ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по режимным геофизическим наблюдениям на оползнях

Москва 1988

gost.e-ecolog.ru

ПНИИИС Госстроя СССР

по режимным геофизическим наблюдениям на оползнях



Москва 1988

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения методики режимных наблюдений на оползнях 3
2. Выбор рационального комплекса геофизических методов изучения оползней
Физические свойства пород 4
Удельное электрическое сопротивление 4
Вызванная электрическая поляризуемость 11
Сейсмоакустические свойства 11
Объемная масса 12
Естественная радиоактивность 12
Физико-геологические модели оползней и типичные геофизические аномалии над ними 13
Геоэлектрические модели основных типов оползней 13
Геосейсмические модели основных типов оползней 17
Геоплотностные и гравитационные модели основных типов оползней 19
Выбор комплекса геофизических методов 21
3. Комплекс геофизических методов для режимных наблюдений на оползнях 22
Геофизическая съемка на исходный момент времени 22
Пример 1 24
Пример 2 32
Пример 3 42
Приложения 47
Литература . . . . . III ст. обл.

Нормативно-производственное издание

ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации по режимным геофизическим наблюдениям на оползнях

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией *Л.Г. Бальян*
Редактор *Г.А. Полякова*
Мл. редактор *Л.Р. Абелева*
Технический редактор *Н.Е. Поплавская*
Корректор *Н.С. Сафронова*

Н/К

Подписано в печать 17.06.88 Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная № 2
Печать офсетная Усл. печ. л. 3,25 Усл. кр.-отт. 3,63 Уч.-изд. л. 3,79
Тираж 3000 экз. Изд. № ХП-3019 Заказ № 2414 Цена 20 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата"
Госкомиздата СССР
109033, Москва, Волочаевская ул., 40

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

Рекомендации

по режимным геофизическим наблюдениям на оползнях

Москва Стройиздат 1988

УДК 624.131.543

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

Рекомендации по режимным геофизическим наблюдениям на оползнях / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1988. – 56 с.

Рассмотрены типичные геолого-геофизические модели различных типов оползней и исследованы особенности их отражения в геофизических полях. Сформулированы основные критерии выбора комплекса геофизических методов для режимных наблюдений на оползнях; определены задачи режимных геофизических исследований оползней. Даны номограммы, позволяющие определить состав и состояние пород на момент измерений и следить за изменениями их во времени по изменению значений УЭС, скорости продольных волн, объемной массы пород. Рассмотрены примеры проведения комплексных геофизических исследований на различных стадиях режимных наблюдений, показаны способы обработки полевых материалов и представления результатов.

Для производственных, научно-исследовательских и проектных организаций, занимающихся режимными исследованиями оползней.

Табл. 7, ил. 41.

Разработаны канд. геол.-минерал. наук А.Н. Боголюбовым и инженером Н.П. Боголюбовой.

Р 3202000000–307
———————— – Инструкт.-нормат., I вып.-121-88
047(01)–88

©Стройиздат, 1988

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПОЛЗНЯХ

1.1. Геофизические методы позволяют наблюдать за изменениями во времени и пространстве строения и физических свойств пород оползневого массива без нарушения его сплошности. В этом состоит их качественное отличие от прочих полевых способов изучения динамики оползневых процессов.

1.2. По последовательности проведения работ и кругу решаемых задач целесообразно выделить (геофизическую) съемку на исходный момент времени, геофизическую короткосрочную режимную съемку и стационарные наблюдения.

Геофизическая съемка на исходный момент производится с целью определения строения изучаемого оползня и прилегающих к нему участков склона в начале режимных наблюдений.

Короткосрочные режимные геофизические съемки выполняются на участках оползневых склонов, предрасположенных к подвижкам. Такие участки выявляются в результате инженерно-геологической съемки на исходный момент времени. С их помощью проводятся наблюдения за изменениями в строении и физических свойств оползневых отложений, которые возникают в связи с изменениями влажности пород под воздействием антропогенных факторов: ливней, паводков, колебаний уровней грунтовых вод (УГВ) при подтоплении территорий или замачивании склонов.

Стационарные (режимные) наблюдения организуются для изучения изменений напряженного состояния склоновых отложений, происходящих в процессе пригрузки или подрезки склонов в ходе гражданского или промышленного строительства.

1.3. Оползневые явления сопровождаются не только изменениями физических свойств пород и конфигурацией контактов, но приводят к образованию новых граничных поверхностей. Классификация оползней, данная Саваренским Ф.П., наилучшим образом описывает такую модель развития оползневых процессов. В ней выделяют три вида оползней по строению и свойствам оползневого склона и положению поверхностей смещения. Асеквентные оползни развиваются в однородных неслоистых породах с криволинейной поверхностью скольжения. Консеквентные и инсеквентные оползни происходят в неоднородных слоистых породах. Консеквентные оползни перемещаются по наклонным поверхностям, совпадающим с поверхностями наслоения или трещиноватости. Поверхности смещения инсеквентных оползней пересекают слои различного состава.

Геолого-геофизические условия весьма разнообразны даже в пределах однотипных оползней. Поэтому точная информация о строении оползневых массивов и свойствах слагающих их пород, а также о характере происходящих в них изменений может быть получена только при совместном использовании (комплексировании) нескольких геофизических методов.

2. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ

Физические свойства пород

2.1. Значения физических свойств пород, слагающих оползневые склоны в различных регионах страны, приведены в табл. 1, из которой видно, что оползневые отложения отличаются от подстилающих их пород по значениям удельного электрического сопротивления (УЭС или $\rho_{уд}$), вызванной электрической поляризации η, скорости распространения упругих поперечных V_S и продольных V_p колебаний.

Существует связь между типом оползней и соотношением физических свойств. Ансеквентные оползни (Молдавия, Северный Кавказ, Черноморское побережье Кавказа, Поволжье) характеризуются слабой и неустойчивой дифференциацией пород по физическим свойствам. Значительно лучше по физическим свойствам различаются породы в районах развития консеквентных и инсеквентных оползней (Южный берег Крыма, Закавказье, предгорья в Средней Азии, Подмосковье).

Общим для всех регионов является широкий диапазон изменения значений физических свойств в пределах одного и того же генетического или литологического типа пород. Эти изменения носят закономерный характер. Они тесно связаны с изменением состава и состояния пород и могут быть использованы для их определения.

Удельное электрическое сопротивление

2.2. Электропроводность пород, слагающих оползневые склоны, имеет преимущественно ионную природу. Поэтому их УЭС в общем случае зависит от состава, сложения (текстуры), пористости (трещиноватости), степени заполнения пор влагой (влажности), от температуры и минерализации подземных вод.

2.3. Для отложений, залегающих выше УГВ, характерны переменная влажность $W_{ест}$, слабая минерализация поровых растворов (М = 0,2 – 0,5 г/л) и сезонные колебания температуры. Номограмма I, изображающая зависимость УЭС слабоминерализованных дисперсных пород от их состава, влажности или температуры, приведена в прил. 1. С ее помощью можно определять состав пород по установленным значениям УЭС, влажности или температуры. И наоборот, влажность или температуру по значениям УЭС пород, если известен их состав.

2.4. Ниже УГВ, УЭС дисперсных пород зависит от их состава и минерализации подземных вод. Номограмма II, отображающая эту зависимость, приведена в прил. 2. Она допускает определение состава породы и объемного содержания $\beta_{гл}$ глинистых частиц (> 0,005) в ней по известным значениям УЭС и минерализации. Минерализация поровых растворов может быть установлена по значениям УЭС, если известен состав породы или объемное содержание в ней глинистых частиц.

2.5. В прил. 3 представлена номограмма III для оценки объемного содержания грубообломочного материала $\beta_{гр}$ в песчано-глинистых отложениях. Она описывает зависимость отношения $\frac{\rho_{уд}}{\rho_{пр}}$ от $\beta_{гр}$ и $\mu = \frac{\rho_{нпр}}{\rho_{пр}}$. Здесь $\rho_{уд}$ – УЭС грубообломочной породы вместе с заполнителем; $\rho_{нпр}$ – УЭС породы, из кото-

Таблица 1

Район измерений, генезис, состав пород	Преобладающий тип оползня	Естественная влажность W, %	Минерализация поровых растворов M, г/л	УЭС пород ρ, Ом·м	Скорость распространения колебаний, м/с		Вызванная поляризация η, %
					поперечных V_s	продольных V_p	
Молдавская ССР							
Ненарушенные породы							
1. Аллювиальные пески		17–21	0,2–0,5	35–220 65	–	400	–
2. Аллювиальные суглинки		21–28	0,2	27–70 42	470–600 530	1530–1800 1660	–
3. Коренные глины		21–28	0,2–0,5	8–15 12	–	1530–1800 1660	–
Оползневые отложения	Асеквентный, консеквентный						
1. Суглинки бесструктурные		21–28	0,2–0,5	12–100 22	–	1400–1850 1600	–
2. Глины бесструктурные		21–30	До 3	3–10 6	–	1400–1850 1600	–
3. Суглинки и глины перемятые, трещиноватые		21–28	0,5–1	4–9 6	130–200 165	1150–1470 1300	–
Южный берег Крыма							
Ненарушенные породы							
Переслаивание аргиллитов, алевролитов и песчаников		6	0,5	25–45 35	600	2700–3000 2850	–

Район измерений, генезис, состав пород	Преобладающий тип оползня	Естественная влажность W, %	Минерализация поровых растворов M, г/л	УЭС пород ρ, Ом·м	Скорость распространения колебаний, м/с		Вызванная поляризация η, %
					поперечных V_s	продольных V_p	
Оползневые отложения	Консеквентный, инсеквентный						
1. Эллювий флишевых пород:		До 10	0,3–0,5	90–400 / 150	–	800–2500 / 160	–
сильно выветрелых и трещиноватых		20–30	До 1	5–40 / 30	–	2800–3500 / 3000	–
		20–30	До 10	1–10 / 3	–	–	–
2. Глины и суглинки с содержанием обломочного материала 20–30%		До 20	0,8–2,7	20–40 / 30	–	400–800 / 600	–
		Более 30		5–10 / 6	–		
3. То же, 30–40%		До 14	–	90–400 / 100	360	1400–1660 / 1500	–
		Более 30	До 1,5	31–46 / 30	–	1000–1400 / 1200	–
4. Суглинки с включением щебня, дресвы, обломков аргиллитов, алевролитов и известняков		До 10	0,5–1	45–90 / 75	100–500 / 300	400–700 / 600	–
Черноморское побережье Кавказа							
Ненарушенные породы							
1. Аргиллиты		9–11	–	6–9 / 7	–	2500–3000 / 2800	–
2. Переслаивание глин, конгломератов и песчаников		3–20	0,5	17–35 / 25	–	–	–
3. Глины олигоцена		7–18	0,3–0,6	7–17 / 10	–	160–3000 / 2000	–
Оползневые отложения	Асеквентный, консеквентный, инсеквентный						
1. Песчано-глинистые бесструктурные отложения		22–36	0,2–0,5	40–160 / 100	–	–	–
2. Незакономерное переслаивание глин, конгломератов и суглинков		24–34	До 8	10–100 / 43	–	760–1600 / 1360	–
3. Кора выветривания в алевролитах и аргиллитах		30–40	Более 10	6–7 / 6	–	1320–1360 / 1350	–
Центральный Кавказ							
Ненарушенные породы							
1. Плотные компактные песчаники		До 20	–	180–200 / 195	500–2500 / 1500	До 4000	2,4–3,6 / 3
2. Песчаники с прослоями глин		–	–	40–90 / 60	–	–	1,2–2,4 / 1,8
3. Глины с прослоями песчаников		До 25	–	12–30 / 20	–	–	0,3–0,8 / 0,6
4. Глины майкопские		До 30	–	8–10 / 9	–	2000	0,3–0,8 / 0,6

Продолжение табл. 1

Район измерений, генезис, состав пород	Преобладающий тип оползня	Естественная влажность W, %	Минерализация поровых растворов M, г/л	УЭС пород ρ, Ом·м	Скорость распространения колебаний, м/с		Вызванная поляризация η, %
					поперечных V_s	продольных V_p	
Оползневые отложения	Консеквентные, инсеквентные						
Глины с включениями гальки, конгломератов и глыб коренных песчаников		До 34	–	5–70 25	100–400 250	1800–2500 2300	1,5–3,6 2,1
Северный Кавказ							
Ненарушенные породы							
1. Песок мелкий, с тонкими прослоями глин		Водонасыщенные	–				
2. Глины с прослоями песка		20–30	До 1	15	380–400 390	1480–1540 1500	–
3. Глины майкопские		До 42	До 20	6–16 10	460	1860	–
Оползневые отложения	Асеквентные						
1. Глины бесструктурные с большим количеством включений гипса, песчаников, ракушек		22–24	0,5	20–30 25	500–630 560	1750	–
2. Глины перемятые		5–20	До 20	10–500		–	–
Средняя Азия							
Ненарушенные породы							
1. Порфириты		–	–	100–110 105	–	1900	–
Оползневые отложения	Консеквентные						
1. Суглинисто-щебенистый материал		14–23	0,2–0,5	30–160 42	–	300–1300 800	–
с глыбами песчаников, сланцев							
2. Смесь обломков метаморфических сланцев с суглинистым материалом		–	–	–	–	200–1400 800	–
Поволжье							
Ненарушенные породы				10–18			
Глины		25–34	До 4,7	14	–	–	–
Оползневые отложения	Асеквентные						
1. Пески		Обводненные	До 0,5	17–90 35	–	–	–
2. Глины с включениями обломочного материала		Обводненные	До 5	4–20 10	–	–	–
3. Глины бесструктурные		35–44	До 11	3–8 5	–	–	–
Подмосковье							
Ненарушенные породы							
1. Переслаивание известняков и мергелей				20–50 35	–	–	0,5–0,6 0,55
2. Глины жирные		До 44		6–19 12	–	–	0,3
Оползневые отложения	Консеквентные, инсеквентные						
1. Суглинки легкие		13–40	До 0,7	18–38 25	–	–	0,4–0,6 0,5
2. Суглинки тяжелые с включениями щебня и гальки		До 40		17–30 20	–	200–600 400	0,45–0,6 0,5

Примечание. В числителе дроби даются соответственно минимальные и максимальные значения параметров, в знаменателе – среднее значение.

рой состоят обломки; $\rho_{пр}$ – УЭС песчано-глинистого мелкодисперсного заполнителя. Приемы применения номограммы III подробно описаны в Рекомендациях по изучению карста геофизическими методами. М., Стройиздат, 1985.

2.6. Номограмма III может быть использована также для оценки объемной влажности $W_{об}$ дисперсных пород, не содержащих в заметном количестве минералов с электронной проводимостью. Для этого необходимо знать УЭС поровых растворов $\rho_{пор}$, которое можно определить с помощью номограмм IУ–УII, приведенных в прил. 4. Каждая из них изображает зависимость $\rho_{пор}$ от минерализации и объемного содержания $\beta_{пор}$ поровой влаги в породах различного состава. Требуемые сведения о составе породы, степени ее влажности (полное или неполное влагонасыщение) и минерализации могут быть взяты из геологического описания или получены путем сопоставления электроразведочных и сейсмоакустических данных. Перевод объемной влажности в весовую $W_{ест}$ осуществляется с помощью номограммы УIII.

2.7. Ненарушенные породы обладают первичной слоистостью и трещиноватостью, которые в совокупности образуют сетчато-слоистую систему проводящих прослоев в нижней части разреза оползневых склонов.

2.8. Слоистая среда характеризуется продольным ρ_t, поперечным ρ_n и среднеквадратическим $\rho_m = \sqrt{\rho_n \quad \rho_t}$, электрическими сопротивлениями, которые зависят от коэффициента анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}$, соотношения $\nu = \frac{\Sigma h_{пр}}{\Sigma h_{нпр}}$ (где: $\Sigma h_{пр}$ – суммарная мощность хорошо проводящих электрический ток прослоев, а $\Sigma h_{нпр}$ – суммарная мощность плохо проводящих электрический ток прослоев) и соотношения $\mu = \rho_{нпр} / \rho_{пр}$ (где: $\rho_{нпр}$ и $\rho_{пр}$ – УЭС соответственно непроводящих и проводящих пород). В прил. 5 приведена номограмма IX, которая отображает зависимость отношения $\rho_m / \rho_{пр}$ от ν, μ и λ. Правила определения параметров слоистой среды подробно рассмотрены в Руководстве по интерпретации кривых ВЭЗ МДС, М., Стройиздат, 1984.

2.9. Сетчато-слоистые системы проводящих прослоев характерны для связанных (скальных) трещиноватых пород. Среднеквадратическое и продольное сопротивления трещиноватых пород зависят от УЭС $\rho_{пр}$ и объемного содержания $\beta_{пр}$ проводящего материала в порах и трещинах, коэффициента анизотропии и соотношения q/m, $q = \frac{\Sigma h_{пр}}{\Sigma h_{нпр\ подч}}$ отношение суммарных мощностей проводящих и непроводящих прослоев в направлениях, перпендикулярных к плоскостям подчиненных систем трещиноватости, а $m = \frac{\Sigma h_{пр}}{\Sigma h_{нпр\ осн}}$ – то же, в направлении, перпендикулярном плоскости основной системы трещин. В прил. 6 приведена номограмма X, устанавливающая зависимость отношения $\rho_m/\rho_{пр}$ и $\rho_t/\rho_{пр}$ от значений λ, $\beta_{пр}$ и q/m. С ее помощью могут быть определены характер трещиноватости и коэффициент анизотропии толщи, а также объемное содержание проводящего компонента в ней по известным значениям ρ_m, ρ_t, $\rho_{пр}$. Применение номограммы X подробно рассмотрено в Рекомендациях по изучению карста геофизическими методами.

ми. Требуемые значения $\rho_{пр}$ определяют по данным электрического каротажа скважин или устанавливают с помощью номограмм I и II по известным из геологического описания сведениям о составе заполнителя трещин, его влажности и минерализации поровой влаги, которая может быть найдена по УЭС подземных вод. Для этого в прил. 7 приведена номограмма XI, изображающая корреляционную зависимость (близкую к аналитической) УЭС воды от ее минерализации.

2.10. Все номограммы составлены для пород и подземных вод, имеющих температуру 18°С. Исключение представляет верхняя часть номограммы I, соответствующая мерзлым породам. Пренебрежение влиянием температуры влечет за собой ощутимые ошибки в определении состава и инженерно-геологических характеристик пород по данным электроразведки. Температурную корреляцию полученных значений УЭС следует выполнять путем вычислений по формуле

$$\rho_{уд}^{18} = \rho_{уд}^{t} \left[1 + \alpha \, (t^{o} - 18^{o}) \right],$$

где $\rho_{уд}^{18}$ и $\rho_{уд}^{t}$ – УЭС породы или воды при температуре 18° и t°С соответственно, α – эмпирический коэффициент, равный $0{,}025\,^{o}C^{-1}$.

