

С. А. Клещенко, В. Б. Сидоренко, Т. С. Куковская

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ПО ТРАССАМ ПОДВОДНЫХ ЛИНИЙ КАБЕЛЬНОЙ СВЯЗИ ЕВПАТОРИЯ–КЕРЧЬ И СЕВАСТОПОЛЬ–ПОТИ

Розглянуто результати вивчення водно-фізичних і фізико-механічних властивостей пізньочетвертинних донних осадків по маршрутах ліній підводного кабельного зв'язку Євпаторія–Керч і Севастополь–Поти. Осадки характеризуються високою вологоємністю і вологістю, зниженою об'ємною масою, високими показниками консистенції і невеликою липкістю. Показано, що сучасні осадки в інтервалі глибин 0–30 см знаходяться в текучому стані і практично не мають несучої здатності. Осадки шельфу набувають мінімальної несучої здатності, починаючи з глибин 30–50 см, а глибоководні, крім розрізів з наявністю сапропелів, – із глибин понад 50 см.

Results of studying water-physical and physicomechanical properties Late-Quaternary ground deposits on routes of lines of underwater cable communication Evpatoria-Kerch and Sevastopol-Poti are considered. Deposits are characterized by a high moisture capacity and the humidity lowered in volumetric weight, high values of parameters of a consistence and small stickiness. It is shown, that modern deposits in an interval of depths of 0-30 sm are in a fluid condition and practically have no bearing ability. Deposits of a shelf get the minimal bearing ability, since depths of 30-50 sm, and deep-water, excepting sections with presence of sapropels, – from depths more than 50 sm.

Для выбора и прокладки трасс подводных линий кабельной связи важно знать инженерно-геологические, прежде всего водно-физические и физико-механические свойства донных осадков.

В 57-м рейсе НИС “Профессор Водяницкий” в судовой лаборатории изучены такие показатели водно-физических и физико-механических свойств, как естественная влажность (W_e), объемная масса (V_0) и пластическая прочность (P_m).

Одним из значимых свойств осадков, который необходимо учитывать при строительстве инженерных сооружений на морском дне, в частности коммуникаций, является липкость. Методически определение липкости донных осадков в судовых условиях – сложная задача из-за отсутствия необходимой специальной приборной базы, создание которой требует дополнительного финансирования. Поэтому в условиях краткосрочного рейса в рамках ограниченного финансирования работ определение липкости не планировали, а ее характеристика, как и ряда других классификационных показателей, приводится по архивным и литературным данным.

Как показали результаты наших предыдущих исследований по геологической оценке трассы подводного кабеля связи, практический интерес представляет характеристика верхнего слоя позднечетвертинных донных отложений. В шельфовой зоне (трасса Евпатория–Керчь) это исключительно новочерноморские осадки, а в абиссальной зоне (трасса Севастополь–Поти), где скорость осадконакопления ниже, в сферу

интереса попадают и древнечерноморские отложения. В обоих случаях изучаемые осадки находятся преимущественно на ранней стадии диагенеза, соответствующей схеме стадийности В. И. Савельева, в основе которой лежат представления о пластичности, стадии ила (стадия разжиженного, или текучего состояния).

На этой стадии осадки представляют собой многофазные системы, в которых значительная доля приходится на жидкую фазу. Свежеотложенные глинистые осадки могут содержать до 100–200 % влаги по отношению к сухому грунту, а обогащенные органическим веществом сапропелевые осадки – до 400–600%. Вода, заключенная в осадках, определяет их состояние на различных этапах литификации.

В результате взаимодействия твердой минеральной фазы осадков с насыщающими их иловыми растворами, имеющего двойственную природу – механическую и физико-химическую, происходит формирование физико-механических свойств донных осадков [1].

Механическое влияние проявляется в обезвоживании осадков, которое на самых ранних стадиях диагенеза происходит преимущественно под действием увеличивающегося по мере накопления осадков геостатического давления и определяется как первая стадия дегидратации. В результате уменьшается пористость и проницаемость осадков, увеличивается их прочность [4].

