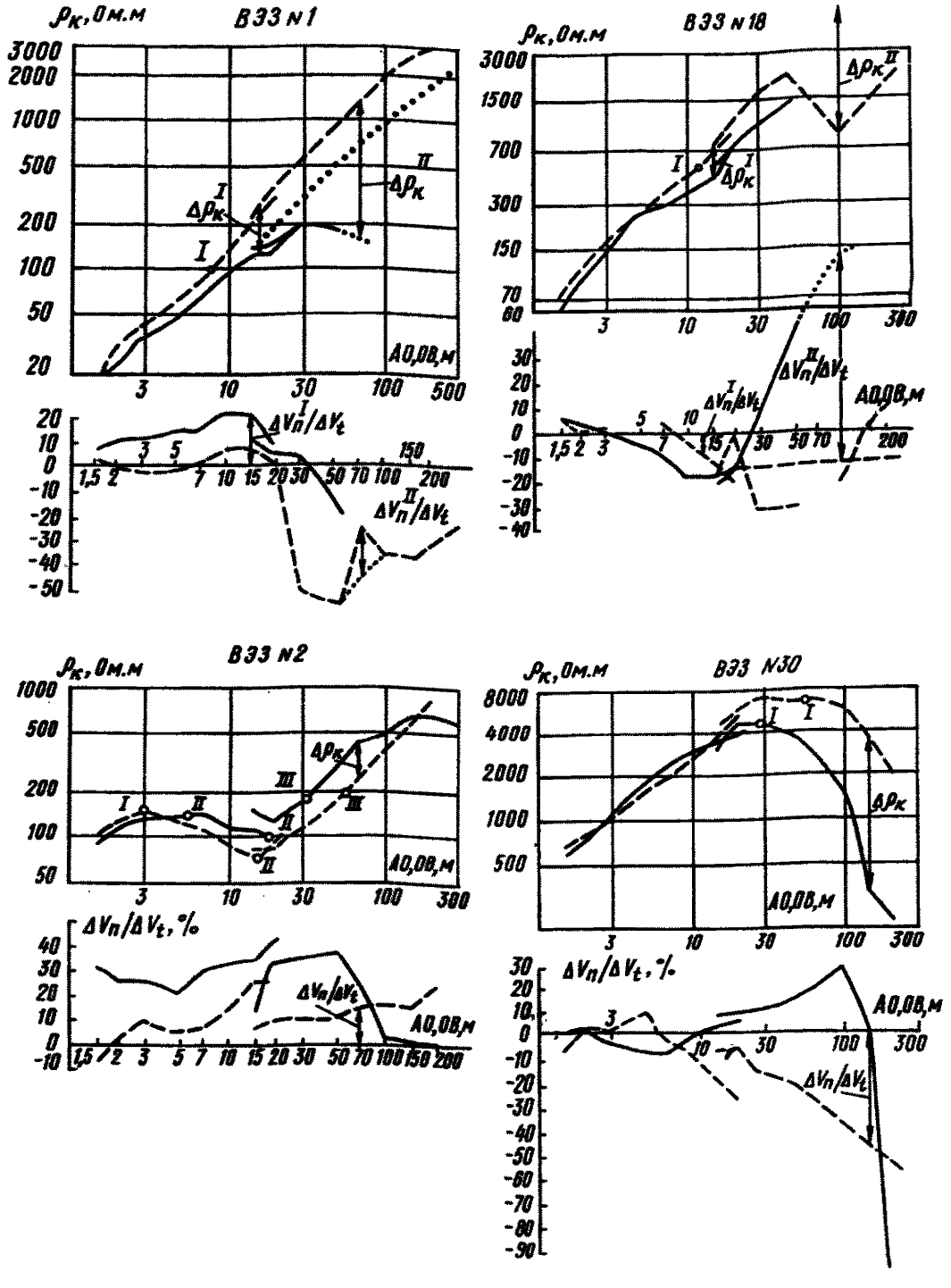


Рис. 36. Кривые ВЭЗ МДС над различными элементами залежи пластового льда и положение особых точек на них

определения состава, льдистости, типа криогенной текстуры и других параметров по величинам $\rho_к$, снимаемым с диаграммы КС без предварительной ее обработки и расчетов величин ρ_t и λ. Например, по диаграмме КС для кровельного зонда МА находим, что УЭС льда равно 100 000 Ом·м. Зная t° = -1,5°С, определяем минерализацию льда М ≈ 0,01 г/л (10^{-4} - 10^{-3} г/см³) по номограмме, описывающей зависимость этого параметра от величины УЭС льда (см.рис. 1).

2.56. Физические предпосылки таковы, что область применения наземной сейсморазведки ограничивается картированием кровли ледяных пластов, залегающих в глинистых породах. В этом случае контакт льда и глинистых пород будет являться преломляющей границей. Лед, залегающий в песчаных отложениях, не может быть

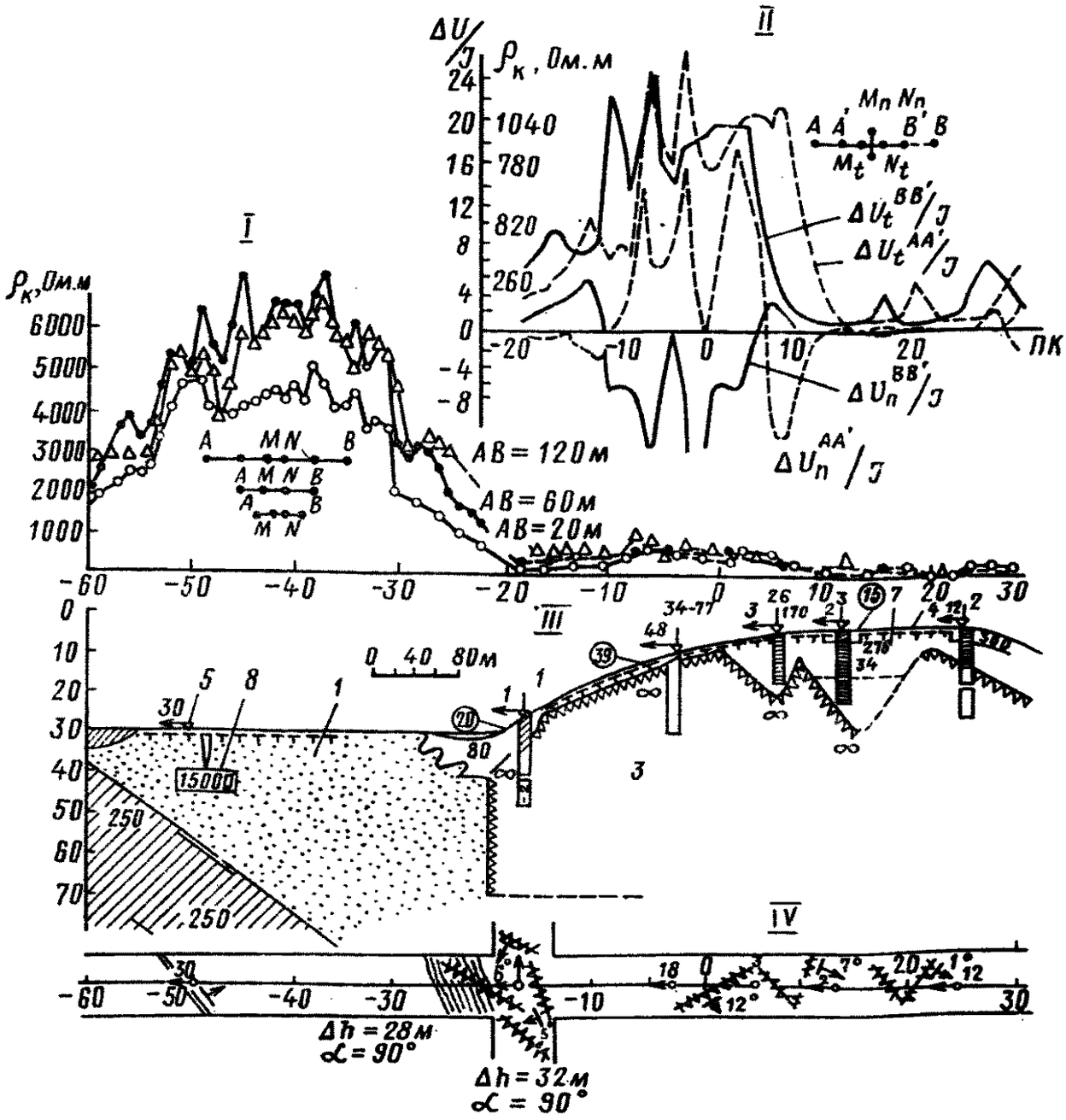


Рис. 37. Результаты ЭП и ВЭЗ МДС над залежью пластового льда
I - графики симметричного профилирования методом ЭП КС с АВ-120, 60 и 30 м; II - графики дипольного ЭП МДС; III геоэлектрический разрез по профилю; IУ - простирание границ в плане - 1 - песок; 2 - суглинок; 3 - лед; 4 - граница мерзлоты; 5 - точки ВЭЗ и их номера; 6 - скважины и их номера; 7 - мерзлые засоленные породы; 8 - УЭС пород по данным интерпретации ВЭЗ МДС

выделен с помощью сейсмических методов из-за близости значений скоростей упругих колебаний в них.