Вызванная электрическая поляризуемость

2.11. Вызванная электрическая поляризуемость дисперсных осадочных пород зависит от их состава, пористости, влажности и минерализации поровых растворов. Номограмма XII, отображающая зависимость истинной поляризуемости от состава и влажности слабоминерализованных ($M \approx 0{,}5$ г/л) песчано-глинистых пород приведена в прил. 8. Увеличение минерализации пород сопровождается уменьшением поляризуемости, которая практически равна нулю при $M \geqslant 10$ г/л независимо от их состава.

Сейсмоакустические свойства

2.12. В практической деятельности, как правило, приходится иметь дело со скоростью V_p распространения продольной волны, которая, в отличие от поперечной и релеевской волн, регистрируется почти всегда и значительно проще. Поэтому в рекомендациях сконцентрировано внимание на зависимостях V_p от состава, плотности, пористости (трещиноватости) и влажности пород.

2.13. Скорость распространения продольных волн в дисперсных породах зависит от состава, влажности, объемной массы γ и, как следствие, пористости II.

2.14. Специфика формирования упругих связей при изменении влажности песчано-глинистых отложений обусловливает резкий, почти скачкообразный, рост значений V_p при переходе от неполного влагонасыщения к полному. В области низких или высоких влажностей значения V_p меняются незначительно по сравнению с амплитудой скачка. Исключение представляют глины в естественном состоянии. Для них характерно постепенное увеличение скорости по мере возрастания влажности.

2.15. Многочисленные корреляционные зависимости, полученные для песчано-глинистых отложений в различных регионах, обнаруживают тесную связь между значениями V_p и γ. Номограмма XIII (см. прил. 9) отображает зависимость V_p от состава и объемной массы пород. Она содержит два семейства кривых для не-

полного и полного влагонасыщения. Номограмма позволяет определить по значению V_p состав породы, если известна ее масса (объемная) и наоборот, объемную массу при известном составе. Относительная ошибка при оценке γ не выходит за пределы 10%.

2.16. Для оценки модуля деформации $E_{деф}$ дисперсных пород можно воспользоваться номограммой ХТУ (см. прил 10), составленной для широкого класса песчано-глинистых отложений Украины. Она отображает зависимость $E_{деф}$ от скорости продольных волн и объемной массы пород, которая может быть получена путем непосредственных измерений или в результате совместной обработки сейсморазведки и электроразведки.

2.17. Скорость продольных волн в скальных породах зависит от их состава, пористости, состава заполнителя и степени заполнения пор. В прил. 11 приведены номограммы, изображающие зависимость V_p трещиноватых известняков (номограмма ХУ) и песчаников (номограмма ХУ1) от их пористости и объемного содержания воздуха $\beta_{возд}$ и заполнителя $\beta_{гл}$, которым могут быть глинистый материал или вода. Номограммы позволяют определить пористость (трещиноватость) известняка или песчаника и объемное содержание в них газового компонента, если известны V_p и $\beta_{гл}$. Требуемые значения $\beta_{гл}$ могут быть легко найдены по данным электроразведки. Приемы применения номограмм ХУ и ХУ1 рассмотрены в Рекомендациях по изучению карста геофизическими методами.

Объемная масса

2.18. Объемная масса песчано-глинистых отложений зависит от состава, пористости и влажности. Номограммы ХУII–XIX, изображающие зависимость γ песков, супесей (суглинков) и глин от пористости П и влажности W, приведены в прил. 12. Они допускают приблизительную оценку объемного веса породы, если известны из геологических данных ее состав, влажность и пористость. Влажность песков, супесей или глин может быть определена по их плотности и пористости. Последняя обычно выдержана в пределах одного типа пород, находящихся в сходных геолого-геоморфологических условиях.

Естественная радиоактивность

2.19. Из осадочных пород наиболее радиоактивны глубоководные осадки: илы и битуминозные глины. Мелководные и континентальные мелкодисперсные отложения (глины и мергели) обладают более низким уровнем гамма-излучения. Грубодисперсные и обломочные породы (пески, галечники, щебень) практически не радиоактивны. Интенсивность гамма-излучения песчано-глинистых смесей в первом приближении пропорциональна объемному содержанию в них глинистых частиц. Л.А.Буряковским предложен способ определения глинистости осадочных пород по данным гамма-каротажа (ГК) скважин. Его суть в следующем: на диаграмме ГК проводят две параллельные линии, одна из которых фиксирует уровень наиболее глубоких минимумов, а вторая – уровень максимумов. Нижнему уровню присваивается нулевое, а верхнему – стопроцентное содержание глинистой фракции в отложениях. Зависимость интенсивности гамма-излучения от глинистости принимают линейной.

2.20. Зависимости физических свойств от инженерно-геологических параметров пород в большинстве случаев неоднозначны. Однако характер этих зависимостей таков, что конкретное решение может быть получено по известным значениям двух физических свойств. Например, зная УЭС и скорость продольных волн или УЭС и объемную массу, можно установить состав, глинистость, пористость, влажность и минерализацию породы. Отсюда возникает необходимость комплексирования геофизических методов, обеспечивающих достоверное определение различных физических свойств.

Физико-геологические модели оползней и типичные геофизические аномалии над ними

2.21. Под физико-геологическими моделями (ФГМ) понимают формально заданное распределение физических свойств и полей в средах, в той или иной степени адекватных исследуемому геологическому объекту. В каждом конкретном случае ФГМ формируют на основе известных закономерностей распределения физических свойств и физических полей в реальных породах. Анализ ФГМ и характерных для них типов аномалий в физических полях позволяет всесторонне оценить физические предпосылки для применения того или иного геофизического метода и сформулировать условия, при которых может быть получено положительное решение при изучении интересующих нас геологических объектов или явлений.

Геоэлектрические модели основных типов оползней

2.22. Для асеквентных оползней характерны: слабая дифференциация оползневых масс и ненарушенных пород по электрическим свойствам, многослойное строение оползневого массива, присутствие криволинейных геоэлектрических границ. Геоэлектрическая модель асеквентного оползня представлена на рис. 1. В ее разрезе выделены сверху – вниз: делювий с $\rho_1 = 50-25$ Ом·м, отложения оползней потоков с $\rho_2 = 20$ Ом·м. Смещенные и деструктурированные коренные породы с $\rho_3 = 6-4$ Ом·м и собственно коренные породы с $\rho_4 = 10-15$ Ом·м. Нижняя граница первого слоя практически параллельна земной поверхности. Значения УЭС в его пределах, как правило, меняются в широких пределах из-за колебаний температуры и влажности пород. Эти изменения носят преимущественно сезонный характер. Мощность второго и третьего геоэлектрических горизонтов переменна за счет криволинейности их границ. Оба слоя или один из них могут выклиниваться на ограниченных участках профиля. Глубина залегания границы между вторым и третьим геоэлектрическим горизонтами может меняться в соответствии с изменением УГВ. УЭС второго и третьего горизонтов постоянно, если принять, что минерализация подземных вод не меняется во времени. Четвертый геоэлектрический горизонт однороден и изотропен. Его параметры не меняются во времени. Аномалии на графиках $\Delta U_t/I$ ($\rho_к$) и $\Delta U_п/I$ двустороннего трехэлектродного и симметричного электропрофилирования приурочены к границам оползня. По форме и геометрическим размерам они относятся к телам, характерным для непроводящих пластов средней мощности. Амплитуды аномалий на графиках $\Delta U_t/I$ ($\rho_к$) и $\Delta U_п/I$ профилирования невелики из-за слабой дифференциации пород по УЭС и мало меняются при изменении геоэлектрических параметров оползня. Сезонные колебания УЭС первого слоя и изменения, связан-

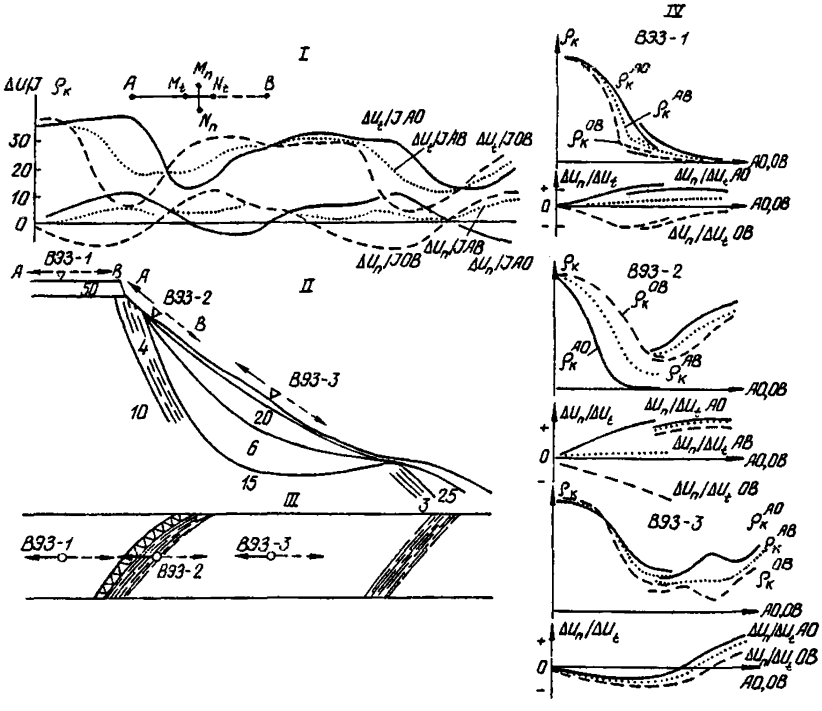


Рис. 1. Геоэлектрическая модель асеквентного оползня
I – графики $\Delta U_t/I$ ($\rho_к$) и $\Delta U_n/I$ двустороннего трехэлектродного и симметричного ЭП МДС; II – геоэлектрический разрез; III – простирание геоэлектрических границ в плане; IV – кривые $\rho_к$ и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС

ные с развитием трещиноватости в верхней части разреза, могут быть изучены до глубины 2–3 м с помощью двустороннего трехэлектродного электропрофилирования небольшими установками.

Все геоэлектрические горизонты, присутствующие в асеквентном оползне, находят свое отражение на кривых $\rho_к$ двустороннего трехэлектродного или симметричного вертикального электрического зондирования. Наклонные границы вызывают расхождение кривых $\rho_к$ двусторонних трехэлектродных ВЭЗ, характерные для наклонных контактов двух сред, горстов, грабенов в проводящем и непроводящем основании. На кривых $\rho_к$ ВЭЗ КС им способствуют перегибы и локальные экстремумы, которые могут быть ошибочно связаны с появлением в разрезе дополнительных геоэлектрических границ. Изменение кривых $\rho_к$ ВЭЗ невелики из-за слабой дифференциации разреза асеквентных оползней по УЭС.

Аномалии на кривых $\Delta U_n/\Delta U_t$ ВЭЗ МДС связаны только с наклонными геоэлектрическими границами и зависят от глубины H, простирания φ и угла падения α относительно положения оси установки на земной поверхности. Поэтому

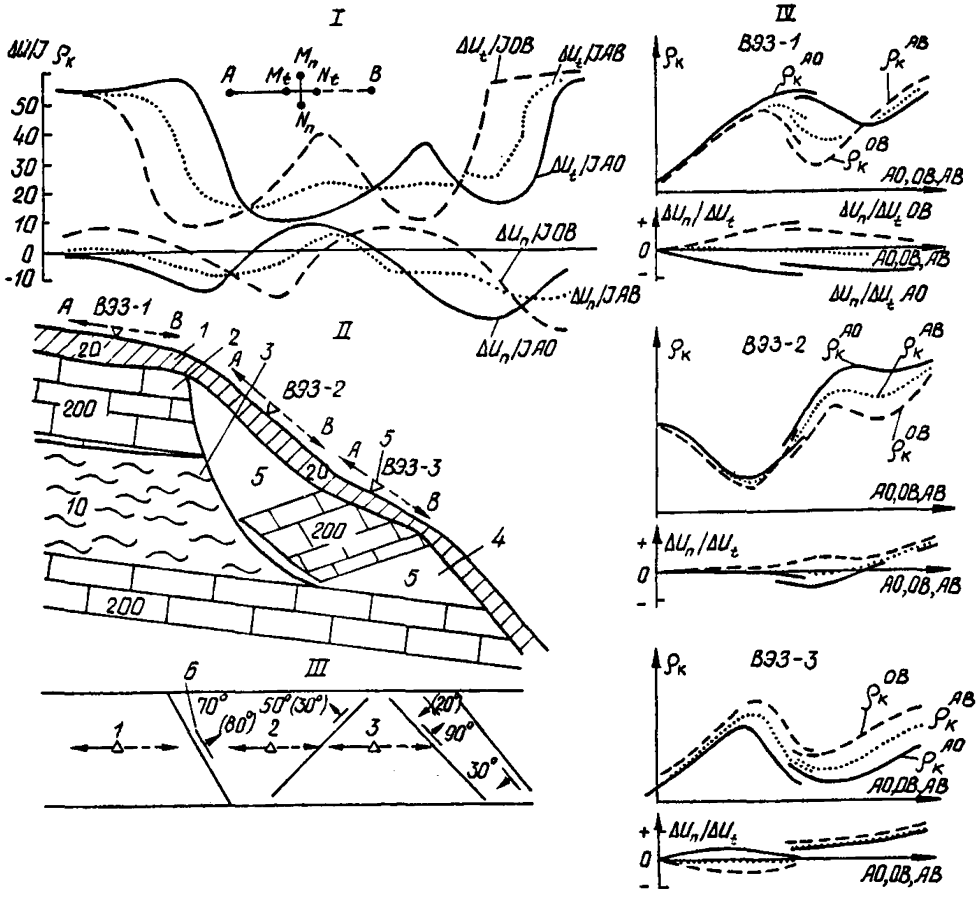


Рис. 2. Геоэлектрическая модель инсеквентного оползня
I – графики $\Delta U_t/I$ (ρ_K) и $\Delta U_n/I$ двустороннего трехэлектродного и симметричного ЭП МДС; II – геоэлектрический разрез; III – простирание геоэлектрических границ в плане; IV – кривые ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС; 1 – суглинки и значения УЭС; 2 – известняк и его УЭС; 3 – глина и ее УЭС; 4 – оползневые отложения и значения их УЭС; 5 – пункт зондирования и направление разносов питающих электродов; 6 – элементы залегания геоэлектрических границ

кривые $\Delta И_n/\Delta И_t$ обычно хорошо дифференцированы даже при небольших соотношениях УЭС контактирующих сред. Совместный анализ кривых ρ_K и $\Delta И_n/\Delta И_t$ ВЭЗ МДС позволяет выявить изменчивый геоэлектрический горизонт и установить, меняются ли УЭС пород, мощность слоя или элементы залегания его границ.

2.23. Консеквентные оползни развиваются в слоистых и трещиноватых толщах и отличаются от асеквентных оползней лучшей дифференциацией оползневых отложений и ненарушенных пород по УЭС, наличием в оползневых массивах

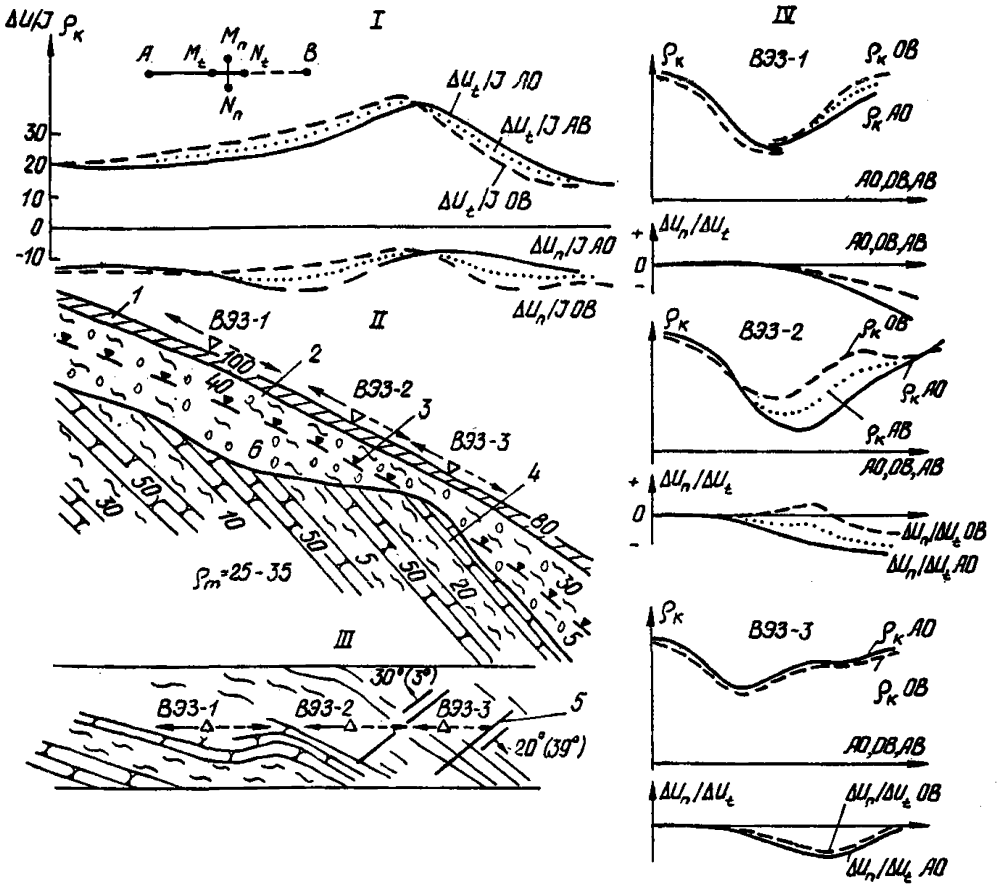


Рис. 3. Геоэлектрическая модель консеквентного оползня
I – графики $\Delta U_t/I$ (ρ_K), $\Delta U_n/I$ двустороннего трехэлектродного и симметричного ЭП МДС; II – геоэлектрический разрез; III – простирание геоэлектрических границ в плане; IV – кривые ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$ двусторонних трехэлектродных и симметричных ВЭЗ МДС; 1 – суглинки и значение их УЭС; 2 – оползневые отложения и значение их УЭС; 3 – положение УГВ; 4 – коренные породы и значение их УЭС; 5 – положение негоризонтальных границ, направление и углы падения

сползших ненарушенных пород, появлением в связи с этим дополнительных крутопадающих и пологонаклонных плоских границ, анизотропией толщи в нижней части разреза.

Геоэлектрическая модель консеквентных оползней показана на рис. 3. Она имеет много общего с моделью асеквентного оползня. Дополнительным являются присутствие в низкоомной оползневой массе более высокоомного блока пород и анизотропия четвертного геоэлектрического горизонта, возникающая за счет чередования проводящих и непроводящих пластов.

Графики $\rho_к$ и $\Delta И_п/\Delta И_t$ симметричного и двустороннего трехэлектродного профилирования по методу двух составляющих обычно хорошо дифференцированы и на них присутствуют дополнительные аномалии, связанные с блоками сползших ненарушенных пород. По внешним признакам эти аномалии мало отличаются от тех, которые возникают над границами оползня, и могут быть выделены лишь после количественной интерпретации данных ЭП по несогласным элементам залегания соответствующих им границ.