Физико-химическое воздействие проявляется на границе твердой и жидкой фаз осадков. Здесь образуется двойной электрический слой, влияние которого на формирование инженерно-геологических свойств осадков тем выше, чем

© С. А. Клещенко, В. Б. Сидоренко, Т. С. Куковская, 2003

дисперснее осадок. В высокодисперсных пелитовых, прежде всего глинистых, осадках двойной электрический слой играет важнейшую роль в процессах взаимодействия твердых частиц друг с другом, обуславливая либо расклинивающее действие, либо их агрегацию, связность и прочность. В целом под влиянием механического уплотнения, гидрофильной коагуляции, вызванной физико-химическими процессами, и биохимических диагенетических процессов в осадках образуется и развивается пространственная структурная сетка, сообщающая им определенные физико-механические свойства, изменяющиеся во времени (с возрастом).

Одним из весьма информативных показателей, отражающих, с одной стороны, условия среды в бассейнах седиментации, а с другой – степень литификации осадков в процессе их превращения в породу, является влажность.

В 57-м рейсе НИС “Профессор Водяницкий” определение влажности было выполнено на 30 шельфовых станциях по маршруту трассы Евпатория–Керчь (45 определений) и на 17 глубоководных станциях по маршруту трассы Севастополь–Поти (34 определения).

На участке Евпатория–Севастополь донные осадки изучены в интервале глубин 17–121 м. Представлены они преимущественно пелитовыми, алевроитово-пелитовыми и пелитово-алевритовыми разностями, в той или иной степени насыщенными раковинами моллюсков и их детритом, и лишь на самой мелководной (17 м) станции близ Евпатории – песками. В составе терригенной составляющей в легкой фракции встречены обломки кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза. Из минералов тяжелой фракции присутствуют магнетит, титаномагнетит, ильменит, рутил, лейкоксен, циркон, пироксены, эпидит. Аутигенные минералы представлены пиритом, баритом, гидроксидами железа. Содержание гранулометрических фракций изменяется в таких пределах: <0,001 мм 21,87–44,8%; 0,005–0,001 мм – 8,05–13,85%; 0,01–0,1 мм – 17,55–34,1%; >0,1 мм 0,33–6,21%.

На участке Севастополь–Керчь выполнено 26 станций в интервале глубин 11,6–101 м.

На участке Севастополь–Судак осадки представлены в основном тонкозернистыми водонасыщенными илами серого цвета с различными оттенками (темно-серыми, зеленовато-серыми, изредка желтовато-серыми), часто с включением раковинного детрита. Лишь на нескольких станциях (ст. 5607, 5608, 5635) осадки состоят из ракушечника с илистым заполнителем.

В районе Феодосийского залива развиты алевроитово-пелитовые и пелитово-алевритовые илы, фаунистических остатков в которых прак-

тически нет. Самый верхний (0–10 см) слой осадков окрашен преимущественно в желтовато-серые тона, а ниже по разрезу преобладают зеленовато-серые и темно-серые окраски.

На шельфе Керченского п-ова осадки представлены пелитовыми, пелитово-алевритовыми, иногда алевроитово-песчанистыми разностями с большим количеством раковинного детрита, а в Керченском проливе (ст. 5645–5646) – заиленными ракушечниками.

На ранних этапах диагенеза различия в величинах влажности зависят от многих составляющих: размерности и минерального состава частиц, слагающих осадок и определяющих его активную поверхность, количества и компонентного состава органического вещества, химического состава и концентрации жидкой фазы, скорости осадконакопления и др. Поэтому из-за как латеральной, так и вертикальной (возрастной) изменчивости литологической состава осадков наблюдается большой разброс показателей влажности (табл. 1, рис. 1, а). Наиболее значимые различия существуют между значениями влажности отложений шельфа (трасса Евпатория–Керчь) и глубоководной впадины (трасса Севастополь–Поти) (табл. 1, рис. 1, а). Средняя влажность глубоководных отложений (237,5%) более чем в 2 раза превышает таковую отложений шельфа (108,4%).