2.57. ЭП может быть использовано для картирования боковых границ пластов льда, а также для оконтуривания участков, на которых лед залегает на небольшой глубине. Положительное решение перечисленных задач может быть достигнуто только в благоприятных условиях, основными компонентами которых являются неглубокое залегание кровли льдов, большая глинистость и слабая льдистость вмещающих лед пород, постоянство мощности и УЭС пород слоя сезонного протаивания. Измерения следует производить двусторонними дипольными или трехэлектродными установками по методу двух составляющих с тем, чтобы на каждом профиле можно было получить сведения о форме и размерах возмущающих объектов и элементах залегания их границ. Информация такого рода необходима для обоснованного выделения пластовых льдов на фоне других геологических и мерзлотных образований. Методи-

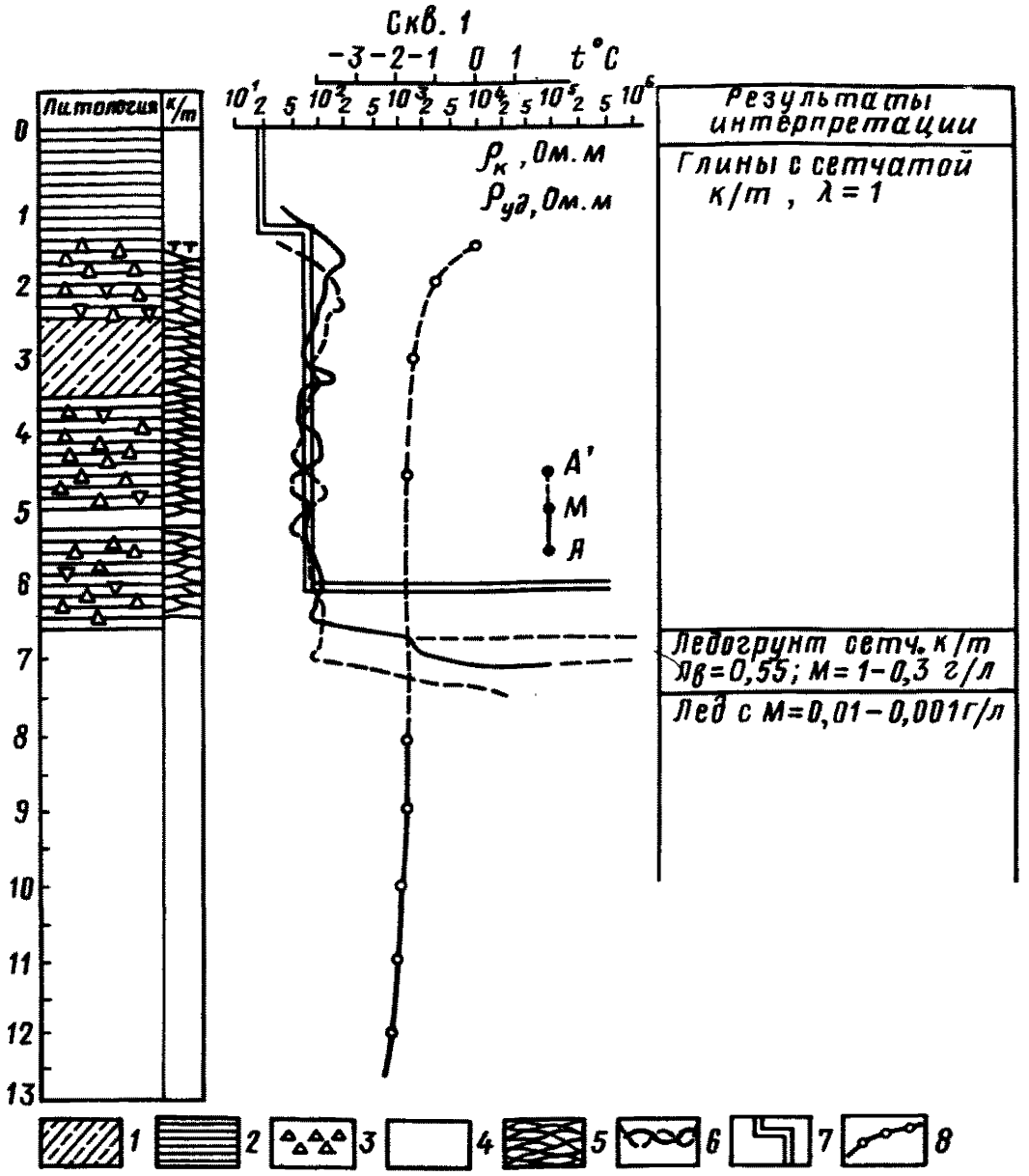


Рис. 38. Разрез скважины №1 вблизи ВЭЗ МДС №1
1 - суглинки; 2 - глины; 3 - ледяные включения; 4 - лед; 5 - криогенная текстура; 6 - графики $\rho_к$ установками $A'M$ и MA; 7 - диаграмма УЭС, полученная по данным интерпретации ВЭЗ; 8 - температурная кривая

ка проведения полевых работ и приемы интерпретации результатов наблюдений те же, что и при картировании сильнольдистых пород.

Пример 15 (рис. 37). На профиле, пересекающем подземные льды, различными операторами и в различное время было проведено непрерывное симметричное ЭП КС с тремя разносами питающих линий и двустороннее дипольное ЭП МДС. Даже поверхностный анализ полученных материалов убеждает в неэффективности любой модификации ЭП при поисках и картировании подземных льдов в рассматриваемых условиях. Неблагоприятное сочетание геологических факторов приводит к тому, что область распространения подземных льдов выделяется на графиках ЭП минимальными значениями $\rho_к(\Delta U_n/J)$ вопреки физическим предпосылкам. Незначительные на общем фоне повышения величин $\rho_к(\Delta U_n/J)$ имеют место на участках с неглубоким залеганием верхней границы льда или сильнольдистых пород.

2.58. Неопределенность получаемой с помощью ЭП информации выводит этот метод из числа основных при решении рассматриваемого класса задач. ЭП можно при-

менять для прослеживания отдельных геоэлектрических границ, природа которых установлена заранее с помощью гравиметрии или ВЭЗ МДС.

КАРТИРОВАНИЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

2.59. ЭП МДС и ВЭЗ МДС являются основными геофизическими методами, способными картировать повторно-жильные льды практически при любых условиях. В качестве вспомогательных методов могут быть привлечены гравиметрия и магнитометрия, если вмещающие лед породы обладают повышенной плотностью или магнитной восприимчивостью, а жилы льда имеют большие размеры.

2.60. ЭП МДС применяется для обнаружения в массиве жильных льдов и определения простирания их границ. Измерения следует производить симметричной установкой с двумя разносами приемных линий. Длина малых приемных линий должна быть меньше поперечных размеров жил, а длина больших - превышать их. Измерения ведутся в виде непрерывного профилирования с шагом, равным длине малой приемной линии. В целях повышения производительности работ азимутальные составляющие следует измерять только на больших приемных линиях. Расстояния между профилями выбираются с таким расчетом, чтобы каждый полигон, составляемый жилами различных простираний, пересекался хотя бы одним профилем.

2.61. Результаты измерений изображаются в виде графиков $\rho_к$ и $\Delta u_п/J$, которые строятся на каждом профиле для двух разносов приемных линий. Местоположение жил льда и видимые поперечные их размеры устанавливаются по характерным пересечениям пиков на графиках $\Delta u_t/J$, полученных для различных приемных линий. Простирание боковых границ жил льда и глубину залегания их верхней или нижней границы определяют с помощью специальных номограмм по соотношению амплитуд аномалий на графиках $\Delta u_t/J(\rho_к)$ и $\Delta u_п/J$, соответствующих одинаковым длинам приемных линий. По данным количественной интерпретации графиков ЭП МДС составляют сводную корреляционную схему для всего участка, на которой соединяют геоэлектрические границы жил, имеющих близкое простирание.

Пример 16 (рис. 39). В рассматриваемом случае картирование жильных льдов относилось к категории второстепенных задач, что предопределяло очевидное несоответствие размеров измерительной установки и шага наблюдений размерам и положению в разрезе искомых объектов. Положительные результаты в таких условиях служат признаком устойчивости получаемых решений.

Наблюдения по профилям производились симметричной установкой с AB = 60 м, MN = 20 м и шагом 20 м. Все измерения выполнены по методу двух составляющих с соблюдением рекомендуемых требований. Результаты профилирования представлены в виде графиков $\Delta u_t/J(\rho_к)$ и $\Delta u_п/J$. Их качественный анализ показывает, что в районе распространены два типа аномалий.

К первому относятся аномалии сравнительно большой протяженности по профилю. Аномалии высокого сопротивления связаны с участками, сложенными мерзлыми песками с температурой до -8°C (пикеты 63 - 81). Зоны пониженного сопротивления относятся к несквозным таликам под постоянными водотоками (пикеты 84 - 89). Простирание геоэлектрических границ, установленное в результате количественной интерпретации, с точностью до $\pm5^{\circ}$ совпадает с простиранием элементов рельефа, контролирующего распространение аномалеобразующих объектов (см. план простирания геоэлектрических границ на рис.39).

Второй тип аномалий представлен на графиках $\Delta u_t/J(\rho_к)$ локальными максимумами, характерными для непроводящих маломощных пластов. На графиках $\Delta u_п/J$ им отвечают знакопеременные локальные аномалии, свидетельствующие о встречном простирании этих пластов. По совокупности указанных признаков надежно выделяются пластовые льды. Количественная интерпретация аномалий такого вида, выполненная с помощью специальных номограмм, позволяет определить простирание каждой жилы с точностью до $\pm10^{\circ}$.

Для проверки геофизических данных были пройдены канавы вкрест простирания предполагаемых пластов высокого сопротивления на пикетах 54, 77-78 и 90. Все они обнаружили жильные льды, элементы залегания которых оказались в полном согласии с данными ЭП МДС.

2.62. ВЭЗ следует использовать для определения глубины залегания верхней границы отдельных жил, простирания их боковых границ, УЭС льда, а также для оценки общего строения мерзлой толщи, содержащей повторно-жильные льды. Учитывая сложную геоэлектрическую обстановку в области развития повторно-жильных льдов, все зондирования необходимо производить по методу двух составляющих, отдавая предпочтение двусторонним дипольным или трехэлектродным установкам.

