

УДК 624.131.43

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-4-43-53

© А. А. Ананьев, канд. техн. наук, доцент

© A. A. Ananyev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© А. В. Вагурина, ассистент

© A. V. Vagurina, assistant lecturer

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: andrej.3@mail.ru, alexandra.vagurina@yandex.ru

E-mail: andrej.3@mail.ru, alexandra.vagurina@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННО-КОНСОЛИДАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЛОВ, СЛАГАЮЩИХ ОСНОВАНИЕ ОКЕАНСКОГО ДНА В РАЙОНЕ КЛАРИОН–КЛИППЕРТОН

### DETERMINATION OF PHYSICAL AND FILTRATION-CONSOLIDATION PARAMETERS OF THE SILTS FORMING THE BASE OF THE OCEAN FLOOR IN THE CLARION–CLIPPERTON AREA

Предлагается комплексный подход к определению физических и фильтрационно-компрессионных параметров океанических илов глубоководного основания добычного комплекса. Основой для их вычисления являются лабораторные методы и результаты испытаний образцов грунта в гидрокompрессионном приборе, включающие: значения осадок образцов в заданные моменты времени и скоростей движения воды в образцах; фильтрационные, компрессионные и консолидационные кривые. Полученные путем статистической обработки результатов испытаний коэффициенты фильтрации, консолидации и относительной полной сжимаемости илов предполагается использовать для оценки осадок основания по модели одномерной фильтрационной консолидации.

*Ключевые слова:* океанический ил, физические и фильтрационно-компрессионные параметры, обработка результатов испытаний.

The article proposes a comprehensive approach to determining the physical and filtration-compression parameters of oceanic silts of the deep-water base of the mining complex. The basis for their calculation is laboratory methods and the results of testing soil samples in a hydro-compression device, including the following: values of sample settlement at specified time and water movement velocities in samples; filtration, compression and consolidation curves. The filtration, consolidation, and relative total compressibility coefficients obtained by statistical processing of the test results are supposed to be used to evaluate base sediments using the univariate filtration consolidation model.

*Keywords:* oceanic silt, physical and filtration-compression parameters, processing of test results.

#### Введение

Начиная с 1980-х годов в России и других странах мира ведется подготовка к разработке перспективных месторождений твердых полезных ископаемых в Мировом океане. В частности, в настоящее время активно продвигаются работы по созданию

глубоководных технологий добычи железомарганцевых конкреций (ЖМК) в районе Кларион–Клиппертон Тихого океана [1–4]. Ключевым элементом добычного комплекса является агрегат сбора (АС) — самоходный подводный робот на гусеничном ходу, предназначенный для сбора ЖМК с океанского

дна [5, 6]. Из исходных технических требований к российскому проекту АС<sup>1</sup> [7] известны следующие показатели назначения: скорость движения 1 м/с; удельное давление на грунт не более 7 кПа; габаритные размеры (длина/ширина/высота) 3,5×2,5×3,5 м; преодолеваемая крутизна склонов 6–10 °.

Результаты натурных испытаний прототипов (макетов) АС показывают, что проектные решения не всегда гарантируют их бесперебойную работу<sup>2</sup>. Поэтому одной из актуальных задач проектирования добычного комплекса является точный прогноз поведения основания океанского дна под нагрузкой в различных проектных ситуациях [8–11].

Анализ современных публикаций показал, что соответствующего опыта расчетов слабых глинистых водонасыщенных оснований не имеется. В порядке дискуссии для расчетов осадки (вертикальной деформации) основания АС авторами предлагается использовать теорию фильтрационной консолидации К. Терцаги–Н. М. Герсеванова.

Целью работы является лабораторное определение физико-механических параметров грунтов основания океанского дна в районе Клариион–Клиппертон для построения модели одномерной фильтрационной консолидации.

В соответствии с целью основными задачами исследования являлись: отбор проб грунта океанского дна и транспортировка их в лабораторию на сушу; выбор методов лабораторных испытаний грунта; определение разновидности и состояния грунта; изготовление образцов грунта и проведение их испытаний; статистическая обработка результатов экспериментов и определение зна-

чений расчетных параметров модели фильтрационной консолидации.

Новизна исследований заключается в определении параметров физико-механических свойств океанических илов рудной провинции Клариион–Клиппертон Тихого океана, необходимых для прогноза поведения основания АС глубоководного добычного комплекса.

Результаты исследования могут быть использованы при создании инновационных технологий разработки месторождений твердых полезных ископаемых и их добычи в Мировом океане.

### Материалы и методы

Отбор проб донного грунта в рудной провинции Клариион–Клиппертон (полигоны I, II, III) Тихого океана и их транспортировка в грунтовую лабораторию СПбГАСУ производились геологами ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Пробы были отобраны из-под толщ воды 4–5 тыс. м из приповерхностного слоя океанского дна мощностью до 2 м с помощью пробоотборника КП-0.15-1.5 [12]. Природное состояние текучих донных осадков оценивалось как нарушенное, с изменением структуры и термобарических условий. Стоит отметить, что отбор проб грунта ненарушенной структуры со столь значительной глубины и подготовка образцов, соответствующих естественному состоянию, в лабораторных условиях представляются технологически невозможными.

Физические характеристики грунта:

- естественная влажность  $w$ , плотность  $\rho$ , плотность частиц грунта  $\rho_s$  определялись стандартными методами в соответствии с ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»;
- коэффициент пористости  $e$ , плотность сухого грунта  $\rho_d$ , пористость  $n$  и влажность  $w'$  с учетом минерализации поровой воды определялись расчетным путем по формулам (A5), (A8), (A11) ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация» и формуле (1) [13].