Кривые $\rho_к$ и $\Delta И_п/\Delta И_t$ ВЭЗ МДС более дифференцированы и в большей степени искажены влиянием наклонных и крутопадающих геоэлектрических границ. Если площадь оползшего блока ненарушенных пород достаточно велика, то на кривых $\rho_к$ ВЭЗ формируется дополнительный трехслойный элемент А или Q, эквивалентный четырехслойному (*КН*) или (*НК*) в зависимости от того, в какой части разреза находится этот блок. Анизотропия подстилающих пород проявляется на отдельных участках склона, при несогласном залегании слоев с его поверхностью. Обнаруживается это по смещению уровня нормального поля на кривых $\Delta И_п/\Delta И_t$ ВЭЗ МДС и в область отрицательных значений, если слоистость простирается под острым углом к направлению разносов питающих линий и положительным, если этот угол тупой. Изменения геоэлектрического строения оползня наилучшим образом обнаруживается с помощью двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС.

2.24. Инсеквентные оползни отличаются от асеквентных и консеквентных оползней тем, что их нижняя граница повсеместно залегает несогласно со слоистостью и трещиноватостью несмещенных пород.

Геоэлектрическая модель инсеквентных оползней приведена на рис. 2. Ее особенность состоит в том, что в основании разреза залегает анизотропная среда, которая обусловливает систематическое смещение нормального поля на графиках $\Delta И_п/$ I профилирования и $\Delta И_п/\Delta И_t$ ВЭЗ МДС в область положительных или отрицательных значений.

Геосейсмические модели основных типов оползней

2.25. Для асеквентных оползней характерны: относительно слабая дифференциация пород по значениям скорости продольных и поперечных волн, послойное увеличение скоростей вниз по разрезу, присутствие в средней и нижней части разреза выклинивающихся слоев за счет криволинейности их границ.

Геосейсмическая модель асеквентного оползня приведена на рис. 4. Сверху залегает низкоскоростной слой с наиболее низкой плотностью и максимальной пористостью. Подошва слоя на отдельных участках наклонена полого по отношению к земной поверхности. Ниже залегает слой оползневых отложений со скоростями, характерными для влажных деструктурированных глинистых отложений. Подошва оползневых отложений обладает достаточно большой кривизной. Углы, которые она составляет с земной поверхностью в местах выклинивания оползневого тела, могут достигать 30–45°. В основании геосейсмического разреза залегают породы, скорости распространения упругих колебаний которых соответствуют влагонасыщенным, преимущественно глинистым отложениям с ненарушенными структурными связями.

Геосейсмические условия в пределах асеквентных оползней допускают получение полных систем встречных и нагоняющих годографов преломленных волн

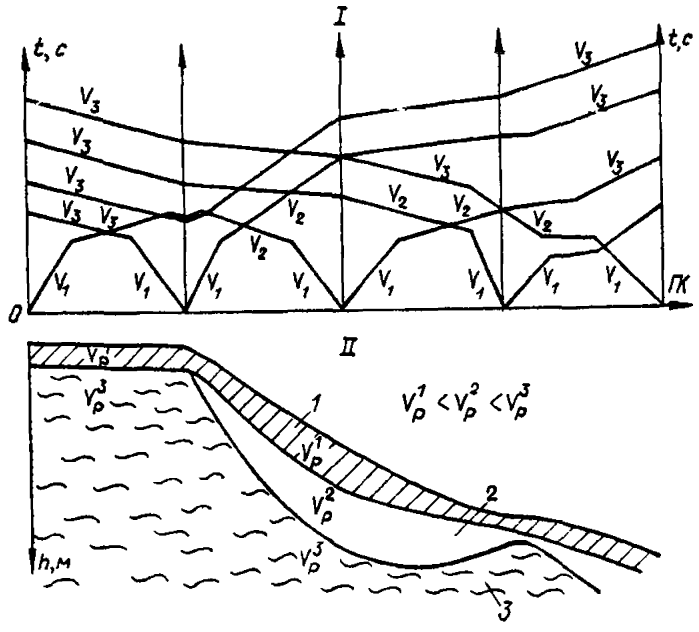


Рис. 4. Геосейсмическая модель асеквентного оползня
I – система встречных и нагоняющих годографов над оползнем; II – геосейсмический разрез; 1 – покровные суглинки (скорость продольных волн V_p^1); 2 – оползневые отложения (скорость продольных волн V_p^2); 3 – коренные породы (скорость продольных волн V_p^3)

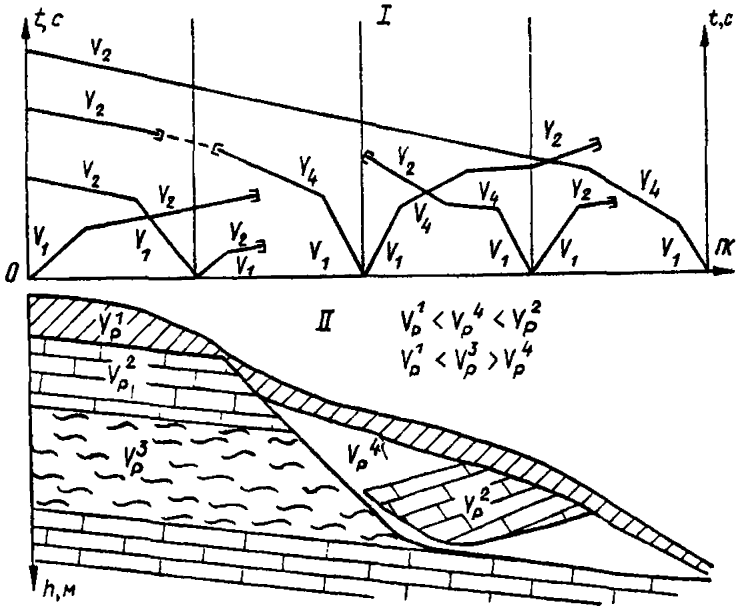


Рис. 5. Геосейсмическая модель консеквентного и инсеквентного оползней
I – система встречных и нагоняющих годографов над ними; II – геосейсмический разрез

при непрерывном профилировании или сейсмическом зондировании. Годографы осложнены дополнительными перегибами, возникающими за счет изменения кажущихся скоростей на участках с различными углами падения геосейсмических границ и образования преломленно-дифрагированных волн в местах выклинивания оползневых отложений. Корректная интерпретация результатов сейсмического профилирования или зондирования позволяет получить большую по объему и высокой точности информацию о строении оползневого склона, сейсмоакустических свойствах пород и их изменении во времени и пространстве.

2.26. Консеквентные оползни и инсеквентные оползни отличаются от асеквентных оползней лучшей дифференциацией оползневых отложений и коренных пород по значениям скоростей продольных и поперечных волн и возможностью присутствия в теле оползня блоков смещенных ненарушенных пород.

Геосейсмическая модель консеквентного и инсеквентного оползня показана на рис. 5. Для нее характерно более сложное геосейсмическое строение, особенно, когда в основании разреза залегает крупнослоистая толща с большим перепадом скоростей между слоями. Это предопределяет более сложную форму годографов преломленных волн и невозможность получения их полных систем на участках выклинивания высокоскоростных горизонтов в средней и нижней части оползневого массива.

Эффективность наземной сейсморазведки в таких условиях резко падает и ее возможности ограничиваются решением частных задач, связанных с изучением самой верхней части разреза.

Геоплотностные и гравитационные модели основных типов оползней

2.27. Асеквентные оползни развиваются на склонах любой кривизны. Им свойствен сложный рельеф земной поверхности из-за широкого развития оплывин и рвов оседания, амплитуда которых по высоте может достигать нескольких метров, составляя в среднем 1–2 м. Оползневые и несмещенные породы различаются незначительно ($\Delta\gamma \approx 0{,}2–0{,}3$ г/см^3) по объемной массе (плотности). Преимущественно глинистый состав отложений обусловливает относительно высокий процент до 13–15% их набухания при переувлажнении.

На рис. 6, *а* приведены плотностная модель асеквентного оползня и соответствующий ей график приращений поля силы тяжести Δg в относительных единицах.

Влияние рельефа учитывается по известным правилам.

В верхней части разреза находится слой сезонных колебаний влажности и температуры. Он сложен высокодисперсными $П \leqslant 0{,}6$ породами с объемным весом (плотностью) $\gamma_1 = 1{,}4–1{,}6$. Мощность слоя равна 1–1,5 м и может увеличиваться на 10–15% за счет набухания пород в весенне-осенний период или во время затяжных дождей. На участках развития трещин "закола" выделены зоны разуплотнения, в пределах которых объемная масса пород снижается до $\gamma_1 = 1{,}2–1{,}4$ г/см^3. Сечение зон разуплотнения в разрезе принято равным 3 х 3 м.

Тело оползня выполнено увлажненными деструктурированными породами с $\gamma_2 = 1{,}6–1{,}8$ г/см^3. Подошва оползня имеет криволинейную форму: максимальная мощность его равна 20 м. Устойчивая часть разреза сложена породами с объемной массой $\gamma_3 = 2$ г/см^3.

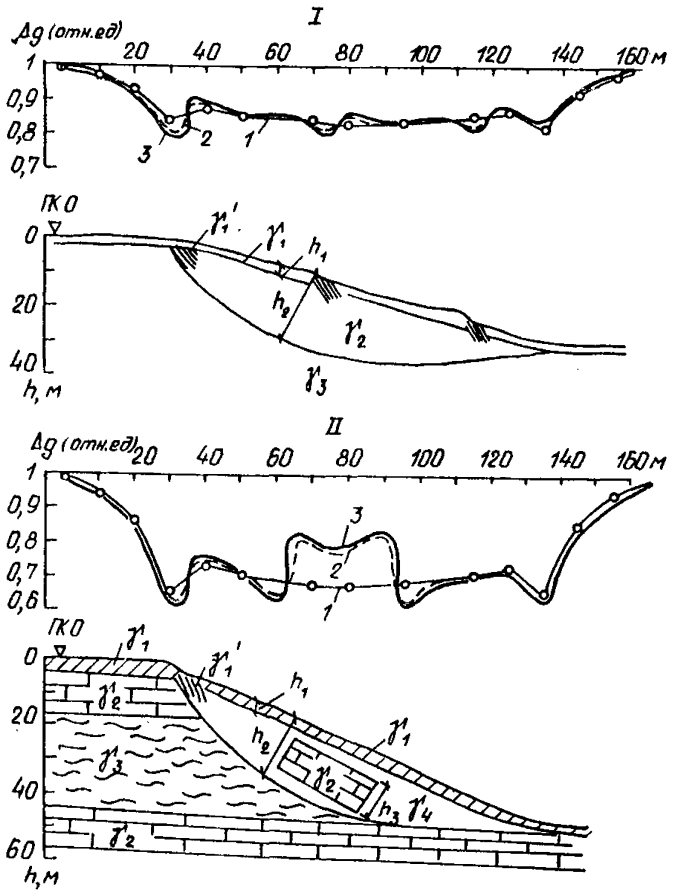


Рис. 6. Геоплотностные разрезы и гравитационные модели основных типов оползней

I – геоплотностная и гравитационная модель асеквентного оползня; II – геоплотностная и гравитационная модель инсеквентного и консеквентного оползня

Аномальные значения Δg над телом оползня рассчитаны по формуле для горизонтального пласта, а над разуплотненными зонами по формуле для горизонтальной призмы. Изменение мощности первого слоя при набухании рассчитано по формуле поправки за свободный воздух.

Установлено, что асеквентный оползень уверенно выделяется широкой отрицательной аномалией с амплитудой 0,16 мгл. Зоны разуплотнения образуют локальные отрицательные аномалии с амплитудой до 0,04 мгл, которые, накладываясь на аномалию от тела оползня, увеличивают ее до 0,2 мгл. Сезонные колебания мощности первого от поверхности слоя вызывают изменения поля силы тяжести на 0,04 мгл. Аномальный эффект от асеквентных оползней может быть выявлен в результате гравиметрических съемок масштаба 1 : 1000 или 1 : 500 при точности нивелировки не хуже ±0,15–0,08 м. Для обнаружения разуплотненных зон и ре-

гистрации сезонных изменений мощности первого слоя необходимо повышать детальность съемки до 1 : 100 или 1 : 50 и точность нивелировки до ± 0,03–0,015 м.

2.28. Для консеквентных и инсеквентных оползней характерны более крутые склоны до 20–30°, лучшая дифференциация оползневых отложений и несмещенных пород по объемной массе, присутствие в теле оползня блоков ненарушенных коренных пород.

Плотностная модель оползней указанных типов и график Δg изображены на рис. 6, *б*. При расчетах приняты: $\gamma_1 = 1{,}5$ г/см³; $\gamma_1' = 1{,}3$ г/см³; $\gamma_2 = 2{,}5$ г/см³; $\gamma_3 = 2{,}1$ г/см³; $\gamma_4 = 1{,}8$ г/см³; $h_1 = 1$ м; $h_2 = 20$ м; $h_3 = 10$ м.

Влияние рельефа местности учтено с помощью поправки за свободный воздух.

Для консеквентных и инсеквентных оползней характерны аномалии Δg сложной формы и достаточно большой амплитуды до ± 0,4 мгл, что весьма осложняет выделение на их фоне слабых аномалий, связанных с разуплотнением зон в верхней части разреза и сезонными изменениями мощности и влажности первого от поверхности слоя.

Выбор комплекса геофизических методов

2.29. ФГМ оползневых склонов относятся к категории сложных и могут быть изучены только с помощью геофизических методов, обеспечивающих получение достоверной и достаточно точной информации о структуре и физических свойствах элементов модели. Это вынуждает нас предъявлять к геофизическим методам следующие требования.

Наблюдения должны выполняться наиболее информативными и высокоточными методами. Производительность геофизических работ должна быть достаточно высокой для того, чтобы измерения можно было провести по требуемой сети наблюдений и в максимально сжатые сроки во избежание ошибок в оценках развития оползневого процесса. Должны существовать приемы экспресс-интерпретации результатов наблюдений, обеспечивающие получение в кратчайшие сроки информации о качественных и количественных изменениях в оползневых массивах.

Перечисленным требованиям удовлетворяют следующие геофизические методы:

электроразведка на постоянном токе в модификации двух составляющих МДС;

съемка естественных электрических потенциалов (ЕП) Земли;

сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн (КМПВ);

комплексный каротаж скважин, который должен включать измерение кажущегося сопротивления пород (КС) в необсаженных скважинах или в кернах; измерение УЭС подземных вод в скважинах (резистивиметрия); измерение V_p и V_s в породах сейсмическим методом (СК) в обсаженных скважинах или акустическим методом в необсаженных скважинах (АК) или в керне (АКС); измерение естественной (ГК) или наведенной (ГГК, НГК или ННК) радиоактивности; термометрию.

Вопросы теории и практики комплексного каротажа скважин рассматриваются в списке литературы.

2.30. Указанные геофизические методы существенно различаются по информативности и технико-экономическим показателям. Поэтому целесообразно ввести понятие об основных и вспомогательных методах.

Основными следует считать методы, которые обеспечивают получение основной информации о составе, строении и свойствах пород при оптимальных затратах времени. С помощью основных методов выполняется основной объем геофизических работ.

К вспомогательным относятся методы, позволяющие получить дополнительную информацию, которая устраняет неоднозначность или повышает точность решений, даваемых основными методами.

Выбор основных и вспомогательных методов производится в соответствии с кругом решаемых задач на каждом этапе геофизической съемки.

3. КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПОЛЗНЯХ

Геофизическая съемка на исходный момент времени

3.1. Геофизические методы используют на этой стадии для: а – картирования боковых границ оползня; б – определения общей мощности оползневых отложений; в – расчленения тела оползня в плане и разрезе на отдельные комплексы пород; г – выявления ослабленных зон и поверхностей смещения оползневых масс; д – определения положения УГВ, их минерализации и направления миграции; е – оценки состояния и физико-механических свойств оползневых и ненарушенных (несмещенных) пород.

3.2. В комплекс геофизических методов включают наземную электроразведку и сейсморазведку.

Электроразведку используют как основной метод для решения задач, перечисленных в п. 3.1 (а–д). Она выполняется методами электропрофилирования и вертикального зондирования на постоянном токе и съемкой естественных потенциалов.

ЭП целесообразно применять при изучении консеквентных и инсеквентных оползней, развивающихся в толще склоновых отложений малой (до 10 м) мощности. Измерения следует проводить двусторонними трехэлектродными установками по методу двух составляющих. Размеры питающих и приемных линий, а также шаг наблюдений выбирают по установленным правилам в соответствии с поперечными размерами изучаемых оползней и масштабом исследований. Профили ЭП следует ориентировать перпендикулярно простиранию боковых границ оползней с таким расчетом, чтобы они оканчивались на участках ненарушенных пород.

Графики $\Delta И_t/I$ ($\rho_к$) и $\Delta И_п/I$ ЭП МДС подвергают количественной интерпретации с обязательной оценкой элементов залегания геоэлектрических границ относительно земной поверхности.

Результаты интерпретации представляют в виде геоэлектрических разрезов и планов простирания геоэлектрических границ, которые строят для каждого профиля в отдельности. По данным площадной съемки составляют корреляци-

онную схему для всего участка, на которой прослеживают однотипные геоэлектрические объекты с близким простиранием геоэлектрических границ.

Электрическое зондирование используют для изучения мощных (более 10 м) оползней всех типов, обладающих сложным строением в плане и разрезе. Измерения целесообразно выполнять двусторонними трехэлектродными установками по методу двух составляющих.

Размеры питающих и приемных линий выбирают с учетом предполагаемого строения оползней и требуемой глубинности исследований. Точки зондирований располагают по профилям, ориентированным перпендикулярно простиранию боковых границ оползней.

Кривые $\rho_к$ и $\Delta И_п/\Delta И_t$ каждого единичного зондирования подвергают качественной и количественной интерпретации, в результате которой определяют схематическую модель строения среды в вертикальном и горизонтальном направлениях, значения УЭС пород в пределах каждого выделенного геоэлектрического горизонта и элементы залегания каждой геоэлектрической границы относительно земной поверхности. Дополнительно оценивают параметры анизотропии пород, если такая имеет место.

По результатам качественной и количественной интерпретации кривых ВЭЗ МДС строят геоэлектрические разрезы для каждого профиля в отдельности. На каждом разрезе в принятом масштабе глубин указывают местоположение и форму основных геоэлектрических границ и в цифровой форме проставляют значения УЭС и параметров анизотропии пород в пределах каждого геоэлектрического горизонта.

Геологическая, инженерно-геологическая и гидрогеологическая привязка геоэлектрических горизонтов производится на основании многопараметровых зависимостей УЭС и параметров анизотропии пород от их состава, температуры, объемного содержания глинистых частиц и минерализации поровых растворов (подземных вод). Для этой цели используют специальные номограммы, приведенные в прил. 1–8.