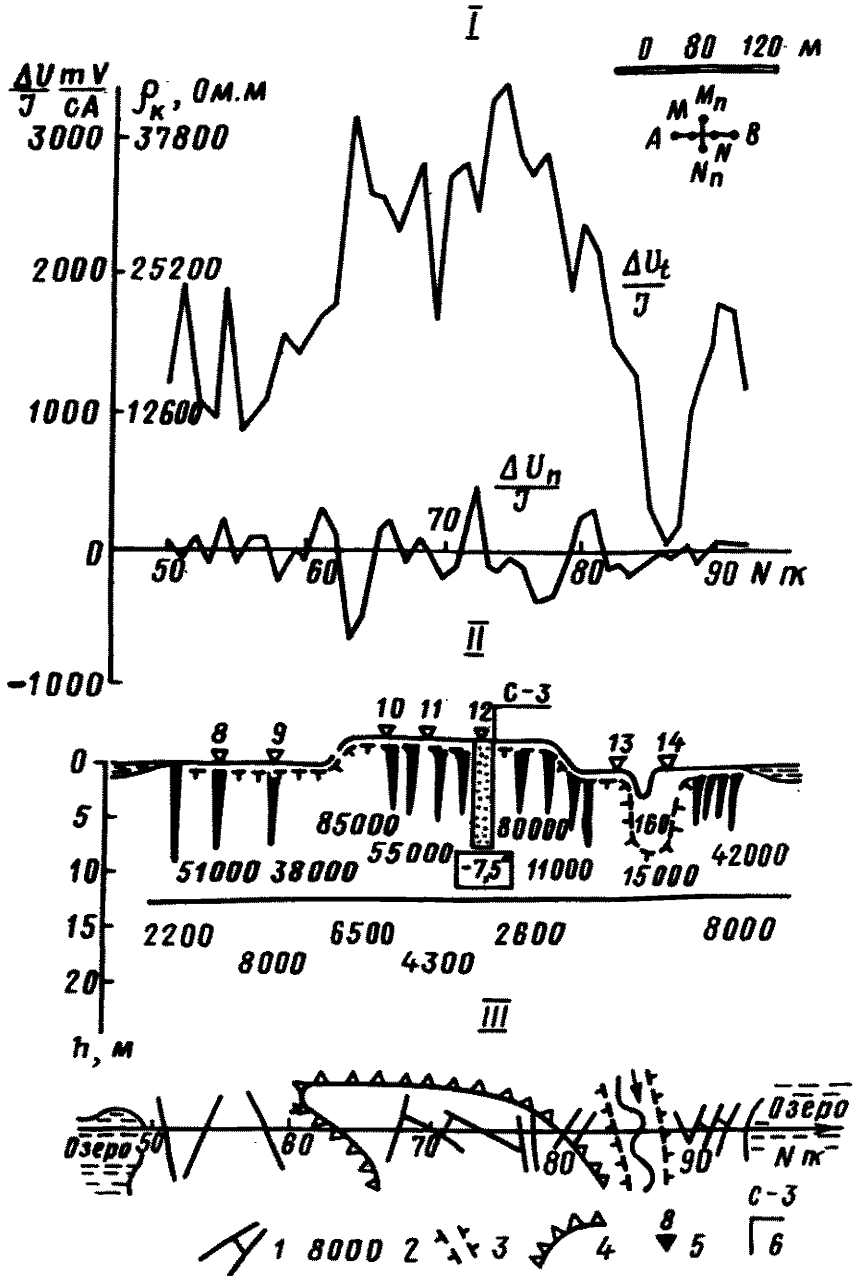


Рис. 39. Результаты ЭП и ВЭЗ МДС над мерзлой толщей, содержащей повторно-жильные льды
I - кривые симметричного ЭП МДС; II - геоэлектрический разрез; III - план простирания геоэлектрических границ - 1 - повторно-жильные льды; 2 - величины УЭС пород по данным интерпретации ВЭЗ МДС; 3 - верхняя граница мерзлоты; 4 - контуры останца первой террасы; 5 - точки ВЭЗ и их номера; 6 - скважины и их номера

Пункты зондирований размещаются либо строго над центром жил, либо между ними, для чего необходимо широко использовать данные ЭП МДС. Интерпретация кривых $\rho_к$ и $\Delta u_п/\Delta u_t$ ВЭЗ МДС производится методом особых точек с применением специальных номограмм.

Пример 17 (рис. 40). Кривые $\rho_к$ и $\Delta u_п/\Delta u_t$ симметричных ВЭЗ МДС получены над жилой льда (ВЭЗ № 8, пикет 54) и между жилами (ВЭЗ № 12, пикет 73) и относятся к участку, рассматривавшемуся в примере 16. Количественная интерпретация их дает следующие результаты.

ВЭЗ № 8, пикет 54. Аномалии на кривых $\rho_к$ и $\Delta u_п/\Delta u_t$ типичны для среды, содержащей непроводящую жилу бесконечного простирания вглубь. Пользуясь соответ-

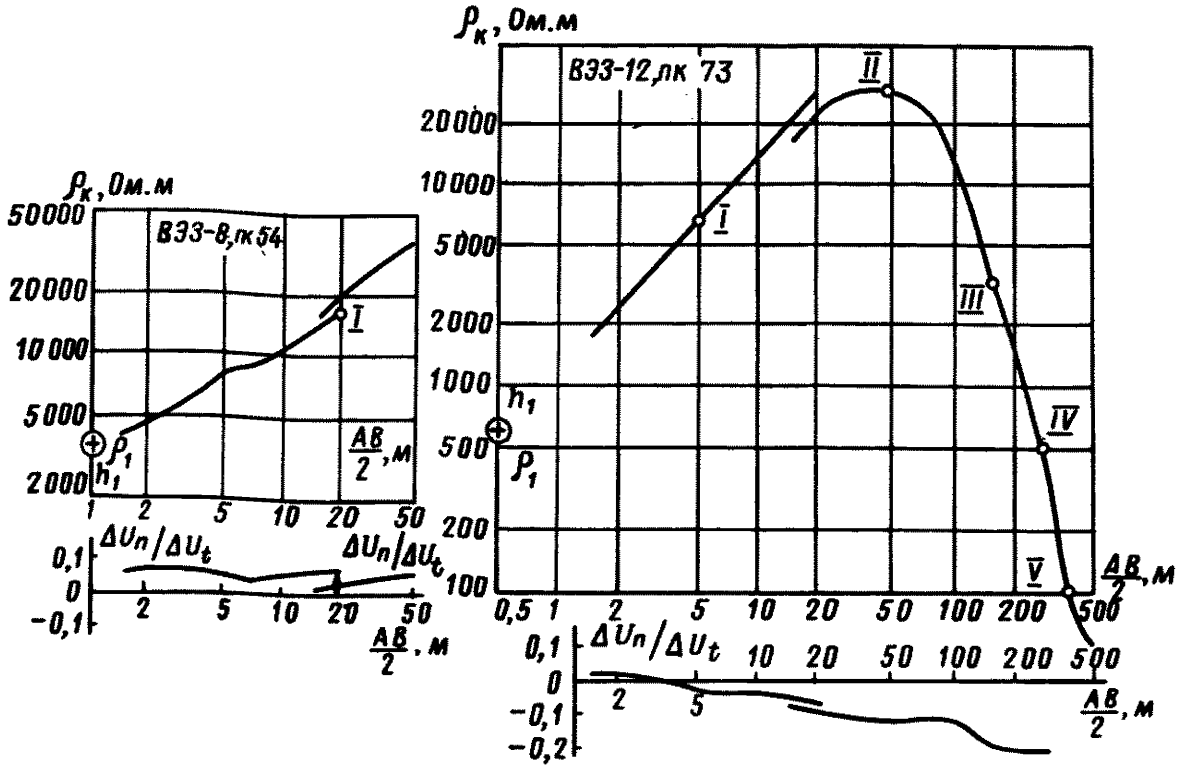


Рис. 40. Кривые симметричных ВЭЗ МДС над центром жилы (ВЭЗ №8) и между жилами льда (ВЭЗ № 12)

ствующими номограммами, находим строение массива в вертикальном направлении и элементы залегания боковых границ жилы:

h_1=1,05; $h_2=\infty$,
ρ_1=3500; ρ_2=350 000 , φ=96°.

Первый слой в разрезе представлен мерзлыми песками с массивной криогенной текстурой и температурой около -0,5° -1°С. Вторая среда может быть отнесена только к ультрапресному льду (М = 0,01 - 0,001 г/л), имеющему температуру не ниже -8°С. Это хорошо согласуется с реальным строением и свойствами мерзлой толщи в районе работ и данными ЭП МДС.

2.63. Гравиразведку и магниторазведку целесообразно применять когда толща, вмещающая повторно-жильные льды, обладает аномально высокими значениями плотности и магнитной восприимчивости. Измерения производятся на небольших площадках с соблюдением всех требований, предъявляемых к высокоточным съемкам. Пункты наблюдений размещаются равномерно по площади. В зависимости от поперечных размеров ледяных жил сеть наблюдений может меняться от 0,5х0,5 до 2х2 м. Результаты детальных съемок изображаются в виде карт равных значений ΔZ, ΔH или ΔT . Простирание основных систем жильных льдов устанавливается путем обработки карт методом касательных. Количественная интерпретация отдельных аномалий, выполненная любым из известных способов, позволяет определить поперечные размеры, глубину залегания верхней и нижней границ ледяных жил, а также плотность и магнитную восприимчивость вмещающих пород.