Влажность осадков шельфа колеблется от 46 до 247%. При этом наиболее высокие показатели влажности отмечены в пелитовых и алевроитово-пелитовых осадках на участке Севастополь–Судак. В зависимости от цвета осадков средние значения влажности варьируют в небольших пределах, образуя ряд: серые (135,2%) – желтовато-серые (126%) – темно-серые (117,2%) – зеленовато-серые (111,9%). Наиболее низкие влажности зафиксированы в осадках керченского шельфа, представленных заиленными ракушечниками (табл. 1).

Как видно на рис. 1, а, распределение влажности отложений шельфа с глубиной в интервале 0–50 см подчиняется практически линейной зависимости. При этом наибольший градиент наблюдается в тонкозернистых (участок Севастополь–Судак) осадках, а наименьший – в грубых (район керченского шельфа).

Глубоководные осадки по трассе Севастополь–Поти в интересующем интервале глубин (0–50 см) представлены кокколитовыми, биогенно-терригенными пелитовыми и сапропелевыми осадками.

Влажность биогенно-терригенных пелитовых осадков варьирует от 70 до 389%, в среднем составляя 176%, а кокколитовых – от 101 до 529% (в среднем – 276%). Аномальными значени-

Т а б л и ц а 1. Обобщенная характеристика естественной влажности верхнего слоя позднечетвертичных осадков

Участок трассы	Интервал залегания от дна моря, см											
	0-10			10-20			48-50*			>50		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
Трасса Евпатория-Керчь												
Евпатория-Севастополь	117	119	118	109	120	115	110	118	113	-	-	-
Севастополь-Судак	126	160	138	69	247	122	59	117	93	-	-	-
Феодосийский залив	65	170	118	106	135	120	67	110	92	-	-	-
Керченский шельф	65	105	85	49	117	83	46	106	80	-	-	-
Трасса Севастополь-Поти												
Западная халистаза	232	529	404	173	284	229	133	142	137	-	-	-
Восточная халистаза	274	408	346	70	306	195	110	200	163	71	217	125

* Для восточной халистазы представленные данные относятся к интервалу опробования 20-50 см.

ями характеризуются сапропелевые осадки, влажность которых часто превышает 400%, а в отдельных случаях может достигать 550-600%. Анализ наших архивных и литературных [2] материалов по изучению инженерно-геологических свойств сапропелевых осадков показывает, что они аномальны и по многим другим показателям. В частности, имеют очень высокую пористость (до 94%) и влагоемкость (до 548%) [2].

По данным исследований 37 монолитов сапропелевых отложений, отобранных нами в глубоководной части Черного моря к югу от Крымского п-ова, получены следующие средние показатели свойств сапропелевых осадков (табл. 2).

Изменение влажности глубоководных отложений с глубиной происходит намного интенсивней, чем на шельфе. Наибольшие градиенты отмечаются в интервале 0-20 см, а затем кривые влажности глубоководных отложений приближаются к таковым шельфовых отложений. То есть главным фактором обезвоживания глубоководных отложений на самых ранних этапах диагенеза является гравитационное уплотнение.

Естественная влажность в комплексе с влажностью на пределах пластичности характеризует физическое состояние и прочностные свойства осадков. В частности, интервал влажности между пределами пластичности (число пластичности) и пределы пластичности косвенно характеризуют состав и дисперсность грунта, а число пластичности используется как классификационный показатель [5]. В зависимости от величины числа пластичности выделяют различные виды грунтов, а по соотношению значений пределов пластичности и естественной влажности определяют показате-

тель консистенции, который служит классификационным признаком состояния грунта (от текучего до твердого) [5].

По данным работы [3], влажность верхнего предела пластичности черноморских позднечетвертичных шельфовых отложений колеблется в интервале 28-64% (составляя в среднем 45%), а нижнего предела - в интервале 21-31% (в среднем - 24%). Средняя величина числа пластичности, таким образом, составляет 21.

Колебания средних величин влажности, верхнего, нижнего пределов пластичности и числа пластичности глубоководных отложений, по нашим данным (табл. 2), соответственно составляют 58-177, 30-101 и 28-76%. Сопоставляя эти результаты с данными о распределении величин естественной влажности (табл. 1), можно утверждать, что большинство исследованных осадков должно быть отнесено к категории глинистых с текучей или текучепластичной консистенцией.