На основании анализа геоэлектрических разрезов составляют геоэлектрические карты для изученной территории. Изолиниями изображают изменения глубины залегания кровли или подошвы оползневых отложений, а также их мощности. Внемасштабными знаками обозначают положение границ оползня и контактов между породами различного состава. Глинистость пород и минерализацию подземных вод показывают цифрами.

Съемка ЕП производится по стандартной методике по тем же профилям, что ЭП и ВЭЗ МДС.

Результаты измерений представляют в виде графиков изменения потенциала И или градиента потенциала $\Delta И$ по каждому профилю. После приведения результатов наблюдений по всем профилям к единому уровню нормального поля строят карту потенциала или градиент-потенциала в изолиниях.

Геолого-гидрогеологическая привязка аномалий ЕП производится на основании известных зависимостей их формы и амплитуды от направления и интенсивности физико-химических процессов, протекающих в толще пород. Из них преобладающими являются перенос и концентрация положительных и отрицательных зарядов в результате миграции влаги в зоне аэрации, а также на участках разгрузки подземных или поглощения поверхностых вод.

Сейсморазведку используют в качестве вспомогательного метода для решения задач, перечисленных в п. 3.1 (б–е).

Наблюдения проводят в виде непрерывного профилирования или сейсмического зондирования КМПВ с получением полных систем встречных и нагоняющих годографов.

Сейсморазведку целесообразно выполнять по опорным профилям, пересекающим наиболее характерные участки изучаемых оползней.

Шаг наблюдений должен быть постоянным и может меняться от 0,5 до 5 м при расстоянии между ПВ 10–50 м.

Методика измерений, способы обработки и изображения результатов – стандартные.

Напряженное состояние оползневого склона оценивают с помощью кругового сейсмического зондирования, что позволяет достаточно подробно охарактеризовать анизотропию пород, обусловленную их неоднородным напряженным состоянием и степенью разрыхленности (трещиноватости), а также исследовать изменение этих параметров с глубиной. Измерения производят в отдельных точках на поверхности оползневого склона.

Результаты представляют в виде индикатрис эффективных скоростей по различным направлениям. По форме диаграмм судят о распределении напряжений в оползневом теле, а по их размерам о степени уплотнения оползневой массы.

3.3. Учитывая производительность и разведочные возможности электроразведки и сейсморазведки рациональна следующая последовательность применения комплекса геофизических работ на стадии инженерно-геологической съемки.

На первом этапе выполняют электроразведочные работы на всей площади в заданном масштабе исследований. По данным электроразведки, намечают профили непрерывного сейсмического профилирования или зондирования, результаты которого используют для уточнения месторасположения литологических, оползневых и гидрогеологических границ. Круговые сейсмические зондирования производят на заключительном этапе съемки для оценки исходных напряжений в оползневом массиве и за его пределами.

ПРИМЕР 1

Он представлен результатами комплексных геофизических работ на оползне "Золотой пляж" на Южном берегу Крыма (ЮБК).

Ложем оползня служит флишевая толща таврической серии нижней юры. Оползневые отложения состоят из суглинков с различным содержанием обломков коренных пород. В русловой части ручья распространены аллювиальные отложения в виде глыб и обломков известняков и песчаников с песчано-суглинистым заполнителем. Рыхлые отложения обводнены неравномерно. Минерализация подземных вод колеблется от 0,5 до 9 г/л.

Целью геофизических работ являлось расчленение оползневых отложений по составу, определение глубины залегания кровли пород таврической серии, изучение характера и путей движения подземных вод в пределах оползневого склона. Для решения поставленных задач был использован комплекс электроразведочных методов, включавший ВЭЗ КС, КВЭЗ КС и съемку ЕП.

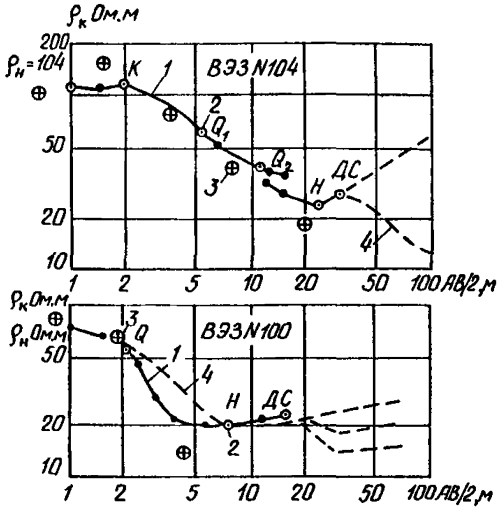


Рис. 7. Типичные кривые симметричных ВЭЗ, полученные в районе работ 1 – измеренная кривая $\rho_К$; 2 – особые точки на кривых $\rho_К$; 3 – координаты $Н_Э$ и $\rho_Э$ эквивалентного слоя; 4 – "реставрированные" отрезки на кривых $\rho_К$

ВЭЗ КС выполнено на всей захваченной оползнем территории по системе профилей, ориентированным перпендикулярно к направлению движения оползня.

КВЭЗ КС поставлены для изучения анизотропии толщи в отдельных точках. Все измерения произведены симметричной установкой с максимальными разносами АВ/2 до 150 м. В качестве измерительной аппаратуры использовался комплект ИКС-1.

Съемка ЕП выполнена по системе параллельных профилей, ориентированных перпендикулярно движению оползня. Потенциал ЕП на всей территории оползня приведен к одному условному нулю. Для этого все профили были увязаны по нулевым пикетам при переходах с одного профиля на другой и повторно – после окончания работ. Качество работ контролировалось повторными наблюдениями на каждой десятой точке. Измерения на профиле I–I были продублированы для оценки устойчивости параметров аномалии линий ЕП во времени. В результате было установлено, что аномалии ЕП устойчивы во времени на изучаемой территории, а точность их измерений удовлетворительна и составляет ± 0,87 мВ или ± 11%.

На профиле, пересекающем склон сверху вниз, было проведено сейсмическое зондирование КМПВ с целью изучения скоростного разреза оползня. Методика работ и интерпретация результатов наблюдений были стандартными.

В исследуемом районе преобладают кривые ВЭЗ с очевидными признаками влияния крутопадающих границ, присутствующих как в верхней (ВЭЗ 100), так и в нижней (ВЭЗ 107) части разреза (рис. 7). По этой причине авторы исходных материалов не смогли их проинтерпретировать с помощью палеток теоретических кривых и результаты работы были представлены ими в виде разрезов кажущегося сопротивления и карты глубин залегания кровли пород таврической серии, составленной в основном по данным бурения.

Более полные и достоверные сведения о геоэлектрическом строении района были получены при переинтерпретации кривых ВЭЗ КС методом "особых" точек, проведенных авторами. В процессе ее пришлось прибегнуть к частичной "рестав-

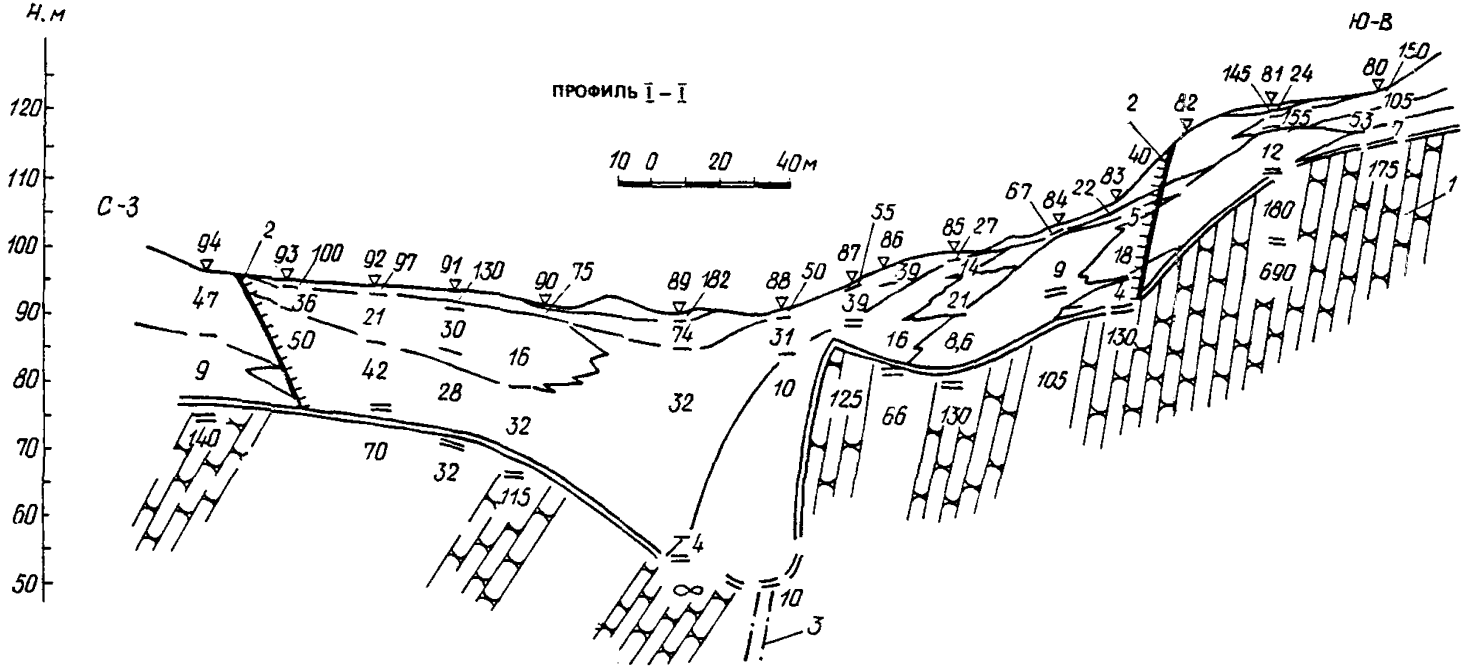


Рис. 8. Геоэлектрический разрез по данным интерпретации методом особых точек
1 – высокоомные породы, соответствующие песчаникам таврической серии и значение их УЭС; 2 – боковые границы оползня по данным инженерно-геологической съемки; 3 – тектонические нарушения по данным электроразведки

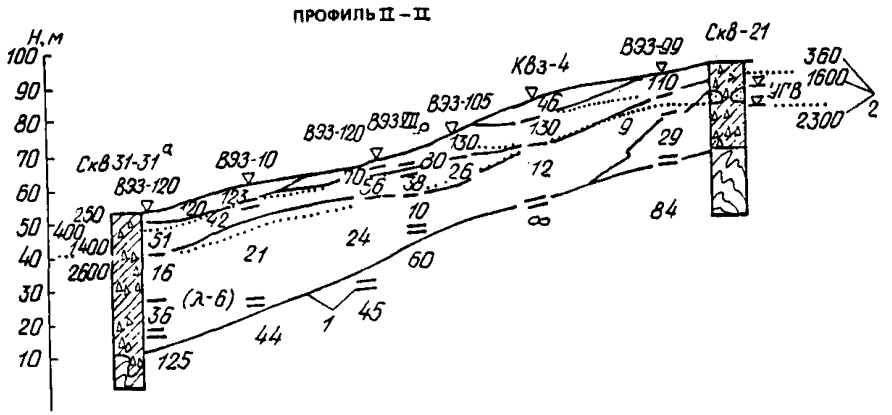


Рис. 9. Геоэлектрический и геосейсмический разрез
1 – геоэлектрические границы и значение УЭС слоев; 2 – геосейсмические границы и значение V_p слоев

рации" искаженных отрезков кривых ρ_K ВЭЗ, которая производилась на основании известных закономерностей влияния крутопадающих геоэлектрических границ на кривые ВЭЗ. Это позволило исключить из разреза "ложные" слои, выявить местоположение крутопадающих границ, определить их форму и видимый угол падения относительно поверхности.

По данным количественной интерпретации, построены геоэлектрические и геосейсмические разрезы по всем профилям. Два из них показаны на рис. 8 и 9. При проведении геоэлектрических и геосейсмических границ на разрезах принимались во внимание местоположение крутопадающих контактов, их элементы залегания, а также пределы возможных ошибок в определении глубин залегания пологопадающих границ.

По геофизическим данным, юрские породы таврической серии, которые залегают в основании разреза, заметно дифференцированы по значениям УЭС. Большое УЭС (более 90 Ом·м) имеет толща, в которой преобладают песчаники. Пониженные значения УЭС (20–50 Ом·м) связаны с участками, на которых в разрезе преобладают аргиллиты. Самые низкие значения УЭС отвечают трещиноватым обводненным юрским породам.

Строение геоэлектрических разрезов свидетельствует о том, что современный рельеф земной поверхности в значительной степени наследует морфологию кровли коренных пород, в формировании которой заметную роль играет разрывная тектоника.

Верхняя часть геоэлектрического и геосейсмического разрезов сложена дисперсными песчано-глинистыми породами, физические свойства которых меняются в широких пределах из-за различной их влажности и неравномерного распределения в них грубодисперсного и обломочного материала.

Состав пород определен с помощью номограмм I, II, XIII и XVII–XIX по значениям УЭС и V_p. При этом предполагалось, что минимальные значения УЭС в каждом выделенном слое соответствуют минимальному содержанию обломоч-

Таблица 2

Номер слоя	Интервал глубин, м	Наименование пород по геологическому описанию	Геофизические данные		Состав пород по геофизическим определениям	Свойства пород по геофизическим данным					
			$\rho_{уд}$, Ом·м	V_p, м/с		$\beta_{гл}$, отн.ед.	M, г/л	$W_{ест}$, %	$W_{об}$, отн.ед.	γ, г/см³	П, %
1	0–4	Глыбово-обломочные накопления с суглинистым заполнителем, слабовлажным	50–350 ——— 125	250–400 ——— 325	Заполнитель – легкий суглинок Песчано-глинистая смесь	0,2 0,03	0,5 0,5	9 6–3	0,06 0,04–0,02	1,7 1,55–1,85	39 43–32
2	4–10	Суглинки с щебнем песчаников и известняков	35–50 ——— 40	1400–1600 ——— 1500	Заполнитель – суглинок по УЭС Глина по V_p Песчано-глинистая смесь по УЭС Глина по V_p	0,4 0,6–0,7 0,15 –	0,5 – 0,5 –	10 – 10 –	0,055 – 0,06 –	– 1,9–2,1 – 1,9–2,1	 33–26 33–26
3	10–15	Суглинки с щебнем аргиллитов, алевролитов и песчаников	18–35 ——— 28	1400–1600 ——— 1500	Заполнитель – суглинок-глина Песчано-глинистая смесь: суглинок по УЭС глина по V_p	0,4 0,3 0,6–0,7	0,5 0,5 –	20 20 –	0,13 0,13 –	1,9–2,1 – 1,9–2,1	36–28 36–28
4	15–40	Обводненные суглинки с щебнем аргиллитов и алевролитов	5–18 ——— 10	2300–2600 ——— 2450	Заполнитель – глина Песчано-глинистая смесь по УЭС Глина по УЭС	0,7 0,1–0,15 –	2–3 2–3 –	Полное влагонасыщение То же –	0,3–0,4 0,2–0,3 –	2,1 – 2,1–2,3	37–35 32–30

ного материала и близки к УЭС заполнителя. Результаты определений приведены в табл. 2.

Объемное содержание грубодисперсного материала оценено с помощью номограммы III. В качестве $\rho_{пр}$ взяты минимальные значения УЭС в пределах слоя. Определения произведены для $\mu_2 = \infty$. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер слоя	Интервал глубин, м	Состав заполнителя по геологическому описанию	Состав заполнителя по геофизическому определению	$\rho_{уд}$, Ом·м	$\rho_{пр}$, Ом·м	$\frac{\rho_m}{\rho_{пр}}$	$\beta_{пр}$	$\beta_{гр} = (1 - \beta_{пр} \times 100\ \%)$
1	0–4	Суглинки	Суглинок при $W_e \sim 9\%$	50–350 / 125	50	1–7 / 5	1–0,21 / 0,3	0–79 / 70
2	4–10	"	Суглинок при $W_e \sim 10\%$	35–50 / 40	35	1–1,43 / 1,14	1–0,7 / 0,85	0–30 / 15
3	10–15	"	Суглинок при $W_e \approx 25\%$	18–35 / 28	18	1–1,94 / 1,6	1–0,63 / 0,69	0–37 / 31
4	15–40	"	Глины при $W \sim 35\%$ и $M \approx 2$–3 г/л	5–18 / 10	5	1–3,6 / 2	1–0,6 / 0,65	0–60 / 35

Зная состав пород, можно определить их влажность. Для этого из соответствующих номограмм (прил. 4) находят $\rho_{пор}$ по приближенным значениям $W_{об}$, приведенным в табл. 2. Вычислив отношение $\rho_{уд}/\rho_{пор}$, определяют объемное содержание $\beta_{пор} = W_{об}$ воды по номограмме III (прил. 3) при $\mu_2 = \infty$. Объемную влажность переводят в весовую с помощью номограммы VIII (прил. 4), с учетом приведенных в табл. 2 значений γ. Результаты определений приведены в табл. 4.

На основании геоэлектрических разрезов составлена карта глубин залегания кровли пород таврической серии (рис. 10). На карте условными знаками показаны участки, на которых в нижней части разреза преобладают песчаники. Анализ карты позволяет установить следующее.

Кровля таврической серии имеет общее юго-западное падение, на фоне которого формируется переуглубление северо-восточного простирания. К осевой части переуглубления приурочена зона самых низких значений УЭС коренных пород, связанная с тектоническими нарушениями.

Прослои песчаников в коренных породах прослеживаются от профиля к профилю в северо-западном направлении. В этом же направлении ориентированы большие оси полярных диаграмм круговых ВЭЗ МДС (рис. 11), указывающие преимущественное простирание слоистости пород таврической серии. Интерпретация полярных диаграмм $\rho_к$ и кривых $\Delta И_п/\Delta И_t$ КВЭЗ № 2 позволяет определить значение $\lambda = 4$ и величину среднеквадратического УЭС анизотропной среды $\rho_m = 80$ Ом·м.