2.64. Совместное применение электроразведки МДС, гравиразведки или магниторазведки обеспечивает всестороннее изучение мерзлых толщ, содержащих повторно-жильные льды.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ МЕРЗЛОТНОЙ СЪЕМКЕ ПО СТАДИЯМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ВИДЫ СЪЕМОК

3.1. Вид съемки целиком определяется характером и размерами строительства. По этому признаку выделяют площадные съемки под локальные сооружения и съемки под линейные сооружения. Различия в условиях их проведения перечислены в табл. 13.

Таблица 13

Площадная съемка под локальные сооружения	Съемка под линейные сооружения
Изучению подлежат изометричные в плане площади, в пределах которых географо-геологические условия меняются в сравнительно узком диапазоне.	Исследования ведутся в пределах узкой полосы, вдоль который географо-геологические условия меняются весьма значительно.
Исследование строения акваторий имеет подчиненное значение. При этом обследуются, как правило, мелкие водоемы, возникающие или исчезающие в результате строительства	Изучение акваторий и прилегающих к ним территорий приобретает самостоятельное значение на переходах линейных сооружений через водоемы.

Эти различия во многом предопределяют специфику организации и проведения геофизических работ при различных видах мерзлотной, инженерно-геологической и гидрогеологической съемок.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

3.2. Независимо от вида съемки в ходе геофизических работ выделяются три периода: подготовительный, полевые работы и камеральная обработка полевых данных.

3.3. Подготовительный период предшествует полевым работам и состоит из:

сбора и обобщения имеющихся по району геолого-геофизических данных с целью выбора и обоснования рационального комплекса геофизических методов;

определения круга решаемых с помощью геофизических методов задач и масштаба геофизической съемки;

решения различных технических вопросов, касающихся обеспечения требуемой глубинности исследований, разрешающей способности и точности результатов измерений каждого включенного в комплекс с геофизического метода.

3.4. В ходе полевых работ изучают параметры геофизических полей в натуре, в последовательности, регламентируемой видом и масштабом мерзлотной съемки и спецификой мерзлотно-геологических условий в изучаемых районах. Все эти вопросы подробно рассматриваются в последующих главах.

3.5. Камеральный период завершает геофизические исследования и состоит из обработки результатов полевых наблюдений, их геофизической интерпретации, мерзлотно-геологического истолкования и передачи окончательных данных для использования при составлении отчетных мерзлотно-геологических карт, а также в качестве исходного материала для специальных расчетов при проектировании.

ОТЧЕТ О РЕЗУЛЬТАТАХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

3.6. Составлением этого документа завершаются геофизические работы. В отчете должны быть обязательно освещены:

геоморфологические, геологические и мерзлотно-гидрогеологические условия в районе работ;

геолого-геофизическая изученность района работ;

круг решаемых задач мерзлотной съемки, обоснование применяемого комплекса геофизических методов и детальности работ;

методика полевых работ каждым методом (сеть наблюдений, способ измерений, техника и аппаратура) с обязательным указанием точности измерений;

краткое описание фактического материала и обоснование выбора способов качественной и количественной интерпретации геофизических данных по методам и их мерзлотно-геологическая привязка; степень неоднозначности решений и оценка их вероятности и точности в каждом конкретном случае;

совместный анализ результатов интерпретации данных всех методов; обоснование устранения неоднозначности решений и повышения точности их; описание принципов составления отчетных геолого-геофизических карт и разрезов к ним; краткие комментарии к окончательным результатам;

заключение с рекомендациями по использованию окончательных геофизических материалов.

В приложении к отчету в обязательном порядке должны быть помещены:

карта фактического материала;

фактический материал в виде кривых или карт изменения геофизических параметров по профилям (маршрутам) или площадям;

результаты качественной и количественной интерпретации фактического материала в виде сводных таблиц или графиков;

окончательные карты, разрезы и таблицы к ним.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ СЪЕМКЕ ПЛОЩАДЕЙ

3.7. По целевому назначению и стадиям проектирования мерзлотные и инженерно-геологические съемки делятся на:

рекогносцировочную (стадия технического обоснования или ТО);

крупномасштабную (стадия технического проекта или ТП);

разведку строительных площадок (стадия рабочих чертежей или РЧ).

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНАЯ СЪЕМКА (ТО)

3.8. Этот вид изысканий проводится на больших территориях с целью общей оценки инженерно-геологических условий и выбора участков, наиболее перспективных для размещения проектируемых сооружений. В основе рекогносцировочной съемки лежит районирование изучаемой территории по комплексу природных факторов. В каждом выделенном районе или группе районов намечаются участки, соответствующие виду строительства. Масштаб рекогносцировочных съемок может меняться от 1:100 000 до 1:200 000.

3.9. Основной целью комплексных геофизических работ на стадии ТО является уточнение мерзлотно-геологических условий в пределах районов, выделенных в процессе мерзлотной съемки. Наблюдения производятся, как правило, по отдельным профилям (маршрутам), пересекающим один или несколько районов. Количество и протяженность профилей, а также шаг измерений выбираются в соответствии с особенностями мерзлотно-гидрогеологической обстановки в изучаемых районах и кругом решаемых задач. В любом случае детальность геофизических работ должна быть как минимум на порядок выше масштаба мерзлотной съемки.

3.10. Сочетание геофизических методов и последовательность их применения на стадии ТО во многом определяются комплексом природных факторов, которые на обширной территории могут изменяться в широких пределах. С этих позиций удобно выделить две группы районов, отличающихся друг от друга мощностью чехла рыхлых пород. В первую следует отнести районы с мощными (более 20 м) покровными отложениями, а во вторую - с неглубоким (до 2-10 м) залеганием скального основания.

3.11. При мерзлотной съемке районов с мощным чехлом рыхлых отложений в первую очередь необходимо определить состав, температуру и льдистость (влажность) пород. В районах распространения островной и прерывистой мерзлоты основное внимание уделяется картированию границ талых и мерзлых пород, определению их состава, температуры и льдистости (влажности). Поиски и изучение сильнольдистых пород и подземных льдов, а также всестороннее изучение таликов всех типов становятся первостепенными в условиях сплошного распространения мерзлоты.

3.12. Геофизические работы в районах с островным и прерывистым распространением мерзлоты должны состоять из ЭП, ВЭЗ и комплексного каротажа скважин. Сейсморазведка и гравиметрия применяются в ограниченном объеме при решении специальных задач, связанных с определением глубины залегания УГВ в сквозных и несквозных таликах, мощности торфяников, размеров и льдистости бугров пучения. Все электроразведочные работы на стадии ТО производятся по методу двух составляющих, так как в каждом районе необходимо получить максимум информации по результатам измерений на одном профиле.

3.13. На первом этапе проводится ЭП МДС с целью изучения изменчивости геоэлектрических условий в заданном направлении. Схемы измерительных установок, их размеры и шаг наблюдений по профилю устанавливаются в соответствии с особенностями мерзлотно-геологического строения района работ и кругом решаемых задач. ЭП целесообразно сопровождать микрорайонированием прилегающей к профилю территории с целью сбора сведений для предварительной мерзлотно-геологической привязки обнаруженных геоэлектрических аномалий. На отрезках профиля, пересекающих мощные торфяники или бугры пучения, следует выполнить высокоточную гравиметрическую съемку с более детальным по сравнению с ЭП шагом.

3.14. ВЭЗ МДС выполняется после ЭП для определения строения массива по вертикали в области выявленных с помощью ЭП аномалий. ВЭЗ необходимо производить двусторонними трехэлектродными или дипольными установками, прибегая к симметричным только в простых случаях. Максимальные разносы питающих линий выбираются так, чтобы обеспечивалась требуемая глубинность исследований. Однако в любом случае следует предусмотреть увеличение разносов питающих линий до значений, достаточных для определения мощности мерзлой толщи на отдельных участках. Пункты ВЭЗ размещаются на профиле, по данным ЭП или микрорайонирования, так, чтобы все основные типы аномалий на графиках ЭП или основные типы микрорайонов были охарактеризованы в краевых и центральных частях. На участках талых пород и особенно в пределах широких несквозных таликов следует проводить сейсмическое профилирование для изучения их обводненности.

3.15. По данным предварительной интерпретации кривых ЭП МДС, типичных ВЭЗ МДС, и сейсмограмм в полевых условиях составляются схематические геоэлектрические разрезы, которые используются для определения места заложения опорных (контрольных) скважин и горных выработок. Желательно, чтобы часть скважин располагалась вблизи пунктов ВЭЗ с целью получения всесторонней информации, относящейся к одному и тому же массиву пород.

3.16. Комплексный каротаж должен проводиться во всех доступных для измерения скважинах. Он должен состоять из электрического (КС), сейсмоакустического (АК) каротажа и термометрии. Необходимо все виды каротажа выполнять одновременно или с небольшим разрывом во времени.

3.17. По результатам окончательной качественной и количественной интерпретации всех геофизических данных строят комплексные геолого-геофизические разрезы по профилям и планы простирания геофизических границ к ним. На геоэлектрические разрезы выносят все выявленные геофизические границы, выделяют блоки, в пределах которых массив пород обладает одинаковыми физическими свойствами, и проставляются величины в последних.

3.18. В районах сплошного распространения мерзлоты комплекс геофизических методов должен состоять из ЭП, ВЭЗ, гравиметрии и комплексного каротажа скважин. Область применения наземной сейсморазведки ограничивается изучением широких таликов.

3.19. На первом этапе геофизических работ производят ЭП МДС и гравиметрию, основной задачей которых является картирование боковых границ таликов, повторно-жильных льдов, участков с сильнольдистыми породами и крупными скоплениями подземных льдов. ЭП МДС следует выполнять на профилях или на отдельных отрезках, пересекающих талики или площади распространения повторно-жильных льдов. В зависимости от объекта исследований могут быть использованы симметричные, двусторонние дипольные или трехэлектродные установки, размеры которых подбирают в соответствии с решаемыми задачами. Гравиметрические измерения производят на участках, где профиль проходит над сильнольдистыми породами или скоплениями подземных льдов.