Объемная масса осадков является важным физическим свойством грунтов. Она также используется в качестве расчетного показателя для вычисления пористости, которая относится к числу нормативных показателей и при инженерно-геологических исследованиях определяется, как правило, расчетным путем по известным формулам [5].

Определение объемной массы осадков естественной влажности в 57-м рейсе НИС "Профессор Водяницкий" проведено практически на всех станциях вдоль обеих трасс подводного кабеля связи в интервале глубин 0-50 см (шельфовая зона) и 0-120 см (глубоководная зона). Всего выполнено 101 определение.

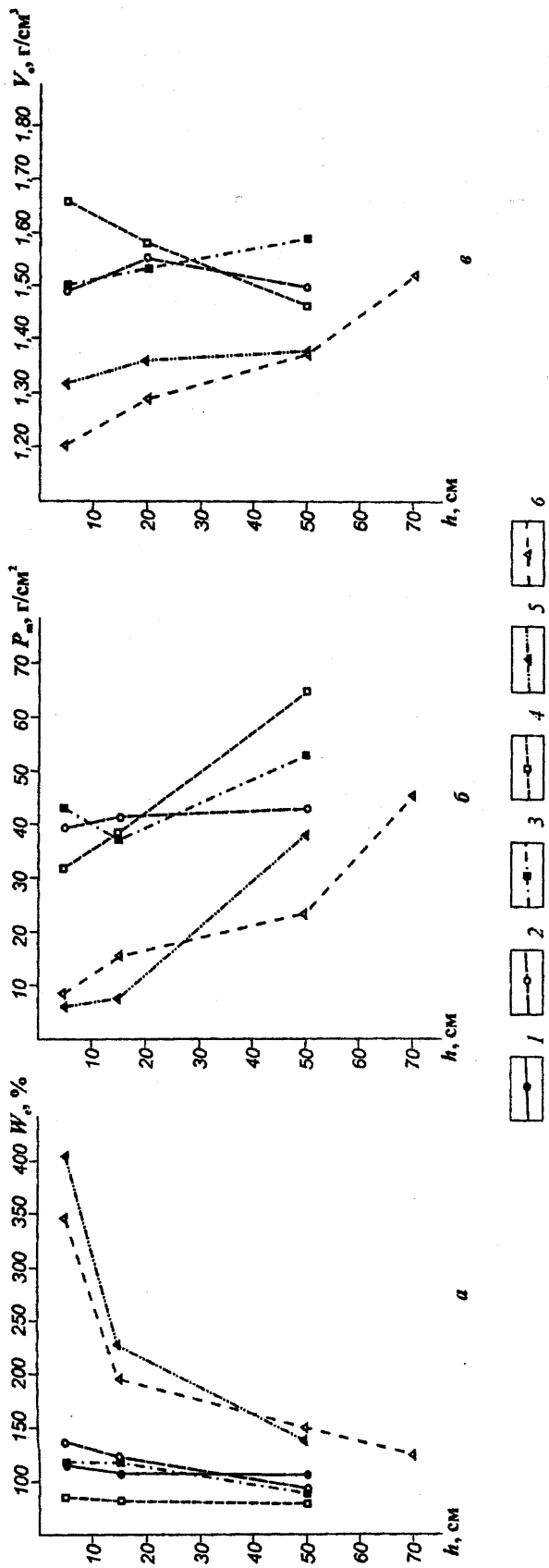


Рис. 1. Распределение естественной влажности (а), пластической прочности (б) и объемной массы (е) с глубиной на различных участках трасс подводных кабелей связи (по усредненным данным)
 Участок трассы: 1 – Евпатория–Севастополь; 2 – Севастополь–Судах; 3 – Феодосийский залив; 4 – керченский шельф; 5 – западная халистаза; 6 – восточная халистаза

Таблица 2. Средние значения показателей физико-механических свойств глубоководных осадков