Полученных данных достаточно, чтобы найти соотношение суммарных мощностей аргиллитов и песчаников в разрезе и определить УЭС последних, с помощью

Таблица 4

Номер	Интервал глубин, м	Состав пород по геофизическим определениям	$\beta_{гл}$	М, г/л	γ, г/см^3	$W^{0}_{об}$	$\rho_{пор}$, Ом·м	$\rho_{уд}$ Ом·м	$\frac{\rho_{уд}}{\rho_{пор}}$	$\beta_{пор} = W_{об}$	$W_{ест}$, %
1	0–4	Заполнитель суглинок-супесь	0,2	⩽0,5	1.7	0,06	4–5	50	12,5–10	0,12–0,15	8–10
							4,5		11	0,14	9,5
		Песчано-глинистая смесь, эквивалентная песку	0,03	⩽0,5	1,55–1,85	0,04–0,02	8	50–350	6,25–44	0,22–0,03	15–2
								125	19	0,065	3,5
2	4–10	Заполнитель суглинок	0,4	⩽0,5	1,9–2,1	0,055	4	35	8,7	0,17	12
		Песчано-глинистая смесь, эквивалентная супеси	0,15	⩽0,5	1,9–2,1	0,06	5,5	35–50	6,4–9	0,23–0,17	13–10
								40	7,3	0,21	12
3	10–15	Заполнитель – суглинок	0,4	⩽0,5	1,9–2,1	0,13	4,3	18	4,2	0,34	21
		Песчано-глинистая смесь, эквивалентная легкому суглинку	0,2–0,3	⩽0,5	1,9–2,1	0,13	4,3	18–35	4,2–8,1	0,34–0,18	21–11
								28	6,5	0,23	15
4	15–40	Заполнитель глина	0,7	2–3	1,9–2,1	Полное влагонасыщение	1,7	5	2,95	0,46	30
		Песчано-глинистая смесь, эквивалентная супесь-суглинок	0,15–0,2	2–3	2,1–2,3	Полное влагонасыщение	3,5	5–18	1,4–5,15	0,7–0,27	9–16
								10	2,85	0,46	28

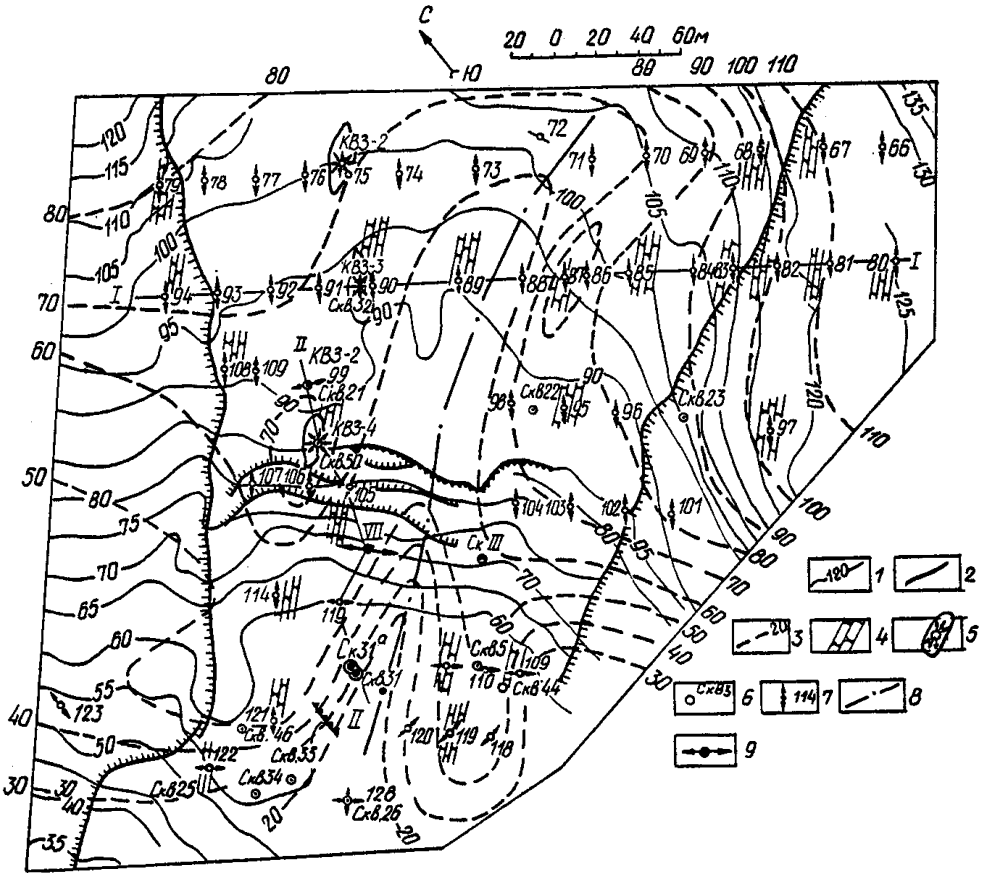


Рис. 10. Карта глубин залегания кровли таврической серии
1 – горизонтали земной поверхности; 2 – границы оползневых тел; 3 – изогипсы кровли пород таврической серии по данным электроразведки; 4 – слои высокоомных пород таврической серии по данным электроразведки; 5 – точки КВЗ КС и направление разносов питающих линий круговых диаграмм; 6 – буровые скважины; 7 – рядовые точки ВЭЗ КС; 8 – тектоническое нарушение по данным электроразведки; 9 – точки режимного ВЭЗ КС и МДС

номограммы IX (прил. 5). Приняв в качестве $\rho_{пр}$ наименьшее значение УЭС коренных пород на изучаемом участке ($\rho_{уд} = 20$ Ом·м), вычисляют отношение $\rho_m/\rho_{пр} = 4$ и, зная $\lambda = 4$, получают $\nu = 2{,}5$, $\mu = \rho_{нпр}/\rho_{пр} = 70$. Отсюда следует, что в разрезе коренных пород преобладают аргиллиты, а песчаники характеризуются большими значениями УЭС ($\mu_{нпр} = 70$, $\rho_{нпр} = 1250$ Ом·м).

На рис. 12 приведена карта изменения потенциала ЕП, на которой дополнительно вынесены изогипсы кровли пород таврической серии и границы распространения в рыхлых отложениях подземных вод с повышенной минерализацией. Можно видеть, что положительные аномалии ЕП пространственно связаны с линзами рых-

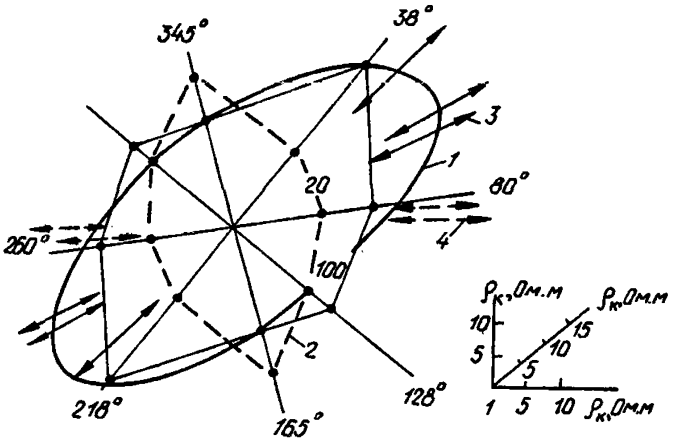


Рис. 11. Круговые диаграммы $\rho_К$ КВЭЗ № 2
1 – круговые диаграммы для больших разносов *AB* и *MN*; 2 – круговые диаграммы для малых разносов *AB* и *MN*; 3 – ориентировка большой оси эллипса анизотропии для больших разносов КВЭЗ (одиночная стрелка) и ВЭЗ МДС (сдвоенная стрелка); 4 – ориентировка большой оси эллипса анизотропии для малых разносов КВЭЗ

лых пород. Подземные воды обводненного слоя пород характеризуются повышенной минерализацией как по данным химического анализа проб воды, взятых из скважин, так и по значениям УЭС обводненных пород. Выходящие на земную поверхность границы оползня совпадают с местами предполагаемой разгрузки подземных вод на юго-восточном склоне и в днище долины водостока.

Полученная геофизическая информация достаточна для того, чтобы на ее основе составить общее представление о геологических и гидрогеологических условиях на оползневом склоне "Золотой пляж".

ПРИМЕР 2

Режимная геофизическая съемка произведена в районе г. Ульяновска с целью изучения сезонных изменений в оползневых отложениях. Комплекс геофизических методов состоял из крестовых двусторонних трехэлектродных ВЭЗ МДС, съемки ЕП и точечного зондирования КМПВ. Наблюдения выполнены на профиле, пересекающем склон сверху вниз в районе выхода аптской "плиты". Периодичность наблюдений составляла один раз в месяц. Исходные данные получены в течение сухого периода в конце лета. Остальные наблюдения выполнены осенью после выпадения обильных осадков в виде дождя (второй срок) и снега (третий срок). В близрасположенных скважинах была выполнена термометрия с шагом 1 м до глубины 40–60 м.

На изучаемом склоне формируются оползни всех трех типов: асеквентные оползни-потоки в верхней части разреза, консеквентные и инсеквентные – в элю-

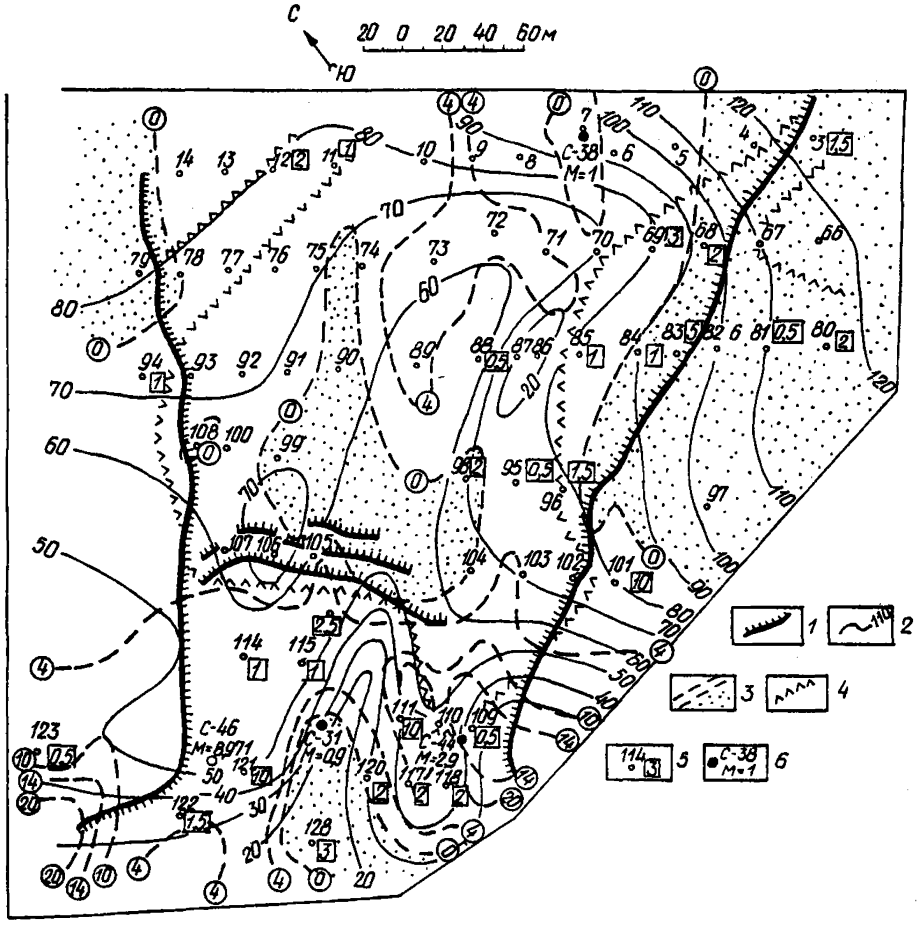


Рис. 12. Карта изопотенциала ЕП и распространения минерализованных вод
1 – границы оползней по данным инженерно-геологической съемки; 2 – изогипсы кровли пород таврической серии; 3 – изолинии ЕП и области положительных значений (точки); 4 – границы распространения минерализованных вод в рыхлых отложениях; 5 – точки ВЭЗ, их номер и значение минерализации М, г/л, поровых растворов по данным электроразведки (в квадратике); 6 – буровые скважины, их номер (числитель) и минерализация подземных вод М, г/л, по лабораторным определениям

вии коренных глин. Оползневые отложения нередко содержат смещенные блоки ненарушенных пород. Все это вместе взятое обусловливает сложную геоэлектрическую и геосейсмическую обстановку на изучаемом склоне, и, как следствие, сложный характер кривых $\rho_к$ и $\Delta И_п/\Delta И_t$ ВЭЗ МДС (рис. 13, 14) и годографов точечного зондирования КМПВ.

Количественная интерпретация данных электроразведки и сейсмического зондирования позволила установить основные элементы строения оползневого

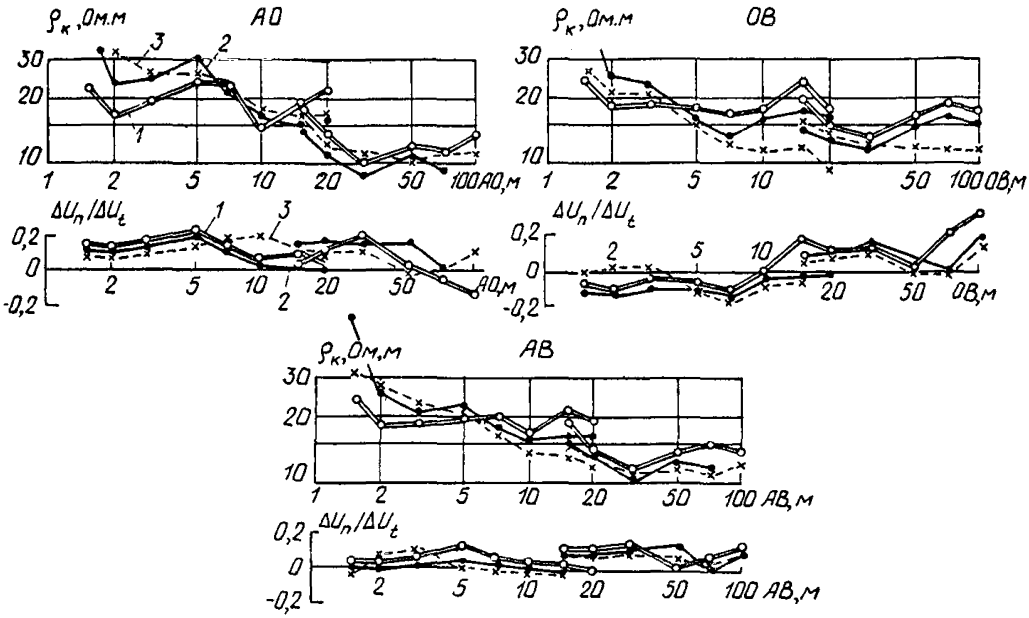


Рис. 13. Режимные кривые ρ_K и $\Delta U_n / \Delta U_t$ двустороннего трехэлектродного и симметричного ВЭЗ МДС, полученного в различные сроки (06.08.85, 21.09.85, 31.10.85)
1, 2, 3 – кривые ρ_K и $\Delta U_n / \Delta U_t$ для установок *AO; OB; AB*

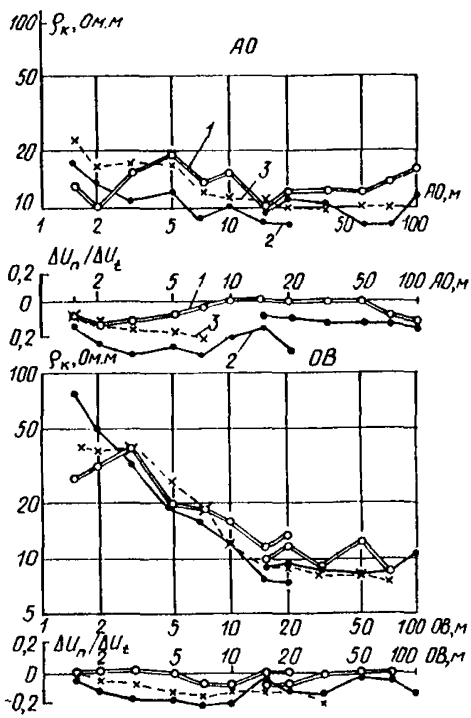


Рис. 14. Режимные кривые ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$ крестового ВЭЗ МДС, полученные 06.08.85, 21.09.85, 31.10.85
1, 2 – кривые ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$ для установок *OA*; и *OB*

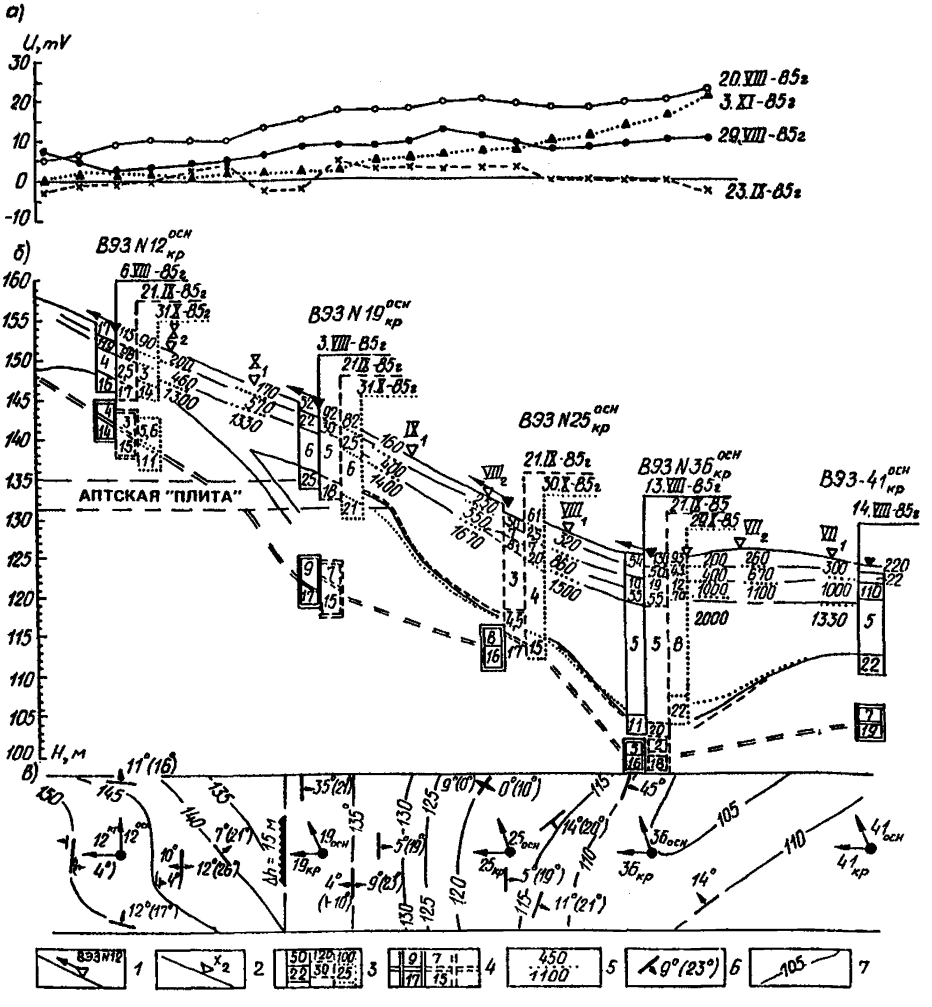


Рис. 15. Геолого-геофизический разрез

А – графики изменения потенциала ЕП в разные сроки; Б – геолого-геофизический разрез; В – план простирания геолого-геофизических границ по профилю; 1 – точки ВЭЗ МДС и направление разноса питающего электрода A; 2 – стоянки СЗ КМПВ; 3 – значение УЭС слоев, по данным интерпретации ВЭЗ МДС методом "особых" точек, на разные сроки (по крестовым ВЭЗ МДС); 4 – значение УЭС слоев нарушенных и ненарушенных пород и глубины залегания ненарушенных пород по данным интерпретации основных ВЭЗ МДС на разные сроки; 5 – сейсмические границы и значение пластовых скоростей их; 6 – элементы залегания геоэлектрических границ по данным интерпретации ВЭЗ МДС; 7 – изолинии глубин залегания коренных пород по данным интерпретации ВЭЗ МДС

склона, состав пород и динамику их свойств во времени. При этом было учтено влияние температуры пород на их УЭС. Результаты количественной интерпретации представлены в табл. 5–7 и на геолого-геофизическом разрезе (рис. 15). На разрезе видно, что все изменения происходят в первом от поверхности слое. Значения УЭС в его пределах заметно возросли за счет снижения минерализации поровых растворов после выпадения дождей. Одновременно с этим произошло понижение уровня ЕП, что является признаком активизации процессов инфильтрации во время выпадения осадков.