3.20. ВЭЗ МДС выполняются в пределах аномалий, выявленных с помощью ЭП МДС и гравиметрии. Измерения производятся двусторонними трехэлектродными или дипольными установками. Максимальные разносы их подбирают таким образом, чтобы наряду с решением основных поставленных задач можно было оценить мощность мерзлой толщи в отдельных пунктах. Часть кривых ВЭЗ МДС интерпретируется в поле с целью предварительной оценки строения массива пород и более точного размещения буровых скважин и горных выработок.

3.21. Комплексный каротаж скважин должен включать КС, АК и термометрию. Условия проведения работ те же, что и в районах с островным распространением мерзлых пород.

3.22. Результаты окончательной качественной и количественной интерпретации полученных данных представляются в виде комплексных геолого-геофизических разрезов и планов простирания геофизических границ, на которые выносят всю полученную информацию о разрезе в цифровой или графической форме.

3.23. При мерзлотной съемке районов с неглубоким залеганием скальных пород основными становятся задачи, связанные с определением мощности рыхлых отложений; состава, температуры и условий залегания скальных пород; распространения и мощности коры выветривания в них; степени трещиноватости и обводненности (льдистости) скальных пород по тектоническим нарушениям. Круг перечисленных выше задач достаточно полно решается с помощью комплекса методов, состоящего из ЭП МДС, ВЭЗ МДС, наземной сейсморазведки и комплексного каротажа скважин. Магниторазведку и гравиразведку следует применять в качестве вспомогательных методов для решения отдельных задач, связанных с изучением формы и размеров переуглублений в кровле коренных пород и определением их состава.

3.24. Геофизические работы целесообразно начинать с ЭП МДС, дополнив его в случае необходимости магниторазведкой или гравиметрией. ЭП МДС производится с помощью двусторонних дипольных или трехэлектродных установок, размеры которых должны как минимум в 10 раз превышать мощность рыхлых отложений. По получаемым данным в полевой период следует установить хотя бы приблизительное положение границ участков с различной мощностью рыхлых отложений, контактов между скальными породами различного состава и различной степени трещиноватости. Эти предварительные сведения используются для более точного размещения пунктов зондирования и сейсмического профилирования.

3.25. ВЭЗ МДС производится двусторонними дипольными или трехэлектродными установками, размеры которых выбираются так, чтобы можно было определить строение и свойства верхней части разреза по всей площади и мощность мерзлой толщи в отдельных пунктах. Над центрами трещиноватых зон необходимо выполнять крестовые ВЭЗ МДС с целью определения простирания основной системы трещин и соотношения суммарных мощностей разрушенных и сохранившихся прослоев пород. Сейсмическое профилирование производится на участках с мощным чехлом рыхлых отложений или коры выветривания, а также в пределах широких зон трещиноватости. Наиболее характерные кривые ВЭЗ МДС и сейсмические профили подвергаются обработке и интерпретации еще в полевой период с целью получения исходных данных для заложения скважин и горных выработок.

3.26. В обводненных или заполненных буровым раствором скважинах производятся термометрия, каротаж КС и ПС, резистивиметрия и АК стандартными для района работ зондами. В сухих необсаженных скважинах комплексный каротаж сокращается до КС и АК зондами, предусматривающими непосредственный контакт датчиков со стенками скважин. Каротажные диаграммы обрабатываются и интерпретируются по стандартной методике.

3.27. Результаты окончательной качественной и количественной интерпретации всех геофизических данных изображаются в виде разрезов и планов простирания геолого-геофизических границ. На них выносится вся полученная информация в графической, цифровой и табличной форме.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СЪЕМКА НА СТАДИИ ТП

3.28. Крупномасштабная съемка имеет своей целью общую оценку мерзлотных и инженерно-геологических условий на ограниченных территориях, намеченных под локальное строительство. При этом виде съемки требуется детальное изучение всей площади с высокой точностью картирования границ участков (микрорайонов) с различным мерзлотным и гидрогеологическим строением. Одной из основных задач этого вида съемок является сбор сведений о состоянии окружающей среды на момент времени, предшествующий освоению территории в связи со строительством и эксплуатацией проектируемых сооружений. На основе этих сведений, дополненных данными последующих режимных наблюдений, разрабатываются мероприятия по сохранению окружающей среды и улучшению отдельных ее компонентов.

3.29. Масштаб площадных съемок может меняться от 1:10 000 до 1:50 000 в зависимости от типа проектируемого сооружения и суммы воздействующих на него природных факторов. Горно-буровые и геофизические работы проводятся по всей площади съемки. Максимальный эффект при изысканиях достигается, когда геофизические работы опережают горно-буровые.

3.30. При определении стандартного комплекса геофизических методов следует исходить из особенностей мерзлотной и гидрогеологической ситуации в районе съемки. По этому признаку могут быть выделены районы с мощным чехлом рыхлых отложений и островным, прерывистым или сплошным распространением мерзлоты, а также районы с неглубоким залеганием скального основания. Особую группу составляют акватории.

При островном и прерывистом распространении мерзлоты основными задачами являются картирование границ талых и мерзлых пород, определение их состава, строения льдистости (влажности), а также мощности мерзлой толщи. Эти задачи решаются наземной электроразведкой, комплексным каротажем скважин (основные методы), сейсморазведкой и гравиметрией (вспомогательные методы).

3.31. ЭП должно предшествовать всем видам работ, за исключением микрорайонирования. В задачи ЭП входит обнаружение и непрерывное прослеживание по площади границ микрорайонов и контактов талых и мерзлых пород.

3.32. В простых геоэлектрических условиях следует применять точечное или непрерывное ЭП КС симметричными установками с двумя разносами питающей линии. Расстояние между профилями должно составлять 100 м при съемке в масштабе 1:10 000 и 250-500 м при съемке в масштабе: 1:5 000. Шаг наблюдений по профилю может меняться от 10 до 100 м в зависимости от масштаба съемки.

3.33. В осложненных геоэлектрических условиях должно проводиться непрерывное ЭП КС или ЭП МДС. При непрерывном ЭП КС используются симметричные установки. ЭП МДС следует выполнять симметричными установками при картировании островной мерзлоты и двусторонними дипольными или трехэлектродными - при изучении прерывистой мерзлоты. В этом случае шаг наблюдений по профилям остается тем же, что и при ЭП КС. Расстояние между профилями может быть увеличено в 1,5-2 раза без ущерба для точности получаемой информации.

3.34. В сложных геоэлектрических условиях необходимо применять только ЭП МДС двусторонними дипольными трехэлектродными установками. При этом сеть наблюдений должна составлять 10х100 м в масштабе съемки 1:10 000, 25х250 м - в масштабе 1:25 000 и 50х500 м - в масштабе 1:50 000.

3.35. ВЭЗ имеют своей целью изучение состава, строения, влажности (льдистости) и мощности талых и мерзлых пород в пределах выделенных микрорайонов. Точки ВЭЗ располагаются на местности по данным ЭП и микрорайонирования с таким расчетом, чтобы были охарактеризованы краевые и центральные части выделенных микрорайонов. Таким образом, объем работ методом ВЭЗ регламентируется в первую очередь количеством микрорайонов, число которых зависит от степени сложности мерзлотно-геологических условий в изучаемом районе.

3.36. ВЭЗ КС можно применять для изучения крупных микрорайонов, характеризующихся простыми геоэлектрическими условиями. Центры зондирования необходимо размещать в середине каждого микрорайона. При измерениях следует использовать симметричные установки. Во всех остальных случаях зондирование необходимо выполнять двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих. Максимальные разносы питающих линий любых установок должны обеспечивать определение мощности мерзлой толщи в районе работ.

3.37. Наземная сейсморазведка и гравиметрия производятся по отдельным профилям там, где требуется уточнение гидрогеологической обстановки или изучение распространения сильнольдистых пород или подземных льдов. Длина профилей и шаг наблюдений по ним устанавливаются в каждом конкретном случае индивидуально, исходя из специфики мерзлотно-геологических условий.

3.38. Материалы ЭП, ВЭЗ, сейсморазведки и гравиразведки должны проходить первичную обработку и предварительную интерпретацию в поле с тем, чтобы их можно было использовать при размещении опорных буровых скважин и горных выработок. При этом часть скважин необходимо задавать вблизи центров ВЭЗ, расположенных в наиболее типичных для района условиях.

3.39. Комплексный каротаж скважин, пройденных в рыхлых породах, должен состоять из термометрии, КС и АК зондами, обеспечивающими непосредственный контакт датчиков со стенками скважин. Результаты каротажа обрабатывают и интерпретируют по стандартной методике.

3.40. В камеральный период производится окончательная качественная и количественная интерпретация всех геофизических данных. Отчетным материалом являются частные, построенные по данным одного метода, и сводные геолого-геофизические карты и разрезы к ним. На картах с помощью изолиний или других принятых обозначений показывают границы микрорайонов и мерзлоты, состав талых и мерзлых пород, глубину залегания кровли мерзлоты в пределах несквозных таликов и ее подошвы на всей территории. На геолого-геофизические разрезы выносят геологические, мерзлотные и гидрогеологические границы и указывают в цифровой или табличной форме параметры физических свойств талых и мерзлых пород.

3.41. При сплошном распространении мерзлых пород на первое место ставят задачи, связанные с картированием границ микрорайонов, отличающихся друг от друга по составу и льдистости пород, форме и размерам льдовыделений, степени развития сети несквозных таликов. Большинство из перечисленных выше признаков не находит своего отражения в поверхностных условиях, в связи с чем роль геофизических методов возрастает при изучении их в ходе крупномасштабной мерзлотной съемки. Принимая во внимание круг решаемых задач, комплекс геофизических методов должен включать электроразведку МДС, гравиметрию, комплексный каротаж скважин. Сейсморазведку и магниторазведку следует считать вспомогательными методами.