Свойства	Сапропели	Подстилающие илы
Удельная масса, г/см ³	2,04 [2]	
Объемная масса, г/см ³	1,32	1,61
Объемная масса скелета, г/см ³	0,53	0,94
Влажность предела пластичности, %	101	30
Влажность предела текучести, %	177	58
Число пластичности	76	28
Угол внутреннего трения	4°16'	3°24'
Удельное сцепление, г/см ²	43	42
Относительная деформация при давлении 0,25 кгс/см ²	0,278	0,197
Липкость, г/см ²	11	27
Удельная активная поверхность, м ² /г	193	–

Таблица 3. Обобщенная характеристика объемной массы верхнего слоя позднечетвертичных осадков, г/см³

Участок трассы	Интервал залегания от дна моря, см											
	0–10			10–30			48–50*			>50		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
Трасса Евпатория–Керчь												
Севастополь–Судак	1,38	1,61	1,49	1,39	1,80	1,55	1,34	1,66	1,50	–	–	–
Феодосийский залив	1,34	1,63	1,50	1,43	1,62	1,53	1,49	1,68	1,59	–	–	–
Керченский шельф	1,44	1,92	1,66	1,52	1,62	1,58	1,46	1,46	1,46			
Трасса Севастополь–Поти												
Западная халистаза	1,15	1,62	1,32	1,15	1,64	1,36	1,20	1,54	1,38	–	–	–
Восточная халистаза	1,20	1,20	1,20	1,25	1,34	1,29	1,19	1,55	1,37	1,38	1,83	1,52

* Для восточной халистазы представленные данные относятся к интервалу опробования 20–50 см.

Таблица 4. Обобщенная характеристика пластической прочности верхнего слоя позднечетвертичных осадков, г/см²

Участок трассы	Интервал залегания от дна моря, см											
	0–10			10–30			48–50			>50		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
Трасса Евпатория–Керчь												
Севастополь–Судак	28,8	51,4	39,0	26,0	66,0	41,2	29,1	87,7	42,8	–	–	–
Феодосийский залив	29,1	85,9	42,9	29,9	52,2	37,1	30,5	113,9	52,9	–	–	–
Керченский шельф	29,9	32,9	31,5	35,5	41,2	38,3	36,9	104,0	65,2	–	–	–
Трасса Севастополь–Поти												
Западная халистаза	0	30,6	40,0	0	31,0	<10	0	99,5	38,2	–	–	–
Восточная халистаза	0	19,1	<10	0	26,0	15,7	0	46,3	23,3	13,5	87,7	45,1

Осредненные данные по глубине в осадках на различных участках трасс представлены в табл. 3.

Объемная масса осадков шельфа по трассе Евпатория–Керчь колеблется от 1,34 до 1,92 г/см³, в среднем составляя 1,537 г/см³. Глубоководные осадки по трассе Севастополь–Поти характеризуются значительно меньшими значениями показателя, варьирующими в пределах 1,15–1,83 г/см³ (в среднем – 1,389 г/см³).

Наибольшие показатели объемной массы верхнего (0–10 см) слоя осадков в шельфовой зоне отмечены в районе керченского шельфа (табл. 3, рис. 1, в).

В отличие от глубоководных осадков (трасса Севастополь–Поти), в которых как в западной, так и восточной халистазах наблюдается четкая закономерность увеличения объемной массы по мере уплотнения осадков с глубиной, в осадках шельфа такая тенденция, исключая Феодосийский участок, не прослеживается. Эти различия можно объяснить тем, что объемная масса зависит не только от влажности и пористости осадков, но и от их минерального состава, который в шельфовых осадках значительно разнообразнее, чем в пелагических.

Особенностями вещественного состава (преобладание глинистых минералов и повышенное содержание органического вещества в пелагических осадках) объясняются также различия в значениях объемной массы осадков шельфа и глубоководной котловины.

В то же время на большом фактическом материале в целом по Черному морю, включая глубоководную часть, для пелитовых и алевроитово-пелитовых осадков установлена корреля-

ционная зависимость (коэффициент корреляции 0,48) между естественной влажностью и объемной массой скелета грунта ($V_{ск}$) вида [2]:

$$V_{ск} = 2,948 - 1,099 \lg W_e.$$

Объемная масса скелета грунта определяется по формуле

$$V_{ск} = \frac{V_o}{1 + 0,01W_e}.$$

Таким образом, по показателю естественной влажности можно количественно с достаточной точностью определить объемную массу осадка, необходимую для расчета пористости.