Более глубокие горизонты оползня не отреагировали на изменение гидрогеологической ситуации. Исключение представляет мощная зона трещиноватости между ВЭЗ 19 и 12, над которой в сентябре–октябре сформировалась отрицательная аномалия ЕП. Большие расхождения между данными интерпретации основных и крестовых ВЭЗ при определении глубины залегания коренных пород вполне закономерны. Они объясняются явлениями обтекания тока локальных положительных структур, вытянутых вдоль склона. В этом случае крестовые зондирования дают глубины залегания верхних точек валов, а основные – глубины залегания впадин между ними.

Таким образом, комплексная геофизическая съемка, выполненная в различные сроки позволила: обнаружить сезонные изменения инженерно-геологических характеристик пород, оценить масштаб и указать наиболее вероятные причины этих изменений, выявить и ограничить активные и пассивные зоны оползня.

Необходимая и достаточная по полноте информация по этим вопросам может быть получена только в результате количественной интерпретации исходных геофизических данных и широком использовании многопараметровых теоретических или экспериментальных зависимостей физических свойств пород от состава и состояния их.

3.6. *Режимные (стационарные) геофизические наблюдения на оползнях* проводят с целью изучения закономерностей изменения параметров геофизических полей в пространстве и времени с целью определения генезиса оползней и прогнозирования оползневых смещений.

Измерения производят в отдельных пунктах, расположенных в пределах активных областей оползней.

Периодичность наблюдений может меняться от нескольких суток или недель до нескольких дней и часов в зависимости от скорости развития оползневого процесса. В особых случаях возможна непрерывная запись параметров геофизических полей.

3.7. Физические предпосылки допускают применение комплекса электроразведочных и сейсмических методов для контроля за изменением положения внешних и внутренних границ оползня, его мощности, УГВ, состояния физико-механических свойств пород оползневого тела, и, в особенности, прочностных и упругих свойств, а также характеристик напряженного состояния.

Для стационарных наблюдений используют тот же комплекс геофизических методов, что и при режимной съемке. Отличие состоит в том, что увеличивается объем режимных наблюдений в скважинах с целью изучения изменения свойств и инженерно-геологических характеристик во внутренних точках массива.

Наземная электроразведка должна состоять из вертикальных зондирований и профильной съемки ЕП в направлении разносов питающих линий ВЭЗ.

Таблица 5

Номер слоя	Интервал глубин, м	Наименование пород по геологическому описанию	t, C°	$\rho^{t}_{уд}$, Ом·м	$\rho^{18°}_{уд}$, Ом·м	V_p, м/с
1	0–1,5	Почвенно-растительный слой, суглинок с дресвой известняка и песчаника	11–12 11,5	92–220 140	76–180 115	160–320 240
2	1,5–3	Перемятый суглинок с пластичной глиной, песком, обломками известняка	8	22–98 46	16,5–73 34,5	300–460 380
3	3–6	Смещенная аптская "плита" (сланцеватая глина с прослоями конкреций железистого известняка)	7,5	19–110 65	41–82 49	1000
4	3–13	Глина пластичная с зеркалами скольжения, влажная	7	3–7 4,15	2,16–5,1 3	860–2000 1380
5	> 13	Коренные опесчаненные глины	8	11–25 17,1	8,25–19 13	–

Продолжение табл. 5

Номер слоя	Интервал глубин, м	Наименование пород по геологическому описанию	Состав пород по геофизическим определениям	$\beta_{гл}$	М, г/л	$W_{ест}$, %	γ, г/см³	$W_{об}$	П, %
1	0–1,5	Почвенно-растительный слой, суглинок с дресвой известняка и песчаника	Супесь по УЭС Супесь по V_p	0,1	< 0,5	10–5 8	1,3–1,7 1,5	0,12–0,08 0,1	56–41 48
2	1,5–3	Перемятый суглинок с пластичной глиной, песком, обломками известняка	Суглинок-супесь	0,3–0,15 0,2	0,5	30–8 10	1,7–1,7 1,7	0,4–0,13 0,15	53–42 43
3	3–6	Смещенная аптская "плита" (сланцеватая глина с прослоями конкреций железистого известняка)	Супесь-песок по УЭС	0,15–0,05 0,1	2–0,5 1,25	Полное влагонасыщение	–	0,3–0,45	–
			Суглинок-глина по V_p	0,5–0,6	–	–	1,9–2,1	–	47–34 41

Продолжение табл. 5

Номер слоя	Интервал глубин, м	Наименование пород по геологическому описанию	Состав пород по геофизическим определениям	$\beta_{гл}$	М, г/л	$W_{ест}$, %	γ, г/см^3	$W_{об}$	П, %
4	3–13	Глина пластичная с зеркалами скольжения, влажная	Глина	0,5–1	5–15	Полное влагонасыщение	1,9–2,05	0,4–0,5	50–44
				0,7	10		1,95		46
5	> 13	Коренные опесчаненные глины	”	0,5–0,2	1–0,8	То же	2,2–2,05	0,3–0,4	41–31
				0,3	1		2,1	0,35	37

Таблица 6

Номер слоя	Интервал глубин, м	Состав пород по геофизическим определениям	$\rho^{18°}_{уд}$, Ом·м	$\beta_{гл}$	М, г/л	$\rho_{пор}$ Ом·м	$\rho^{18°}_{уд}/\rho_{пор}$	$\beta_{пор} = W_{об}$	γ, г/см^3	$W_{ест}$, %	П, %
1	0,0–1,5	Почвенно-растительный слой: супесь	76–180	0,1	0,1	15	5,1–12	0,28–0,12	1,3–1,7	24–8	62–40
			115				7,7	0,2	1,5	17	53
2	1,5–3	Супесь-суглинок, оползневые отложения	16,5–73	0,3–0,05	0,5	7–10	1,95–8,6	0,65–0,18	1,7	70–12	60–40
			34,5	0,15		8,5	4,05	0,36		25	47
3	3–6	Сланцеватая глина, аргиллит (супесь)	19–110	0,15–0,05	2–0,5	6	3,2–17	0,44–0,09	1,9–2,1	33–5	43–25
			65	0,1	1,5		10,8	0,14	2	9	30
4	3–13	Глина пластичная	2,16–5,1	0,5–1	5–15	1,5–1,2	1,8–3,4	0,65–0,43	1,9–2,05	60–27	50–43
			3	0,7	10		2,5	0,52	1,95	40	47
5	> 13	Коренные глины, суглинки	8,25–19	0,5–1	1–0,8	2,1–4,2	3,9–4,55	0,38–0,32	2,2–2,05	22–20	40–35
			13	1	1	3,2	4,2	0,35	2,1	21	38

ВЭЗ предпочтительнее выполнять установками МДС с целью получения максимального объема информации об изменении УЭС пород как под центром зондирования, так и в его окрестностях.

Кривые ВЭЗ МДС обязательно должны быть проинтерпретированы количественно. Результаты количественной интерпретации режимных ВЭЗ изображают в виде геоэлектрических разрезов и планов простирания геоэлектрических границ на различные сроки. Последовательность их изменения в различные сроки отражает изменение строения массива оползня. Геоэлектрические параметры (УЭС пород, глубина залегания, простирание и угол падения геоэлектрических границ), полученные в разные сроки, подвергают статистической обработке по каждой геоэлектрической границе в отдельности с целью определения пределов случайных ошибок интерпретации и присутствия систематических отклонений. Графики изменения геоэлектрических параметров во времени строят для тех геоэлектрических горизонтов, для которых установлены систематические отклонения. Влияние случайных ошибок должно быть ослаблено или установлено любым из известных способов, в том числе, путем осреднения по трем или пяти точкам.

Геологическая и инженерно-геологическая природа изменений может быть установлена в результате анализа геоэлектрических разрезов и планов простирания геоэлектрических границ на различные сроки наблюдения. Физические свойства определяются с помощью номограмм (см. прил. 1–8), изображающих зависимости УЭС пород от их состава (глинистости), температуры и минерализации поровых растворов.

Непрерывную запись изменения $\rho_к$ и $\Delta U_п/\Delta U_t$ следует организовать лишь после того, как будут установлены разносы питающих и приемных линий, при которых эти параметры наилучшим образом реагируют на изменения УЭС и элементов залегания границ того или иного слоя.

Результаты наблюдений целесообразно представлять в виде отношений:

$$\frac{\rho_{к\,нач} - \rho_{к\,срок}}{\rho_{к\,нач}} = 1 - \frac{\rho_{к\,срок}}{\rho_{к\,нач}} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta U_п/\Delta U_{t\,нач} - \Delta U_п/\Delta U_{t\,срок}}{\Delta U_п/\Delta U_{t\,нач}} = 1 - \frac{\Delta U_п/\Delta U_{t\,срок}}{\Delta U_п/\Delta U_{t\,нач}}$$

графики которых строятся друг под другом, с началом координат в $\rho_{к\,нач}$ и $\Delta U_п/\Delta U_{t\,нач}$.

Наиболее полную информацию позволяет получить сочетание режимной съемки методом ВЭЗ МДС и непрерывной записи $\rho_к$ и $\Delta U_п/\Delta U_t$ при наиболее эффективных разносах питающей и приемной линий.

Режимные наблюдения ЕП производят по одним и тем же точкам при одном и том же положении "нулевого" электрода, если применяется модификация потенциала.

В течение одного срока наблюдений профиль должен быть пройден трижды. За окончательный результат принимается среднее из трех значений. Неповторяющиеся аномальные отклонения исключаются.

Наблюдения в различные сроки приводят к "нулю" первого срока.

Результаты режимных наблюдений изображают в виде графика U мВ или ΔU мВ на исходный момент времени и графиков изменения отношений:

Номер слоя	Интервал глубин	Состав пород по геофизическим данным	Сроки наблюдений	$\rho_{уд}^{18°}$, Ом·м	$\beta_{гл}$
1	0,0–1,5	Почвенно-растительный слой; супесь-суглинок с щебенкой	6–14/VIII	14–44 / 30	0,3–0,07 / 0,15
			21/IX	75–110 / 92	0,15
			29–31/X	49–73 / 61	0,15
2	1,5–3	Суглинок-супесь Оползневые отложения	6–14/VIII	16,5–89 / 53	0,3–0,15 / 0,23
			21/IX	18,7–73 / 46	0,3–0,15
			29–31/X	16,5–67,5	0,3–0,05

$$\frac{U_{нач} - U_{ср}}{U_{нач}} = 1 - \frac{U_{ср}}{U_{нач}} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta U_{нач} - \Delta U_{ср}}{\Delta U_{нач}} = 1 - \frac{\Delta U_{ср}}{\Delta U_{нач}},$$

построенных для наиболее изменчивых аномалий ЕП.

Стационарные сейсмические наблюдения включают наземную сейсморазведку и сейсмоакустические измерения в скважинах. Наземные работы проводятся по одному или двум профилям, пересекающим активные зоны оползня. Эти профили должны выходить на стабильный участок оползня или ненарушенный склон. Сеть сейсмических наблюдений жестко закрепляется на местности. При проведении наблюдений необходимо в маскимальной мере обеспечить идентичность условий возбуждения и приема упругих колебаний. Сейсмические наблюдения в обязательном порядке должны сопровождаться топографической съемкой, поскольку в значениях измеренных сейсмических характеристик вводятся поправки за изменение расстояний между точками наблюдений.

Все работы ведутся по стандартной методике продольного профилирования с возбуждением и приемом продольных (схема Z-Z) и поперечных (схема У-У) волн. Шаг наблюдений и расстояние между ПВ выбирают в соответствии с особен-

Таблица 7

М, г/л	$\rho_{пор}$, Ом·м	$\frac{\rho_{уд}^{18°}}{\rho_{пор}}$	$W_{об} = \beta_{пор}$	γ, г/см³	П, %	$W_{ест}$, %
0,5–0,8	5,5–14	2,55–3,15	0,52–0,43	1,3–1,7	70–52	80–33
0,01–0,05	10 30–40	3 2,5–2,75	0,45 0,52	1,5 1,3–1,7	60 70–53	33 80–33
0,05–0,15	35 20–30	2,65 2,45–2,45	0,52	1,5 1,3–1,7	60 70–53	33 80–33
0,5	25 7–10	2,45 1,95–8,6	0,65–0,18	1,5 1,7	60 60–43	33 60–42
0,5	8,5 7–10	4,05 1,9–8,7	0,36 0,65–0,18	1,7	47 60–43	47 60–42
0,5	8,5 7–10	4,1 1,95–8,6	0,36 0,65–0,18	1,7	47 47	47 47

ностями строения изучаемого оползня, требуемой глубинностью и детальностью исследований.

Результаты стационарных сейсмических наблюдений представляют как в виде временных рядов изменения скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, эффективных коэффициентов поглощения $\bar{\alpha}_p$ и $\bar{\alpha}_s$, относящихся к различным частям оползневого массива в плане и разрезе, так и в форме набора различных диаграмм изменения сейсмических параметров в различные сроки. В ряде случаев при построении временных рядов целесообразно использовать не скорость распространения сейсмических волн, а время одного из экстремумов регистрируемой волны на определенном расстоянии от ПВ. Это вызвано тем, что точность определения времени экстремума, особенно в условиях сложной волновой картины, значительно выше, чем точность определения времени вступления.

Места размещения скважин для проведения сейсмических наблюдений во внутренних точках оползневого массива выбирают с учетом особенностей изменения сейсмических характеристик при развитии оползневого процесса. В частности, скважины, в которых предлагается проведение метода СП, следует располагать на стабильных, не вовлеченных в оползневый процесс, участках. Это позволяет продлить срок измерений и сохранить без потери информацию о развивающемся процессе, поскольку уменьшение устойчивости пород оползневого склона вызывает изменение сейсмических характеристик в ненарушенной его части.

ПРИМЕР 3

Режимные электроразведочные наблюдения были проведены в наиболее сложной и активной части оползня "Золотой пляж" ЮБК. Они заключались в многократном зондировании на одной точке симметричной установкой по методу двух составляющих. При этом местоположение центра ВЭЗ МДС, питающих и приемных электродов сохранялось неизменным в течение всего времени. Периодичность измерений менялась от одного–двух раз в месяц до одного раза в два месяца. Результаты изображены в виде кривых ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$, часть из которых представлена на рис. 16.

Кривые ρ_K ВЭЗ МДС были проинтерпретированы методом "особых" точек, для чего потребовалась "реставрация" искаженных отрезков кривых ρ_K во втором элементе Q слоистого разреза. В результате были определены значения УЭС и мощностей геоэлектрических слоев в различные моменты времени. Отрезки кривых ρ_K и $\Delta U_n/\Delta U_t$, на которых обнаруживается влияние наклонных границ, интерпретировались с помощью номограмм для контакта двух сред, наклонная плоскость которого находится под центром ВЭЗ. При этом в роли ρ_1 и h_1 выступали координаты эквивалентного слоя $H_э$ и $\rho_э$ для второго элемента Q. В результате было определено простирание наклонной плоскости контакта относительно направления питающих электродов (угол φ). Результаты количественной интерпретации представлены в виде геоэлектрических разрезов и планов простирания геоэлектрических границ для всех сроков наблюдений, часть из них показана на рис. 17.

Геологическая привязка геоэлектрических горизонтов может быть уверенно произведена на основании данных параметрических ВЭЗ КС (см. табл. 2, 3) и сейсморазведки.