3.42. На первом этапе съемки картируют границы микрорайонов, для чего используют ЭП МДС, гравиметрию и микрорайонирование. ЭП МДС применяют на участках, в разрезе которых присутствуют повторно-жильные льды или породы с переменной льдистостью и температурой. Применение гравиметрии ограничивается районами с крупными скоплениями подземных льдов в верхней части разреза.

3.43. ЭП МДС производится дипольными или трехэлектродными двусторонними установками. Симметричные установки с одним разносом приемной линии используют только при картировании повторно-жильных льдов. Сеть наблюдений составляет 10х х100 м при съемке в масштабе 1:10 000, 25х250 м - в масштабе 1:25 000 и 50х500 м - в масштабе 1:50 000. На участках с повторно-жильными льдами сеть наблюдений сгущается соответственно до 2х100, 2х250 и 2х500 м. В этом случае на опорных отрезках профилей необходимо провести измерения с двумя разносами приемных линий с шагом 0,5 м с целью определения поперечных размеров жил в различных системах. Гравиметрические наблюдения выполняют по той же сети, что и ЭП МДС, с соблюдением всех требований, предъявляемых к высокоточной съемке. Предварительные результаты ЭП МДС и гравиметрических измерений используют для размещения точек ВЭЗ и буровых скважин на местности.

3.44. ВЭЗ МДС производят на втором этапе съемки двусторонними трехэлектродными или дипольными установками. Симметричные ВЭЗ МДС применяют только при изучении повторно-жильных льдов. Пункты зондирования размещают на местности, по данным ЭП МДС, гравиметрии микрорайонирования, с таким расчетом, чтобы каждый элемент микрорайона был охарактеризован в краевой и центральной частях. В этот же период проводят сейсмические и магниторазведочные работы на отдельных профилях, если в этом есть необходимость и существуют реальные предпосылки для их применения. Предварительная обработка данных ВЭЗ МДС и составление схематических разрезов в полевых условиях позволяют получить сведения, необходимые для более точного размещения буровых скважин и горных выработок. Чтобы полнее охарактеризовать льдистость и анизотропию мерзлых пород, буровые скважины необходимо проходить рядом с точками ВЭЗ.

3.45. Все доступные для измерений скважины должны быть прокаротированы. Комплекс методов должен включать термометрию, каротаж КС и АК. Результаты наблюдений изображают в виде диаграмм и интерпретируют стандартными приемами.

3.46. В камеральный период производится окончательная обработка и интерпретация всех полученных геофизических данных. Результаты интерпретации представляют в виде карт, на которых изолиниями или другими условными обозначениями показывают границы участков с различной температурой и льдистостью. Дополнительно могут быть составлены карты, отражающие изменение состава пород и мощности мерзлой толщи на изучаемых площадях. Все карты должны сопровождаться геолого-геофизическими разрезами, на которые выносят все установленные мерзлотно-геологические границы и сведения о физических свойствах пород в пределах их.

3.47. При неглубоком залегании скальных пород основными задачами, которые могут быть решены с помощью геофизических методов, являются определение мощности и состава рыхлых отложений; расчленение скальных пород по составу, степени их трещиноватости и обводненности (льдистости); изучение распространения и мощности мерзлых пород. Большинство из картируемых признаков не находят своего отражения в поверхностных условиях, вследствие чего роль и объемы геофизических работ в таких районах резко возрастают. В условиях широкого развития скальных пород наиболее полная информация может быть получена с помощью комплекса методов, включающего электроразведку МДС и комплексный каротаж скважин. Сейсморазведка, гравиметрия и магнитометрия могут быть привлечены в качестве основных методов только в благоприятных условиях.

3.48. Геофизические работы целесообразно начинать с ЭП МДС, которое дает основной объем информации о местоположении наклонных границ и их элементах залегания. ЭП МДС следует выполнять двусторонними дипольными или трехэлектродными установками, поскольку для районов с неглубоким залеганием скальных пород

характерны сложные геоэлектрические условия. Измерения ведутся по сети профилей, расстояния между которыми должны составлять 100-200 м при съемке в масштабе 1:10 000, 250-500 м - в масштабе 1:25 000 и 500-1000 м - в масштабе 1:50 000. Шаг наблюдений по профилям зависит от мерзлотно-геологической ситуации в исследуемом районе и должен быть не более 20 м при съемке в масштабе 1:10 000, 25-50 м - в масштабе 1:25 000 и 100-500 м - в масштабе 1:50 000. В сложных геоэлектрических условиях шаг соответственно уменьшается до 5-10, 10-20 и 20-50 м. Магнитная и гравиметрическая съемки производятся после ЭП МДС по той же сети.

3.49. ВЭЗ МДС применяют для определения строения и геоэлектрических параметров толщи пород в краевых и центральных частях выявленных геофизических аномалий и выполняются на втором этапе. Измерения производят двусторонними трехэлектродными или дипольными установками, максимальные разносы которых подбирают так, чтобы обеспечивалось определение мощности рыхлых отложений, коры выветривания и мерзлоты. В центре зон, обладающих, по данным ЭП МДС, анизотропией, необходимо ставить крестовые ВЭЗ МДС для определения простирания трещиноватости или слоистости и коэффициента анизотропии толщи.

3.50. Сейсморазведка применяется для решения тех же задач, что и ВЭЗ МДС, если для этого существуют физические предпосылки. Она выполняется в виде непрерывного профилирования с получением систем встречных и нагоняющих годографов по сети профилей. Расстояние между пунктами возбуждения колебаний и шаг наблюдений по профилю регламентируются мощностью рыхлых отложений и коры выветривания. В таких случаях роль ВЭЗ МДС сводится к определению мощности мерзлой толщи, а объемы работ этим методом сокращаются.

3.51. Результаты наземных геофизических съемок должны пройти первичную обработку и интерпретацию в полевых условиях. Буровые скважины и горные выработки задаются с учетом геофизических данных.

3.52. Окончательная обработка и интерпретация геофизических материалов производятся в камеральный период. Результаты интерпретации изображаются в виде специальных карт и разрезов к ним. К их числу принадлежат карты мощности, состава и льдистости рыхлых отложений и коры выветривания; карты состава и строения скальных пород; карты мощности мерзлоты; карты распространения трещиноватых и обводненных зон.

3.53. Геофизические работы на акваториях преследуют решение таких задач, как определение формы и размеров таликов под ними, состава, строения и мощности талых и мерзлых пород. При изучении мелких водоемов основными методами являются ЭП КС и ВЭЗ КС донными установками. Крупные судоходные акватории должны быть обследованы с помощью геозвуколокации. Донные ВЭЗ в этом случае являются вспомогательным методом и используются для привязки результатов геозвуколокации.

3.54. Донное зондирование осуществляют двусторонними трехэлектродными или дипольными установками методом КС. Величины разносов питающих и приемных электродов выбирают в соответствии с продольными размерами водоемов и требуемой глубинностью исследований. При изучении протяженных водоемов точки зондирований располагаются вдоль оси. В этом же направлении разносятся питающие и приемные электроды. Водоемы с большими поперечными размерами обследуют по системе профилей, расстояния между которыми должны быть: 100-200 м при съемке в масштабе 1:10 000, 250-500 м - в масштабе 1:25 000 и 500-1000 м - в масштабе 1:50 000. Шаг наблюдений по профилям не должен превышать длины максимальных разносов питающих электродов. Все измерения должны сопровождаться промерами глубин водоемов и определениями УЭС воды на каждом пункте наблюдения.

3.55. Кривые $\rho_к$ донных зондирований подвергаются количественной интерпретации, результаты которой изображаются в виде геоэлектрических разрезов по профилям. Если наблюдения выполнены по сети профилей, отчетными материалами являются карты глубин залегания дна водоемов, кровли и подошвы мерзлоты, а также карты состава, строения и льдистости талых и мерзлых пород. Ко всем картам должны быть приложены геоэлектрические разрезы.

РАЗВЕДКА ПЛОЩАДОК НА СТАДИИ РЧ

3.56. Детальные исследования на стадии разведки строительных площадок строго специализированы и должны давать ответ на конкретные вопросы, касающиеся особенностей геологического, мерзлотного или гидрогеологического строения сравнительно небольших площадей. Масштаб съемок может меняться от 1:500 до 1:5000 в зависимости от размеров проектирующих сооружений и специфики мерзлотно-гео-

логических условий. При детальных съемках предъявляются повышенные требования к точности результатов, что достигается увеличением объема геофизических и горно-буровых работ.

3.57. При разведке площадок круг решаемых задач значительно сужается. Это делает возможным подбор эффективного комплекса геофизических методов для каждого конкретного случая. Основные из них рассмотрены во втором разделе.

3.58. ЭП КС применяется в простых условиях и выполняется по сети профилей, ориентированным вкрест простирания предполагаемых геоэлектрических границ. Сеть наблюдений не должна превышать: 2x10 м при съемке в масштабе 1:500, 5x20 м - в масштабе 1:2000 и 10x50 м - в масштабе 1:5000. ЭП МДС применяется в сложных геоэлектрических условиях. В этом случае сеть профилей может быть разрежена до 2x25, 5x50 и 10x100 м в соответствующих масштабах. Ориентировка профилей на местности может быть произвольной, что имеет большое значение при разведке в сложных геоморфологических условиях, а также залесенных или застроенных территорий.