Средние значения плотности осадков, входящей в расчетные формулы, составляют 2,65 г/см³ для песков, 2,70 г/см³ для алевроитово-пелитовых и 2,75 г/см³ для пелитовых глинистых разностей.

Физическое состояние осадков и их прочностные свойства наиболее полно характеризуют такие показатели, как пластическая прочность, сопротивление пенетрации (R_p) и лопастному сдвигу (τ), а также липкость (L).

Определение пластической прочности в рейсе выполнено на 29 станциях, среди которых 15 станций (63 пробы) на шельфе и 14 станций (38 проб) в абиссали. Характеристика других прочностных свойств приводится по литературным и архивным данным.

Осредненные поинтервальные показатели пластической прочности на различных участках обеих трасс представлены в табл. 4.

Пластическая прочность верхнего слоя (0–10 см) шельфовых осадков варьирует в ин-

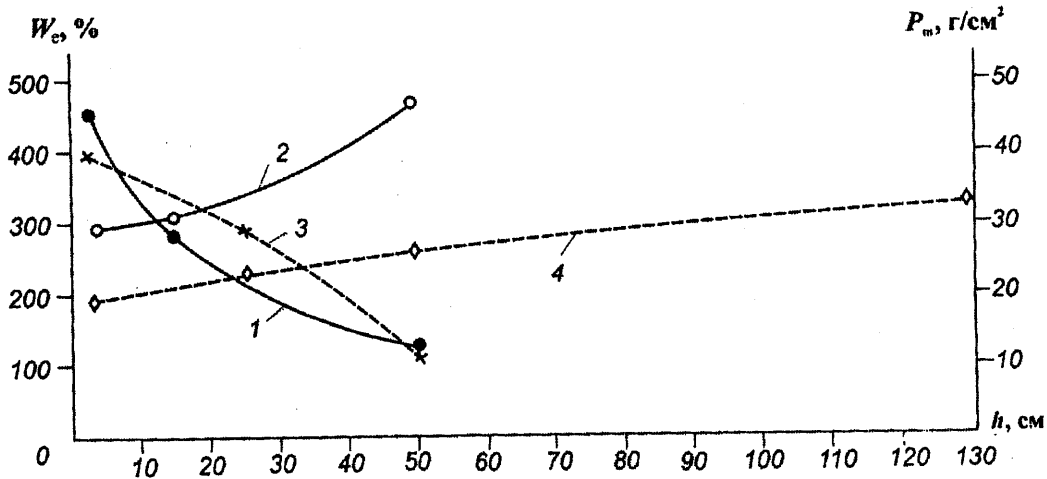


Рис. 2. Графики зависимости естественной влажности (W_e) и пластической прочности (P_m) глубоководных осадков (трасса Севастополь–Поти) от глубины их залегания (h)

Ст. 5670 (западная халистаза): 1 – естественная влажность, 2 – пластическая прочность; ст. 5687 (восточная халистаза): 3 – естественная влажность, 4 – пластическая прочность