Первый от поверхности двухметровый горизонт сложен маловлажными песчаными отложениями с валунами и щебнем, о чем свидетельствуют высокое значение УЭС ($\rho_1 = 90–210$ Ом·м) и низкая скорость распространения продольных волн ($V_p^I = 250–400$ м/с). Второй геоэлектрический горизонт имеет мощность около 2,5 м и представлен маломощными суглинками с большим содержанием грубодисперсного материала, на что указывают повышенные значения УЭС ($\rho_2 = 45–90$ Ом·м) и скорости продольных волн ($V_p^{II} = 600$ м/с). Третий горизонт характеризуется переменной во времени мощностью ($h_3 = 3,5–7$ м), устойчивыми значениями УЭС ($\rho_3 = 31–46$ Ом·м) и высокой скоростью распространения продольных волн ($V_p^{III} = 1000–1400$ м/с). Таким сочетанием физических свойств могут обладать только сильновлажные (обводненные) суглинки с большим содержанием обломочного материала ($\beta_{гр} = 0,8$; $\beta_{гл}^{г} = 0,2$) и слабой минерализацией подземных вод $M \approx 0,2$ г/л. Четвертый от поверхности горизонт обладает переменной во времени мощностью $h_4 = 5–16$ м и УЭС ($\rho_4 = 6–17$ Ом·м) пород. Судя по значениям УЭС, слой может быть сложен обводненными суглинками с большим содержанием обломочного материала и повышенной минерализацией подземных вод. Ребро наклонной геоэлектрической границы между третьим и четвертым горизонтами по местоположению (в разрезе и плане) совпадает с границей оползня, приуроченной к перегибу в рельефе земной поверхности и в кровле коренных пород. Пятый геоэлектрический горизонт обладает повышенными по сравнению с предыдущими значениями УЭС ($\rho_5 = 33–260$ Ом·м) и анизотропией, признаком которой являются преимущественно постоянные отрицательные значения $\Delta U_n/\Delta U_t$ на больших разносах AB/2. На основании имеющихся

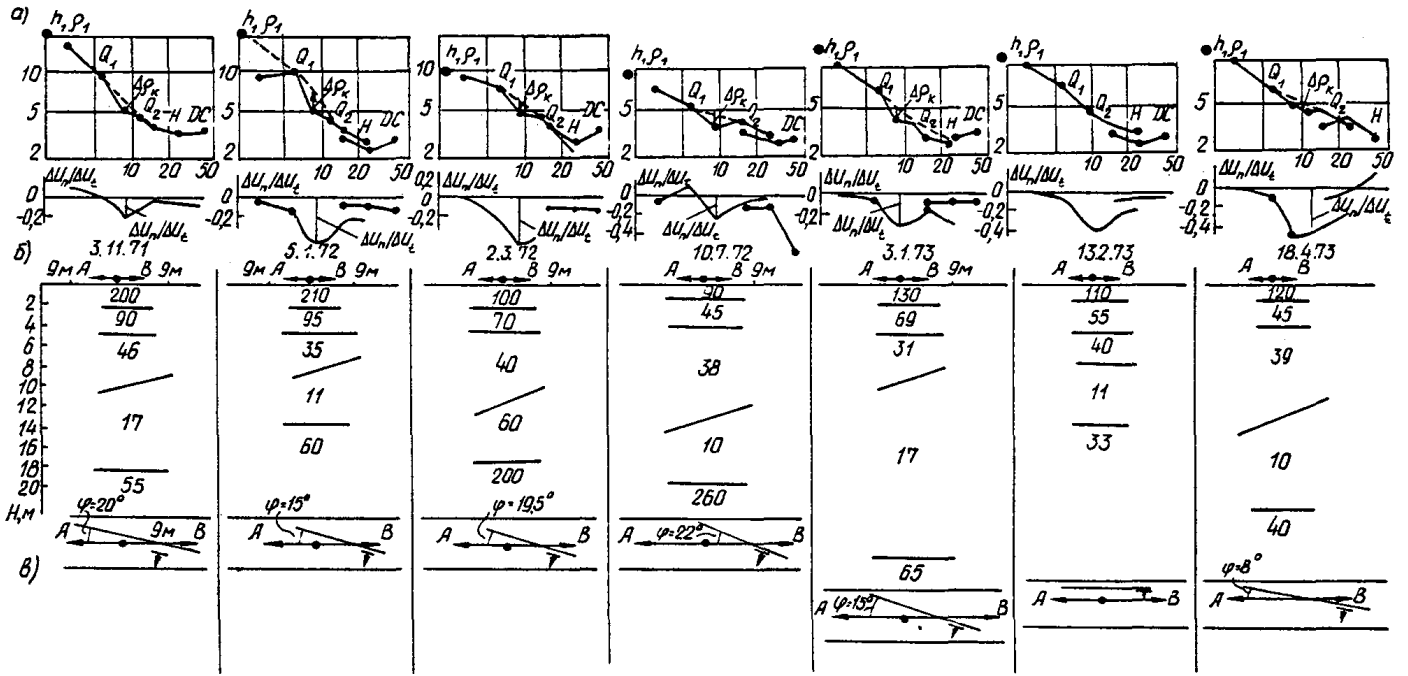


Рис. 16. *а* – режимные кривые $\rho_к$ и $\Delta U_п / \Delta U_t$ симметричного ВЭЗ МДС; *б* – геоэлектрический разрез на разные сроки; *в* – план простирания наклонной плоскости контакта

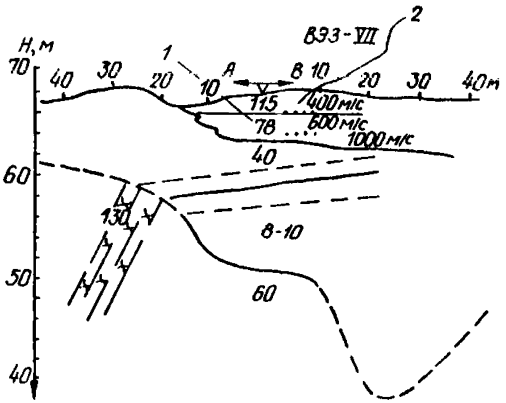


Рис. 17. Геоэлектрический и геосейсмический разрезы
1 – геоэлектрические границы и величина значения УЭС; 2 – геосейсмические границы и величины значения продольных скоростей (V_p)

данных можно заключить, что пятый горизонт связан с породами таврической серии, слоистость которых простирается на северо-запад под углом $\varphi = 80-70^{\circ}$ к направлению разносов питающих электродов. Полученные элементы залегания хорошо согласуются с данными круговых ВЭЗ МДС в широком диапазоне изменения коэффициента кажущейся анизотропии ($1{,}4 \leqslant \lambda \leqslant 5$).

С целью обнаружения закономерностей изменения геоэлектрических свойств пород во времени были составлены вариационные кривые отклонений относительных значений мощностей и УЭС слоев от их средних значений. Анализ кривых позволил установить следующее. Для первых двух слоев характерно близкое к нормальному распределение относительных отклонений от средних значений УЭС и мощности. Их значения не выходят за пределы ± 0,4 в 80% случаев и соизмеримы с ошибками интерпретации осложненных кривых ВЭЗ КС методом "особых" точек. Отсюда следует, что изменения геоэлектрических параметров первого и второго слоев незакономерны и не выделяются на фоне случайных ошибок интерпретации (рис. 18). Нормальный закон распределения отклонений от среднего нарушается при определении мощности третьего и УЭС и мощности четвертого слоев. Имеющее место сочетание экстремумов на вариационных кривых указывает однозначно на наличие закономерных изменений мощности и УЭС четвертого горизонта, которые могут быть связаны с колебанием уровня и минерализации подземных вод таврической серии вблизи места их разгрузки в рыхлые отложения.

На рис. 19 приведены графики изменения глубины залегания кровли четвертого горизонта и его УЭС в различные сроки наблюдения и изменения УГВ в скважинах в различные сроки. Для сокращения влияния случайных ошибок интерпретации было произведено осреднение графиков по трем точкам. Анализ осредненных кривых позволяет установить следующее. Изменение глубины залегания уровня минерализованных вод носит циклический характер. Уровень подземных вод приближается к земной поверхности в зимнее и летнее время и удаляется весной и осенью. Амплитуда колебаний уровня минерализованных вод достигает четырех метров. Полученные данные подтверждаются результатами режимных наблюдений за УГВ в скважинах, расположенных ниже и выше режимного ВЭЗ МДС. Несмотря на расхождения в простанстве и времени между различными способами

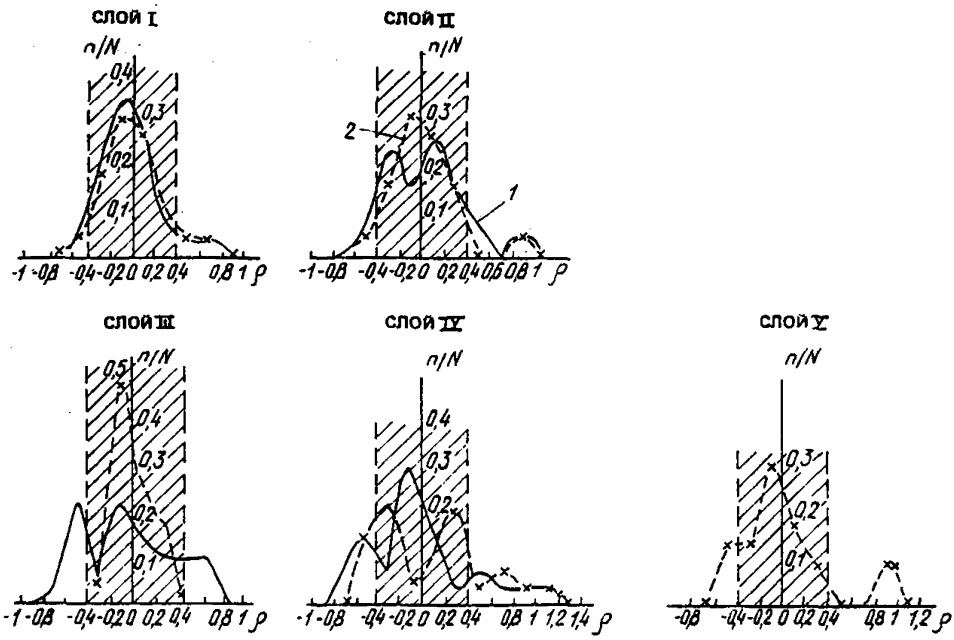


Рис. 18. Вариационные кривые отклонения относительных значений мощностей и УЭС слоев от их средних значений
1 – отклонения мощностей от среднего значения; 2 – отклонения УЭС слоев от среднего значения

наблюдений, общим для полученных с их помощью результатов является наличие летнего максимума и весеннего минимума, а также близкие амплитудные колебания уровня подземных вод. УЭС обводненного слоя меняется также циклически, но с меньшим периодом изменений. Максимальные значения УЭС достигают 14–15 Ом·м, которые в суглинках могут соответствовать минерализации подземных вод от 1 до 3 г/л при изменении глинистости отложений от 0,4 до 0,2. Минимальные значения УЭС равны 6–7 Ом·м и соответствуют минерализации подземных вод от 3 до 10 г/л при тех же пределах глинистости. Колебания уровня минерализованных вод сопровождаются изменением простирания связанной с ним геоэлектрической границы. Эти изменения не превышают $\varphi = \pm 10^{\circ}$ и не выходят за пределы ошибок интерпретации кривых, симметричных ВЭЗ МДС.

Таким образом, режимные наблюдения методом ВЭЗ МДС позволяют установить геоэлектрическое строение и УЭС пород в изучаемом объеме: обнаружить слои, которые меняют во времени свои свойства и элементы залегания; определить вид и пределы этих изменений; установить геолого-гидрогеологическую природу временных изменений на основании известных зависимостей УЭС от состава, строения и состояния пород. Этот вид исследований является наиболее информативным из всех электроразведочных методов и может быть рекомендован для режимных наблюдений на всех типах оползней с учетом особенностей их строения.

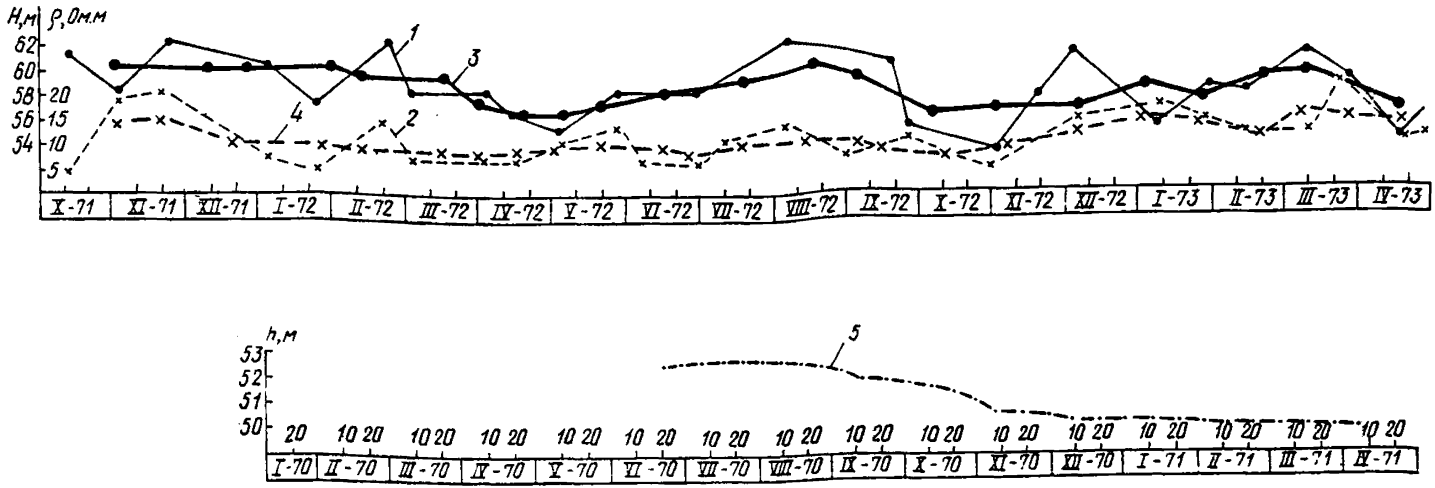
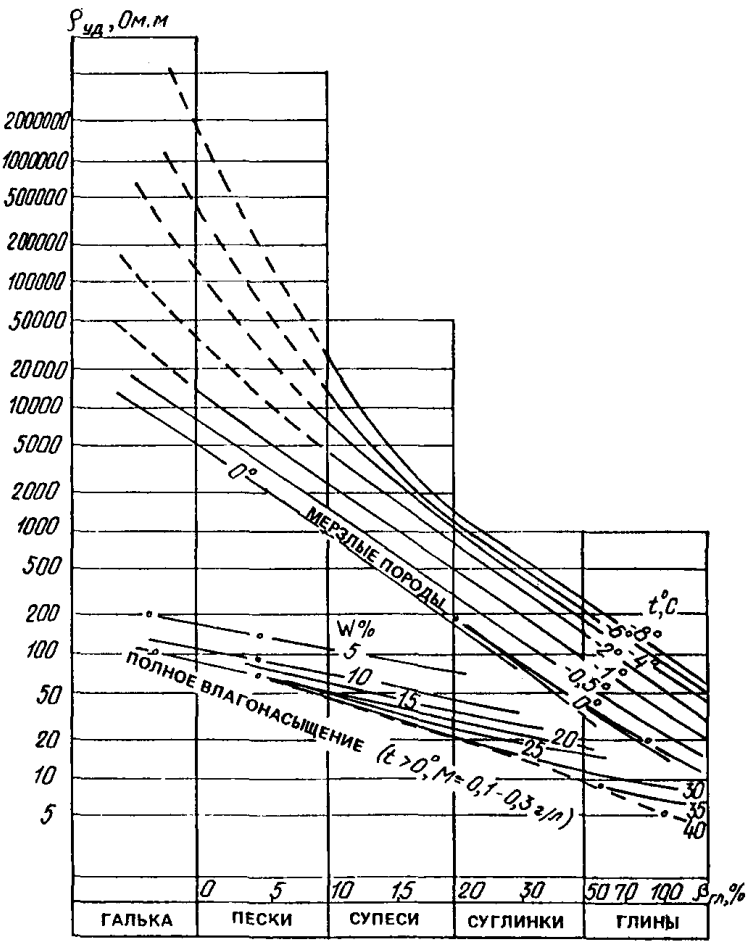


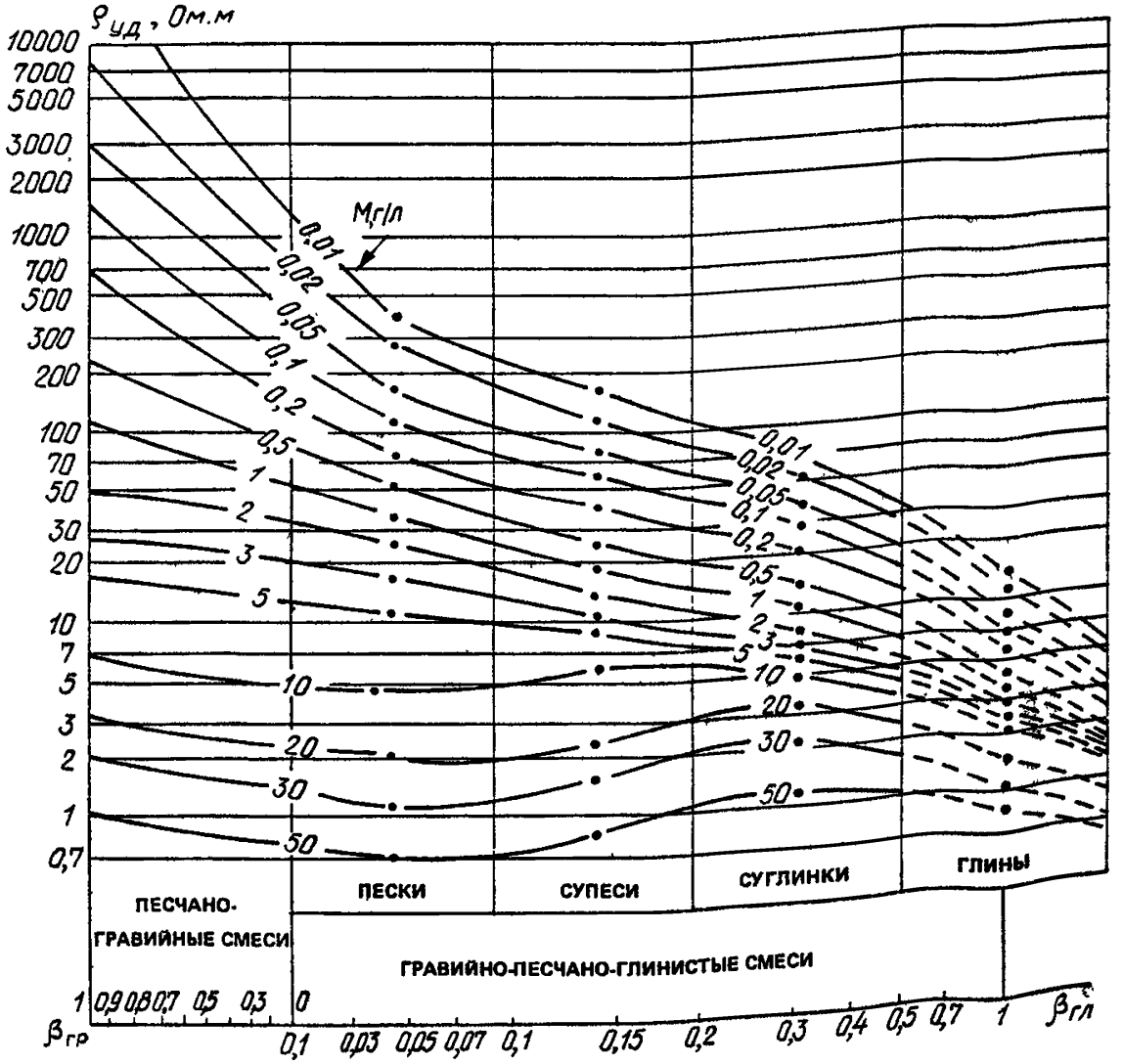
Рис. 19. Графики изменения глубины залегания кровли четвертого геоэлектрического горизонта и величины его УЭС в различные сроки наблюдения и график изменения УГВ в различные сроки наблюдения в скважинах

1 – график изменения УЭС слоя в различные сроки; 2 – осредненный по трем точкам график УЭС; 3 – график изменения глубины залегания поверхности четвертого геоэлектрического слоя по данным интерпретации режимного ВЭЗ; 4 – осредненный по трем точкам график глубины залегания поверхности четвертого слоя; 5 – график изменения УГВ в различные сроки в скважине

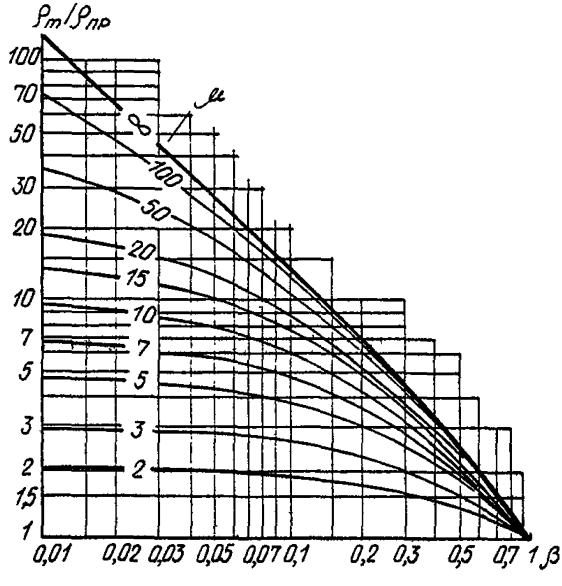
Номограмма I. Зависимость УЭС слабоминерализованных дисперсных пород от их состава, влажности или температуры