3.59. Принимая во внимание высокие требования к надежности и точности результатов изысканий, зондирование необходимо выполнять двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих. Количество точек ВЭЗ МДС определяется размерами строительных площадок и степенью сложности мерзлотно-геологического строения района работ. Пункты зондирований размещаются на местности так, чтобы были охарактеризованы краевые и центральные части всех геофизических аномалий. Направление разносов питающих линий на каждом пункте зондирований выбирается так, чтобы обеспечивалась заданная глубинность исследований при существующих помехах со стороны рельефа, растительности или строений. При разведке в сложных геоэлектрических условиях необходимо предусматривать проведение крестовых ВЭЗ МДС с целью устранения неоднозначности решений и повышения их точности. Количество крестовых ВЭЗ МДС должно составлять не менее 10% всего количества рядовых зондирований.

3.60. Наземную сейсморазведку применяют при наличии благоприятных физических предпосылок. В этом случае объем ВЭЗ МДС сокращается и круг решаемых с их помощью задач ограничивается определением мощности мерзлых пород.

3.61. Магнитная и гравиметрическая микросъемки производятся на отдельных площадках по равномерной сети, размеры которой меняются от 0,5x0,5 м при съемке в масштабе 1:500 до 5x5 м - в масштабе 1:5000.

СЪЕМКА ПОД ЛИНЕЙНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

3.62. Специфика изысканий под линейные сооружения такова, что применение геофизических методов становится рентабельным только на стадиях ТП и РЧ.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СЪЕМКИ НА СТАДИИ ТП

3.63. На этой стадии требуется детальное изучение широкой полосы (до 1-2 км) вдоль проектируемой трассы с высокой точностью картирования границ участков с различными мерзлотно-геологическими условиями. Особое внимание уделяется всестороннему изучению окружающей среды в пределах полосы строительства с тем, чтобы в дальнейшем можно было оценить направление изменения равновесия во взаимодействии природных факторов при хозяйственном освоении территории и своевременно наметить мероприятия по устранению вредных отклонений от нормы. Горно-буровые работы и геофизические исследования на стадии ТП проводятся по оси трассы и на поперечниках к ней, вследствие чего их объем всегда бывает значительным. Максимальный эффект при изысканиях достигается, когда геофизические работы предшествуют горно-буровым.

3.64. Протяженные трассы могут пересекать районы с существенно различными мерзлотно-геологическими условиями, что требует применения различных сочетаний геофизических методов на различных их отрезках. Следует выделить районы с мощным чехлом рыхлых отложений и районы с неглубоким залеганием скальных пород.

3.65. Геофизические исследования должны состоять из ЭП, ВЭЗ и комплексного каротажа скважин при изысканиях на отрезках трасс, проходящих по районам с мощным чехлом рыхлых отложений и островным или прерывистым распространением мерзлоты. Наземная сейсморазведка, магнитометрия и гравиметрия могут быть использованы в благоприятных для их применения условиях.

3.66. ЭП применяется для уточнения границ микрорайонов с различными мерзлотно-геологическими условиями. Измерения выполняют по оси трасс и попереч-

никами, которые задают в количестве, меняющемся от одной до двух-трех в каждом микрорайоне.

3.67. В простых геоэлектрических условиях достаточно производить точечное ЭП КС симметричными установками с двумя разносами питающих линий. Наблюдения по трассам и поперечникам выполняют с шагом 25 или 50 м.

3.68. В осложненных и сложных геоэлектрических условиях необходимо переходить к непрерывному ЭП КС или ЭП МДС симметричной установкой. В этом случае количество разносов питающих электродов сокращается до одного, длина питающей линии несколько увеличивается, а шаг наблюдений по трассам и поперечникам сокращается до 10-20 м при съемке в масштабе 1:25 000 и до 25-50 м - в масштабе 1:50 000.

3.69. Пункты ВЭЗ размещаются преимущественно на оси трасс в краевых и центральных частях микрорайонов, выделенных по данным ЭП ландшафтной съемки. В любом случае количество ВЭЗ не должно быть менее двух-трех на 1 км трассы. Все зондирования должны выполняться двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих. К симметричным установкам можно прибегать только в простых геоэлектрических условиях. Максимальные разносы питающих линий ВЭЗ подбирают в соответствии с требуемой глубинностью исследований. При этом следует предусматривать необходимость определения мощности мерзлой толщи в центральных частях микрорайонов.

3.70. Опорные буровые скважины целесообразно задавать в краевых и центральных частях микрорайонов вблизи точек ВЭЗ. Это позволяет получать максимум информации о мерзлотно-геологическом строении каждого микрорайона в целом.

3.71. Геофизические исследования в скважинах состоят из термометрии и каротажа КС и АК. Методика их проведения та же, что и при площадных съемках.

3.72. Наземная сейсморазведка, применяется на отдельных участках трасс с целью определения УГВ в талых породах и таликах. Методика измерений стандартная.

3.73. Гравиметрию следует применять для изучения строения крупных торфяников, бугров пучения и наледей. Измерения ведутся вдоль оси трассы в виде профильной съемки с полным повторением точек. Окончательные результаты представляют в относительной редукции.

3.74. Окончательная обработка и интерпретация материалов комплексных геофизических работ производится в камеральный период. Результаты изображают в виде геолого-геофизического разреза по оси трассы, на которых выносятся все выявленные геофизические границы. Там же в графической и цифровой форме показывают состав, льдистость и физические свойства пород. Геолого-геофизический разрез должен сопровождаться планом простирания границ микрорайонов и выделенных геофизических границ, для чего широко используют данные по поперечникам.

3.75. На отрезках трасс со сплошным распространением мерзлоты основной комплекс методов состоит из ЭП МДС, ВЭЗ МДС и гравиметрии. Наземная сейсморазведка и магниторазведка используются в качестве вспомогательных методов для решения частных задач при наличии благоприятных физических предпосылок.

3.76. С помощью ЭП МДС изучают участки трасс, предположительно сложенные мерзлыми породами с переменными составом, льдистостью и температурой. Измерения ведутся по оси трассы и поперечникам двусторонними дипольными или трехэлектродными установками. Размеры питающих линий подбирают так, чтобы наблюдения можно было осуществлять с шагом 25 м при съемке в масштабе 1:25 000 и 50 м - в масштабе 1:50 000. Размеры установок и шаг наблюдений уменьшаются на отрезках трасс и поперечников, пересекающих участки с полигональными (повторно-жильными) льдами.

3.77. Гравиметрия применяется на отрезках трасс и поперечников, проходящих над крупными скоплениями подземных льдов. Измерения ведутся в виде профильной съемки с шагом 25-50 м с полным повторением пунктов наблюдений. Результаты наблюдений представляют в виде графиков Δg_{α} в относительной редукции.

3.78. ВЭЗ МДС производятся двусторонними трехэлектродными или дипольными установками. Точки зондирования располагают на оси трасс таким образом, чтобы можно было охарактеризовать краевые и центральные части микрорайонов, а также наиболее типичные элементы строения мерзлой толщи. Максимальные разносы питающих линий установок выбирают в соответствии с требуемой глубинностью исследования по трассам. При этом необходимо предусматривать увеличение разносов на отдельных точках ВЭЗ для определения мощности крупных ледяных тел и мерзлой толщи.

3.79. Сейсморазведка может быть привлечена для изучения обводненности пород в пределах крупных таликов, а также для картирования кровли пластовых льдов,

залегающих в глинистых отложениях. Измерения ведутся по оси трасс в виде непрерывного профилирования с получением встречных и нагоняющих систем годографов. Длины отрезков профилей, отрабатываемых с одного пункта возбуждения колебаний, регламентируются глубиной залегания кровли льда.

3.80. Буровые скважины задаются с учетом данных комплексных геофизических работ. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы все они или большинство из них располагались вблизи точек ВЭЗ. Это обеспечивает получение максимального количества информации о строении и свойствах мерзлых пород.

3.81. Все буровые скважины должны быть подвергнуты комплексному каротажу, включающему термометрию, коротаж КС и АК.

3.82. Обработка и окончательная интерпретация всех геофизических материалов производится в камеральный период. Полученные результаты изображаются в виде геолого-геофизического разреза по оси трасс, на котором указываются положение всех геофизических границ и сведения о составе, льдистости и физических свойствах мерзлых пород. Геолого-геофизические разрезы должны сопровождаться планами простираний выделенных границ, для чего дополнительно привлекаются данные, полученные на поперечниках.

3.83. Специфика изысканий в районах с неглубоким залеганием скальных пород определяется тем, что многие черты их мерзлотно-гидрогеологического строения не находят отражения в поверхностных условиях. В связи с этим значительно возрастает роль геофизических методов, в число которых должны входить ЭП МДС, ВЭЗ МДС, сейсморазведка и комплексный каротаж скважин. Магниторазведка и гравиразведка используются в качестве вспомогательных методов для решения частных задач мерзлотного или геологического характера.

3.84. На первом этапе съемки выполняют ЭП МДС и микрорайонирование, с помощью которых решается широкий круг задач. Наблюдения ведутся по оси трасс и поперечникам, задаваемым на равных расстояниях друг от друга. Оно должно составлять 250-500 м при съемке в масштабе 1:25 000 и 500-1000 м - в масштабе 1:50 000. Используются двусторонние дипольные или трехэлектродные установки, размеры которых подбирают так, чтобы обеспечивались требуемая глубинность исследований и шаг наблюдений по трассам, равный 25 м в масштабе 1:25 000 и 50-100 м в масштабе 1:50 000. Результаты ЭП МДС и микрорайонирования обрабатываются еще в поле с тем, чтобы их результатами можно было воспользоваться при размещении точек ВЭЗ и скважин.