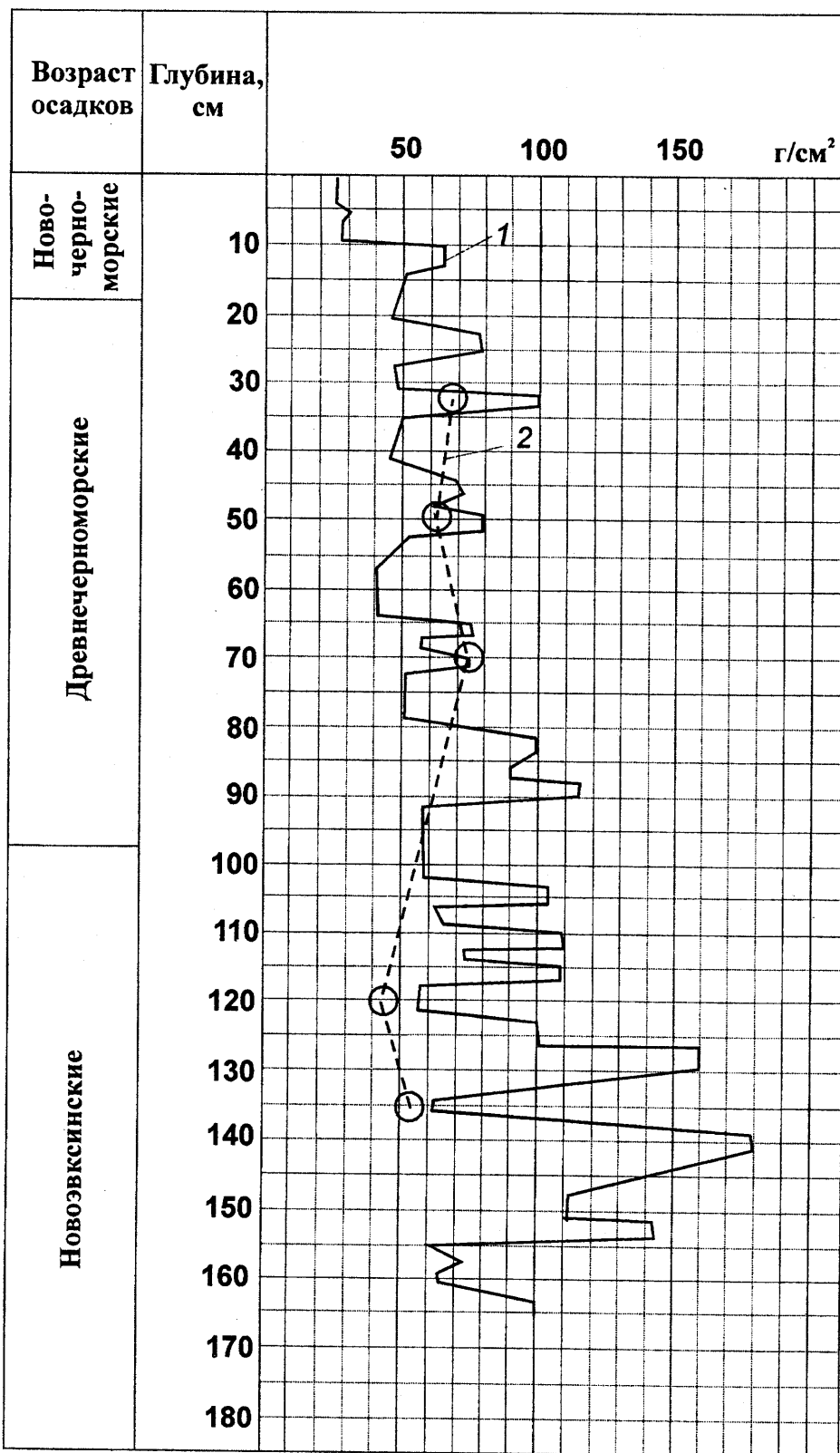


Рис. 3. Кривые распределения прочностных свойств глубоководных осадков восточной халистазы Черного моря

Кривая: 1 – сопротивление пенетрации; 2 – сопротивление лопатному сдвигу

тервале значений 29,1–85,9 г/см², в среднем составляя 38,8 г/см². С глубиной в осадках наблюдается закономерное ее увеличение, средние значения которой в интервалах 10–30 и 40–50 см соответственно составляют 39,9 и 47,7 г/см². То есть в интервале глубин 0–50 см по осредненным данным пластическая прочность повышается примерно на 20%. Такая тенденция отмечена на всех участках шельфовой трассы (табл. 4, рис. 1, б).

Как предельные, так и средние значения пластической прочности верхнего (0–30,6 г/см², в среднем 7,9 г/см²) и подстилающих (0–87 г/см², в среднем 20,8 г/см²) слоев осадков до глубины 50 см значительно ниже, чем в осадках шельфа, что объясняется различиями в вещественном составе и влажности тех и других. Зависимость ее изменения от влажности осадков с глубиной в осадках абиссали представлена на графике (рис. 2). На нем четко проявляется обратная зависимость между показателями. При этом как влажность осадков, так и динамика изменения пластической прочности с глубиной в западной халистазе выше, чем в восточной.