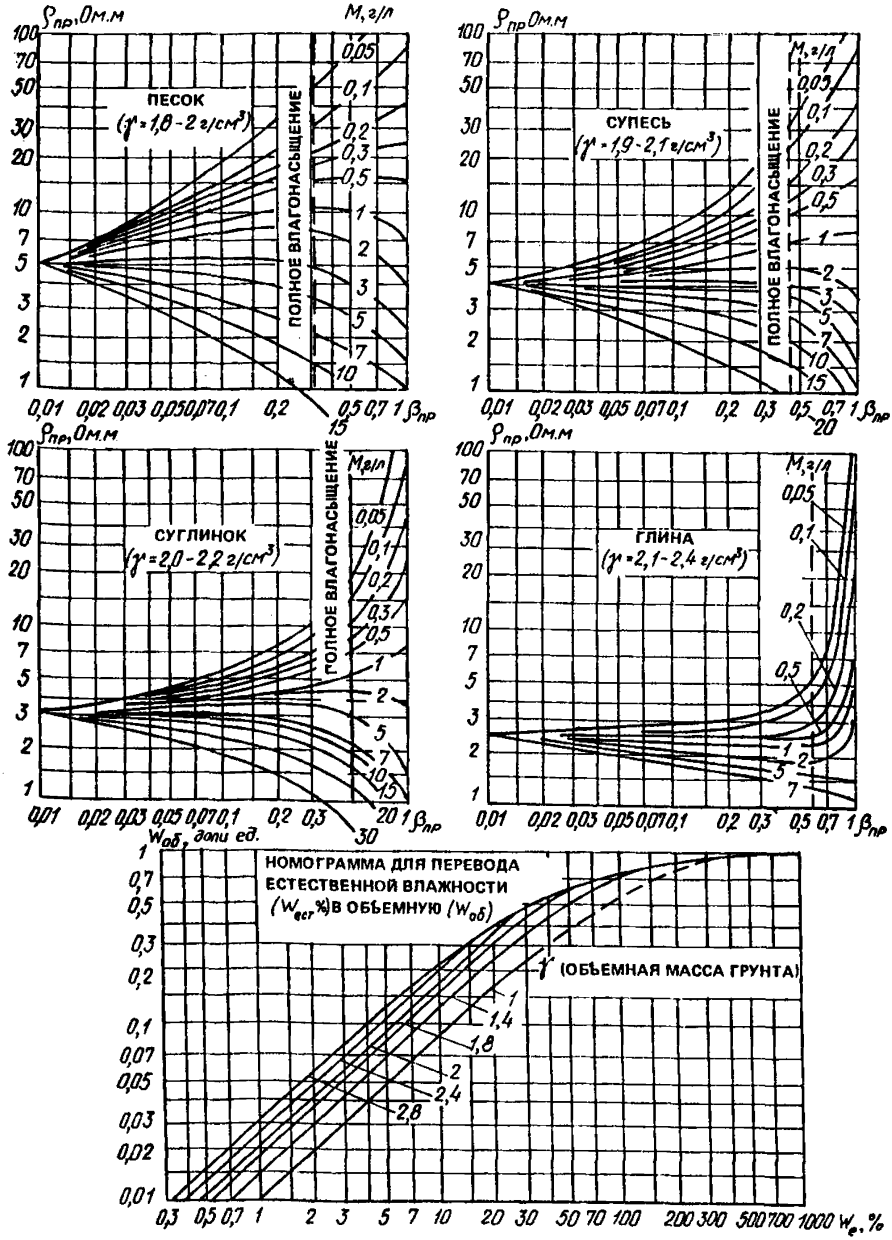
Номограмма II. Зависимость УЭС дисперсных пород от их состава и минерализации подземных вод



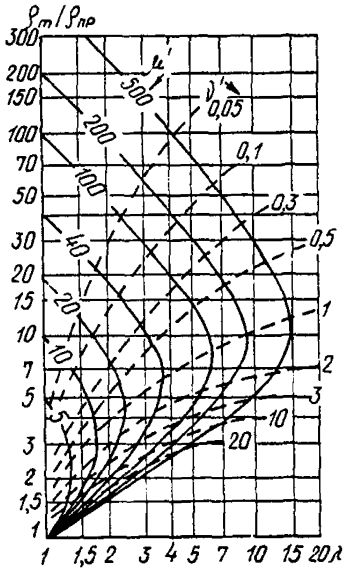
Номограмма III. Для оценки объемного содержания грубообломочного материала в песчано-глинистых отложениях



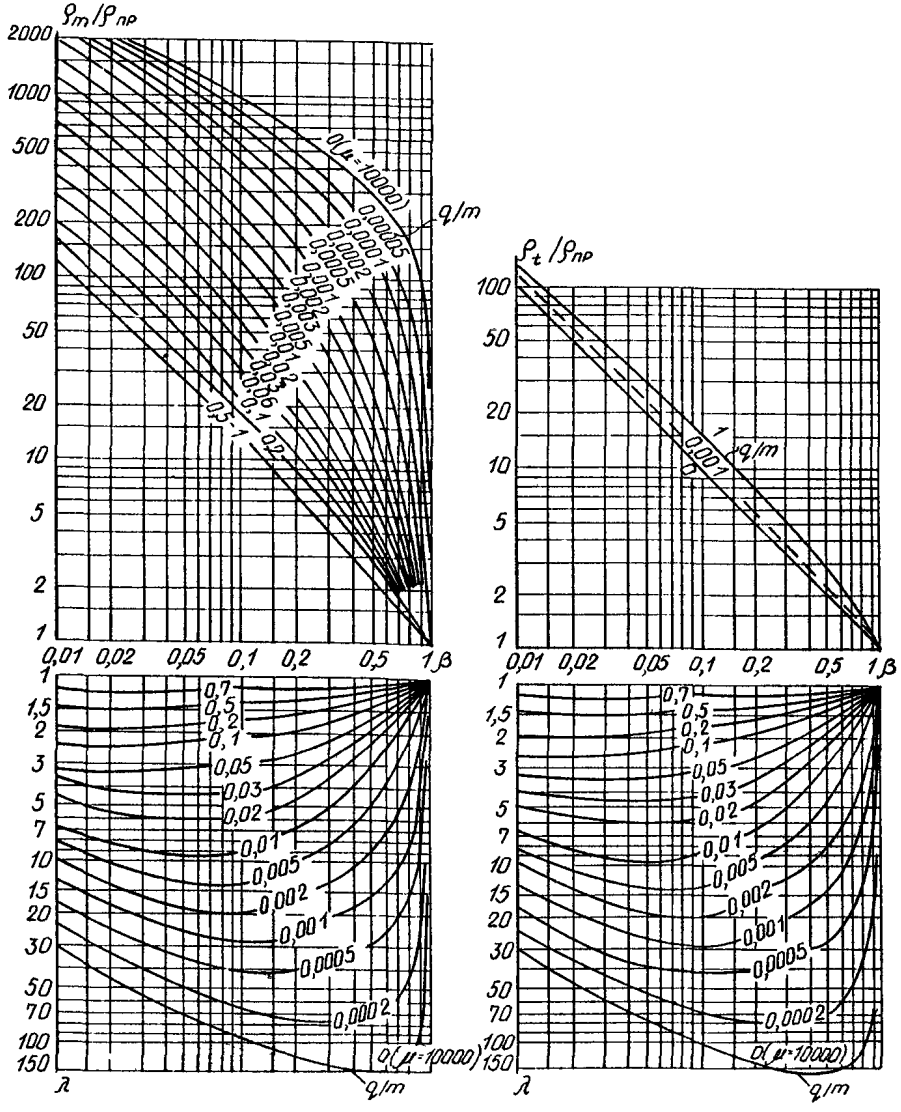
Система номограмм IУ–УIII, изображающих зависимость УЭС порового раствора от минерализации и объемного содержания поровой влаги в породах различного состава



Номограмма IX. Для оценки соотношения суммарных мощностей, проводящих и непроводящих электрический ток прослоев в слоистых разрезах

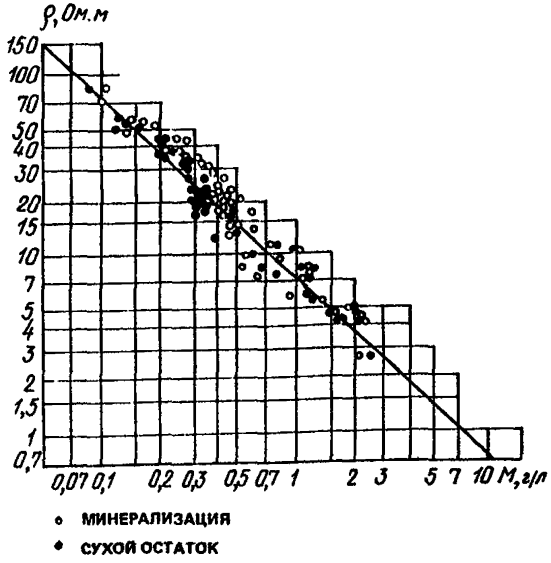


Номограмма X. Для определения объемного содержания проводящего материала в порах и трещинах по величинам среднеквадратического УЭС и коэффициента анизотропии толщи



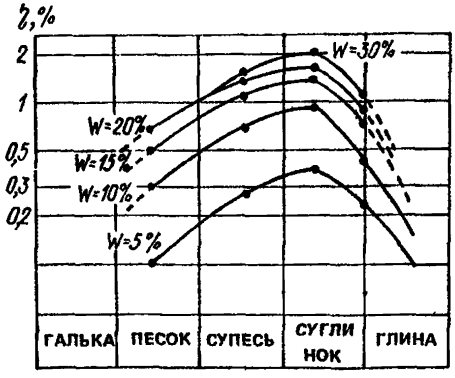
ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Номограмма XI. Зависимость УЭС воды от ее минерализации (приведенная к 18 °С)



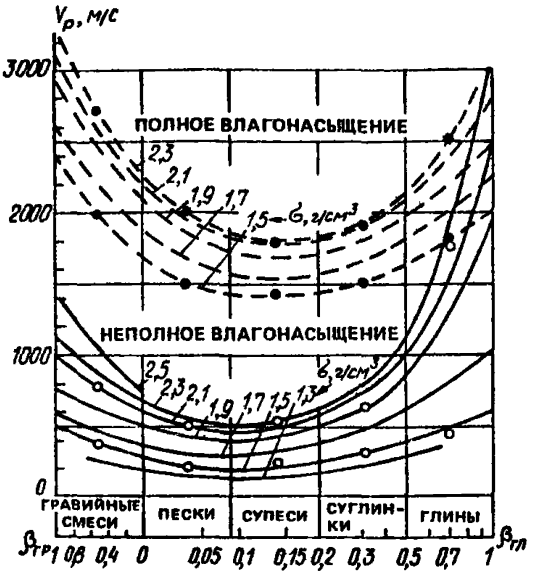
ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Номограмма XII. Зависимость истинной поляризуемости пород от состава и влажности при минерализации М = 0,5 г/л



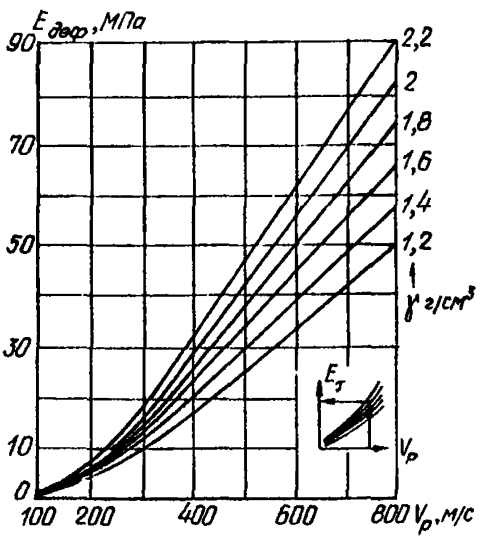
ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Номограмма XIII. Зависимость скорости продольных волн от состава и объемной массы при неполном и полном влагонасыщении *



ПРИЛОЖЕНИЕ 10

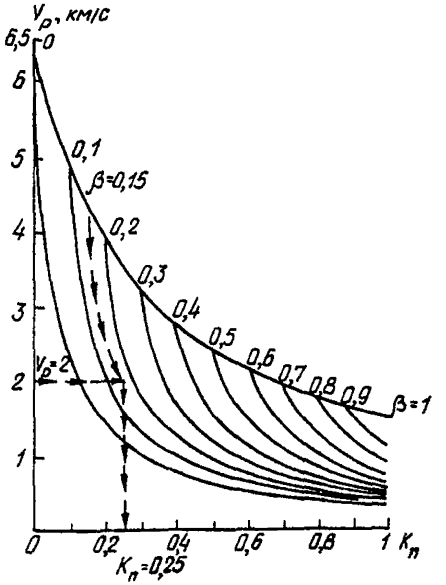
Номограмма XIV. Зависимость модуля деформации песчано-глинистых отложений от скорости продольных волн и объемной массы пород



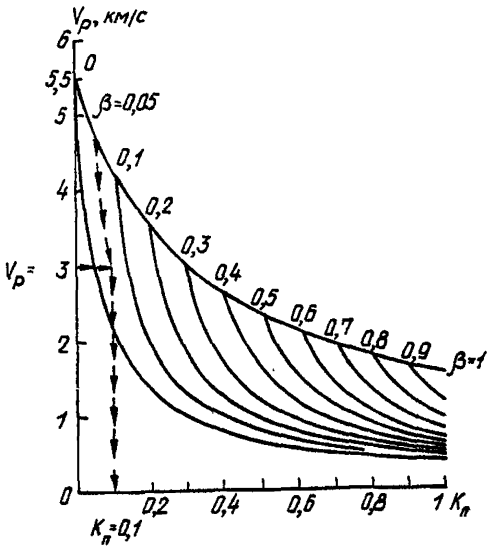
---

* Номограмма составлена А.Н. Боголюбовым по опубликованным данным.

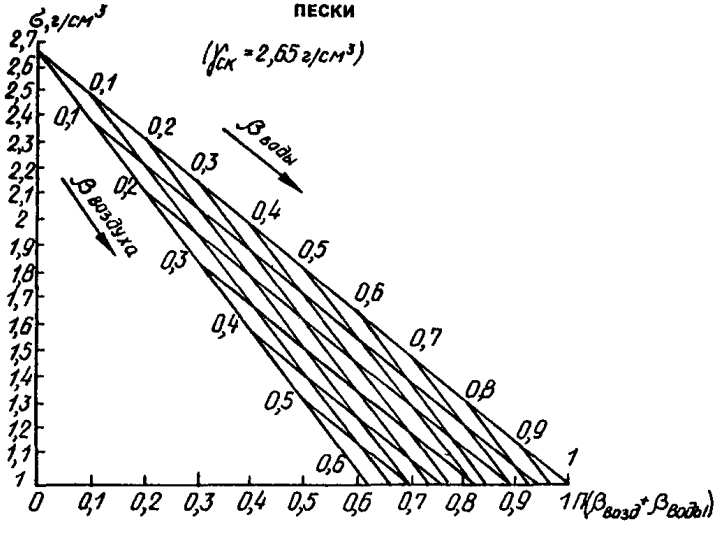
Номограмма XУ. Зависимость скорости продольных волн в трещиноватых известняках от пористости и объемного содержания в них воздуха $\beta_{воздуха}$ и заполнителя $\beta_{гл}$

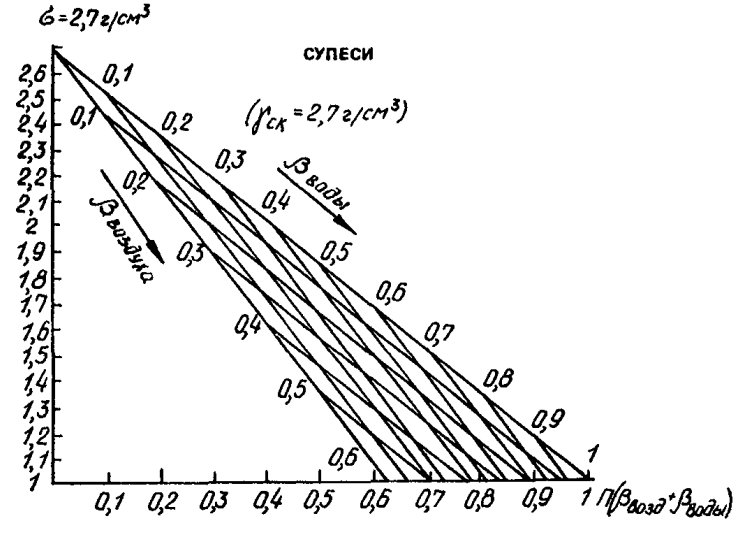


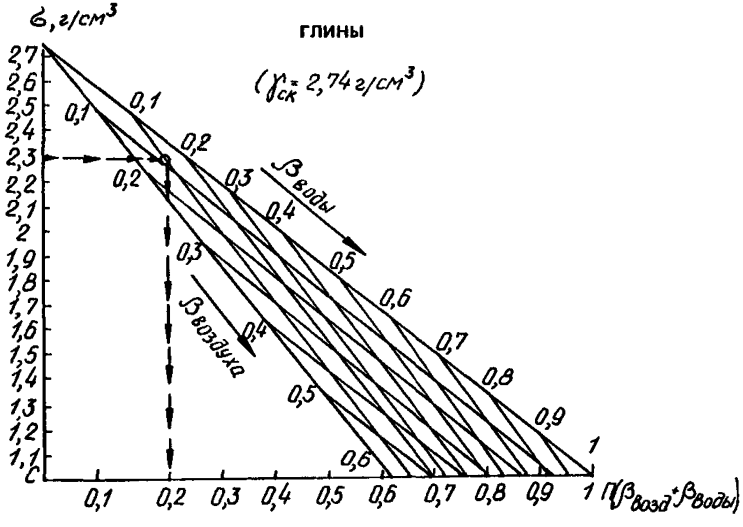
Номограмма XУI. Зависимость скорости продольных волн в песчаниках от их пористости и объемного содержания в них воздуха и заполнителя



Семейство номограмм XVII–XIX, отображающих зависимость объемной массы песков, супесей, суглинков и глин от пористости и влажности







ЛИТЕРАТУРА

1. **Руководство** по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. – М.: Стройиздат, 1984.

2. **Рекомендации** по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка). – М.: Стройиздат, 1984.

3. **А.С. Семенов.** Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л.: Недра, 1980.

4. **Н.Н. Горяинов, Ф.М. Ляховицкий.** Сейсмические методы в инженерной геологии. – М.: Недра, 1979.

5. **В.Н. Никитин.** Основы инженерной сейсмики. – М.: изд-во МГУ, 1981.

gost.e-ecolog.ru