3.85. ВЭЗ МДС применяются на втором этапе съемки для определения состава и мощности рыхлых отложений, коры выветривания в скальных породах и мощности мерзлой толщи в целом. Измерения выполняют на оси трасс двусторонними трехэлектродными или дипольными установками, максимальные размеры которых выбираются в соответствии с кругом решаемых задач и требуемой глубинностью исследований. Пункты зондирований задаются по данным ЭП МДС и микрорайонирования так, чтобы были охарактеризованы краевые и центральные части микрорайонов и отдельные их элементы, выделившиеся протяженными в масштабе съемки аномалиями на графиках ЭП МДС. В центре анизотропных зон, обусловленных наклонной слоистостью или трещиноватостью , необходимо ставить крестовые ВЭЗ МДС для определения простирания слоистости или трещиноватости, величины истинного коэффициента анизотропии и мощности анизотропных зон по вертикали.

3.86. Наземная сейсморазведка применяется для определения состава и мощности рыхлых отложений и коры выветривания в скальных породах, а также их обводненности. Измерения производятся одновременно с ВЭЗ МДС и состоят из непрерывного профилирования на отдельных участках трасс с получением систем встречных и нагоняющих годографов. Расстояние между пунктами наблюдений и возбуждения колебаний выбирают в соответствии с ожидаемыми глубинами залегания преломляющих границ.

3.87. Гравиметрия может быть использована вместо сейсморазведки для получения информации о составе, плотности и мощности рыхлых отложений и коры выветривания в скальных породах. Наблюдения в этом случае производятся на оси трассы и поперечниках с шагом 25-50 м с полным повторением всех точек. Результаты наблюдений представляются в виде графиков Δg_a в относительной редукции.

3.88. Магниторазведка решает сравнительно узкий круг задач, связанных с картированием магнитных или слабомагнитых пород. Измерения целесообразно производить на оси трасс и поперечниках с шагом 25-50 м.

3.89. Буровые скважины и горные выработки необходимо задавать с учетом геофизических данных. Все буровые скважины должны быть прокаротированы. В скважинах, заполненных буровым раствором или водой, проводится каротаж КС, ПС и резистивиметрия. Электрический каротаж может быть дополнен сейсмическим или АК. В сухих необсаженных скважинах производятся термометрия, каротаж КС и АК.

3.90. Окончательная обработка и интерпретация геофизических материалов выполняются в камеральный период. На основании полученных данных составляется комплексный геолого-геофизический разрез по оси трасс, на котором указывают все геофизические границы, состав, трещиноватость, льдистость и физические свойства пород. Этот разрез должен сопровождаться планом простирания геофизических границ в пределах полосы съемки, для чего используют данные, относящиеся к поперечникам.

МЕРЗЛОТНАЯ СЪЕМКА ПЕРЕХОДОВ ЧЕРЕЗ ВОДОЕМЫ

3.91. Изучению подлежит часть акватории, попадающая в полосу строительства. Наблюдения ведутся по створам, пересекающим акваторию в направлении трассы. При съемке в масштабе 1:50 000 можно ограничиться тремя створами, один из которых совпадает с осью трассы, а два других располагаются по краям полосы съемки. Число створов может быть увеличено до пяти при съемке в масштабе 1:25 000.

3.92. Задачи исследования сводятся к изучению распространения мерзлых пород и определению состава и мощности талых пород под дном акватории. Они решаются наиболее эффективно с помощью донных ВЭЗ, если глубина водоема не превышает 5-10 м. При изучении глубоких водоемов основным методом становится геозвуколокация.

3.93. Донные зондирования выполняются двусторонними трехэлектродными или дипольными установками методом сопротивления. Максимальные разносы питающих электродов выбирают в соответствии с требуемой глубинностью исследований. Пункты зондирований размещают на створах через 25-50 м при съемке в масштабе 1:25 000 и через 50 м при съемке в масштабе 1:50 000. Питающие электроды донных установок разносят вдоль створов, если водоемы достаточно широки. При зондировании узких водоемов питающие и приемные электроды ориентируются вдоль русел или берегов.

3.94. Результаты интерпретации донных ВЭЗ изображают в виде геоэлектрических разрезов по створам, на которых показывается положение геоэлектрических границ, предполагаемый состав пород и их УЭС. Если геоэлектрические условия в пределах изучаемых акваторий относятся к категории простых или осложненных, то допускается построение карт, отражающих распространение боковых границ мерзлоты и изменение мощности талика.

3.95. Геозвуколокация целесообразна только при изучении достаточно обширных и глубоких водоемов. Глубинность исследований и разрешающая способность этого вида исследований зависят от типа станции и мощности излучателя звука. Донные зондирования в этом случае имеют подчиненное значение и размещаются в прибрежной части створов. Результаты геофизических работ представляются в виде геоэхограмм по створам, на которых должны быть выделены в масштабе глубин границы слоев с различными электрическими и сейсмоакустическими свойствами.

РАЗВЕДКА ТРАСС НА СТАДИИ РЧ

3.96. Детальные исследования на этом этапе изысканий строго специализированы и должны давать ответ на конкретные вопросы, касающиеся особенностей геологического, гидрогеологического и мерзлотного строения сравнительно узкой полосы вдоль окончательного варианта трассы. Практика показывает, что наиболее эффективным масштабом детальной съемки является 1:10 000. Однако это не исключает укрупнения его до 1:5000 и даже до 1:2000 на особо сложных участках или при изысканиях под ответственные сооружения.

3.97. На стадии РЧ предъявляются повышенные требования к точности результатов, что обеспечивается увеличением объема геофизических и горно-буровых работ. Последовательность применения геофизических методов и основные положения методики в этом случае принципиально те же, что и при крупномасштабной съемке.

3.98. ЭП КС или ЭП МДС производят на оси трассы и по поперечникам с шагом не более 10 м. Допускается уменьшение шага на участках развития повторно-жильных льдов. Количество поперечников увеличивается до 4-5 на 1 км трассы.

3.99. Все зондирования выполняют двусторонними трехэлектродными или дипольными установками по методу двух составляющих. Количество пунктов зондирований увеличивается до 6-8 на 1 км трассы главным образом за счет дополнительных точек на поперечниках.

3.100. Шаг магнитных и гравиметрических наблюдении сгущается до 10 м при изучении районов с пластовыми льдами и буграми пучения и до 0,5-2 м на участках трассы с повторно-жильными льдами. В некоторых случаях целесообразно заложение на отдельных участках трасс площадок микромагнитной или микрогравиметрической съемок с целью определения условий залегания повторно-жильных льдов.

3.101. Переходы через водоемы исследуют по равномерной сети, детальность которой может меняться от 10х10 м в сложных, до 25х25 м - в простых и осложненных геоэлектрических условиях.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Обоснование комплекса геофизических методов для целей мерзлотной съемки и районирования 3

Электроразведка на постоянном и низкочастотном токе 3
Удельное электрическое сопротивление (УЭС) мерзлых пород . . . 3
Схематическая геоэлектрическая модель мерзлой толщи и типичные аномалии на кривых ВЭЗ и электропрофилирования над ней . . 9
Основные положения методики электроразведочных работ и интерпретации результатов наблюдений 19
Сейсморазведка 26
Сейсмоакустические свойства мерзлых пород 26
Схематические геосейсмические модели различных участков мерзлой толщи и типичные годографы над ними 29
Основные положения методики сейсмоакустических исследований и приемов интерпретации результатов наблюдений 33
Гравиразведка 35
Плотность мерзлых пород и зависимость ее от состава и льдистости 35
Схематическая и гравиметрическая модель различных участков мерзлой толщи 36
Основные положения методики работ и приемов интерпретации результатов наблюдений 39
Магниторазведка 40
Магнитные свойства мерзлых пород 40
Схематическая геомагнитная модель мерзлой толщи 41
Основные положения методики полевых работ и приемы интерпретации результатов наблюдений 43

2. Комплексное применение геофизических методов при решении задач мерзлотной съемки и районирования 45

Изучение состава, строения и мощности мерзлой толщи 45
Картирование боковых границ многолетнемерзлых пород 45
Определение строения, состава и мощности мерзлой толщи 48
Изучение распространения многолетнемерзлых пород в пределах акватории 51
Исследование небольших акваторий 51
Изучение крупных водоемов 53
Изучение распространения, мощности и обводненности таликов 53
Исследование широких таликов 53
Изучение узких таликов 56
Изучение распространения по площади и в разрезе сильнольдистых пород и подземных льдов 60
Картирование сильнольдистых пород 60
Картирование пластовых льдов 65
Картирование повторно-жильных льдов 70

3. Последовательность применения комплекса геофизических методов при мерзлотной съемке по стадиям проектирования . . . 73

Общие положения 73
Виды съемок 73
Общие вопросы организации и проведения геофизических работ . . 73
Отчет о результатах геофизических работ 73
Последовательность проведения комплексных геофизических работ при съемке площадей 74
Рекогносцировочная съемка (ТО) 74
Крупномасштабная съемка на стадии ТП 76
Разведка площадей на стадии РЧ 79
Съемка под линейные сооружения 80
Крупномасштабные съемки на стадии ТП 80
Мерзлотная съемка переходов через водоемы 83
Разведка трасс на стадии РЧ 83

ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией Л.Г. Бальян
Редактор Э.И. Федотова
Мл. редакторы Л.И. Месяцева, А.Н. Ненашева
Внешнее оформление художника А.А. Олендского
Технический редактор Н.Н. Аксенова
Корректор *В.И. Галюзова*
Н/К

Подписано в печать 03.06.87 Т – 13258 Формат 84x108/32
Набор машинописный Бумага офсетная №2 Печать офсетная
Усл.печ.л. 4,62 Усл.кр.-отт. 4,83 Уч.-изд.л. 8,9 Тираж 2000 экз.
Изд. № ХП–9974 Заказ№ 932 Цена 45 к.

Стройиздат, 101442, Москва, ул. Каляевская, 23а

Типография АгроНИИТЭПищепрома
ул. Осипенко, 14

gost.e-ecolog.ru