Результаты измерения прочностных свойств глубоководных отложений (координаты точки: 43°24,8' с. ш., 38°24,1' в. д., глубина 2110 м) методами непрерывной пенетрации керна и лопастного сдвига представлены на рис. 3. Пиковые значения показателей прочности приурочены к сапропелевым горизонтам и подстилающим их гидротроилитовым илам новоэвксина. В новоэвксинских отложениях пиковые значения показателей удельного сопротивления лопастному сдвигу во всех случаях ниже показателей сопротивления пенетрации конусом.

Характеристика липкости приводится по данным В. А. Емельянова [2], изучавшего глубоководные осадки. Липкость верхнего (0–20 см) слоя современных глубоководных осадков варьирует от 8 до 24 г/см², в среднем составляя 18 г/см². С глубиной в осадках, включая поздненоэвксинские слои (до 200 см), липкость значительно повышается в среднем до 20 г/см² при колебаниях от 6 до 27 г/см².

Наибольшие показатели липкости имеют терригенные слабоизвестковистые пелитовые и алевроитово-пелитовые илы (16–23 г/см², в среднем – 20,3 г/см²) и терригенные пелитовые и алевроитово-пелитовые илы (19–27 г/см², в среднем – 22,5 г/см²). Эти типы осадков встречаются на обеих трассах, а на шельфовой трассе они преобладают.

Минимальными значениями липкости (16–18 г/см², в среднем – 10,4 г/см²) характеризуются биогенные пелитовые осадки (кокколи-

товые илы), встреченные исключительно вдоль глубоководной трассы.

Поскольку липкость осадков зависит прежде всего от их вещественного состава и дисперсности, определяющих удельную активную поверхность и влажность илов, то однотипные и одновозрастные абиссальные и шельфовые осадки имеют, по-видимому, близкие показатели свойств. То есть сведения о липкости глубоководных осадков могут быть использованы для приближенной оценки липкости однотипных одновозрастных осадков шельфа.

Таким образом, результаты изучения инженерно-геологических свойств позднечетвертичных отложений вдоль обеих трасс кабелей связи позволяют заключить, что осадки обладают высокой влагоемкостью и влажностью, пониженной объемной массой и высокими значениями показателей консистенции.

Характеризуя прочностные свойства осадков, необходимо отметить, что современные осадки вдоль обеих трасс находятся в текучем состоянии и практически не обладают несущей способностью. Осадки шельфа приобретают минимальную несущую способность, начиная с глубин 30–50 см, а глубоководные, исключая разрезы с наличием сапропелей, – с глубин более 50 см. То есть при прокладке кабеля он будет погружен в осадки на различных участках трасс в пределах указанных глубин.

Невысокие значения липкости осадков не вызовут затруднений при необходимости подъема кабеля на поверхность.

1. Горькова И. М. Глинистые породы и их прочность в свете современных представлений коллоидной химии // Тр. Лаб. гидрогеол. пробл. – 1957. – Т. 15. – С. 26–53.
2. Емельянов В. А. Водно-физические свойства глубоководных осадков черного моря. – Киев, 1977. – 46 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т геол. наук; 77-1).
3. Куртин П. Н., Щербаков Ф. А., Потапова Л. И. и др. Формирование свойств осадков в процессе диагенеза на примере континентальной террасы Черного моря // Комплексные исследования природы океана. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – Вып. 4. – С. 56–70.
4. Ломтадзе В. Д. Роль процессов уплотнения глинистых осадков в формировании подземных вод // Тр. Лаб. гидрогеол. пробл. – 1958. – Т. 16. – С. 179–182.
5. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова, Г. М. Березкиной. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – Т. 2. – 370 с.

Отд-ние мор. геологии и осадоч. рудообразования ННПМ НАН Украины, Киев

Статья поступила 29.10.02