<sup>1</sup> Разработка технического задания и технико-экономического обоснования к агрегату сбора ЖМК / НИР «ПАС-ЖМК-ТТ». МГТУ им. Н. Э. Баумана. URL: <https://www.sudprom2030.ru/files/nio/kr/0KuV7OwqGmeotmLDg9PGj9X8tEVZ7TOX.pdf> (дата обращения: 10.02.2025).

<sup>2</sup> Deep-seabed mining robot Patania II successfully reconnected – mission continues / DEME. 26 Apr. 2021. URL: <https://www.demegroup.com/news/deep-seabed-mining-robot-patania-ii-successfully-reconnected-mission-continues> (дата обращения: 26.02.2025).

Фильтрационно-компрессионные параметры грунта — коэффициент фильтрации  $K_f$ , начальный градиент напора  $I_0$ , коэффициент относительной полной сжимаемости грунта  $m_v$ , коэффициент фильтрационной консолидации  $c_v$  — определялись методами:

- постоянного и переменного градиента напора по ГОСТ 25584–2023 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»;
- компрессионного сжатия;
- «квадратного корня из времени»;
- логарифмическим методом по ГОСТ 12248.4–2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия» [14].

Статистическая обработка разброса экспериментальных точек производилась методом наименьших квадратов по ГОСТ 20522–2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» [15].

Испытания образцов грунта проводились в гидрокомпрессионном приборе (ГКП-2) (рис. 1).

Прибор состоит из одометра 1, в верхней камере которого гидравлическим насосом 2 создается гидростатическое давление, измеряемое манометром 3. Уплотнение образца грунта, помещенного в рабочее кольцо 4, производится штампом, соединенным тягой 5 с грузовым приспособлением 6; измерение вертикальной деформации — индикатором 7 (ГОСТ 577–68 «Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия»). Фильтрация воды через образец грунта осуществляется нисходящим потоком, для слива воды предусмотрен кран в поддоне корпуса 8. Конструкция прибора отвечает требованиям современных стандартов и позволяет исследовать влияние изменения порового давления на сжимаемость водонасыщенных глинистых грунтов под давлением до 0,4 МПа.

Испытания естественных образцов донного грунта нарушенного природного сло-

жения площадью 40 см<sup>2</sup> проводились в одометре прибора. Для определения параметров сжимаемости использовались образцы высотой 2 см, водопроницаемостью — 6 см. Увеличение высоты образца было выполнено с целью повышения точности задания малых градиентов напора (меньше 1), вызванных низким удельным давлением АС на грунтовое основание. Водонасыщение образцов проводилось путем их обжатия давлением воды 0,01 МПа в течение 12–14 ч при закрытом сливном кране одометра. Фильтрация воды через образец осуществлялась при следующих гидравлических градиентах  $I$ : 0,333; 0,5; 0,667; 0,833; 1,0; 1,5; 2,0. Объем воды, про-

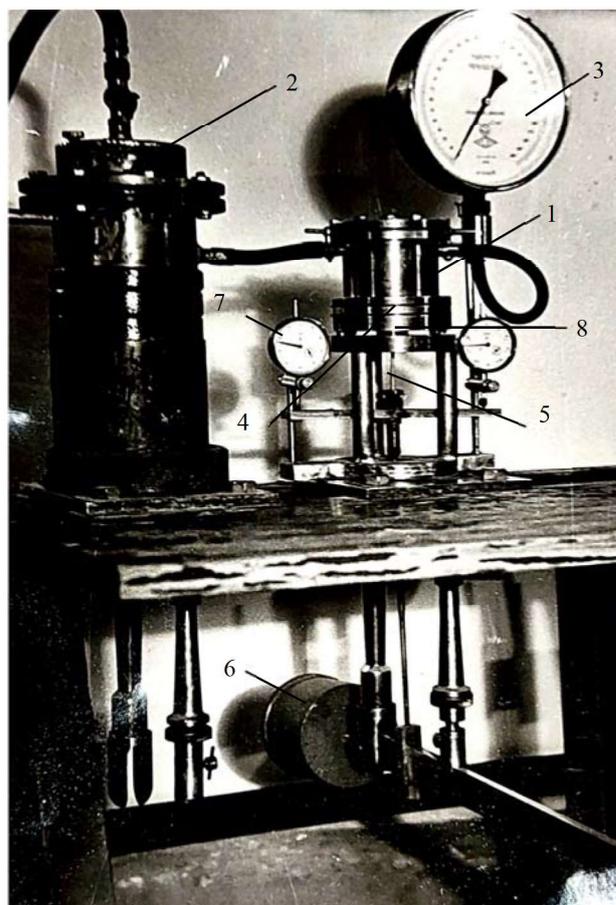


Рис. 1. Гидрокомпрессионный прибор ГКП-2: 1 — одометр; 2 — гидравлический насос; 3 — манометр; 4 — рабочее кольцо с грунтом; 5 — тяга; 6 — грузовое приспособление; 7 — индикатор ИЧ-10; 8 — поддон корпуса [16]

фильтровавшейся на этапе испытания, определялся с помощью мерного сосуда с ценой деления 0,5 см<sup>3</sup>. При заданном градиенте напора опыты выполнялись трижды.

Скорость фильтрации вычислялась по формуле

$$v = \frac{V}{t \cdot A}, \quad (1)$$

где  $V$  — объем профильтровавшейся через образец воды;  $t$  — время фильтрации;  $A$  — площадь поперечного сечения образца.

Коэффициент фильтрации  $K_f$ , численно равный  $\operatorname{tg} \alpha$ , и начальный градиент напора  $I_0$  вычислялись по формулам, полученным обработкой экспериментальных точек  $v = f(I)$  методом наименьших квадратов:

$$K_f = \operatorname{tg} \alpha = \frac{n \sum I_i v_i - \sum I_i \sum v_i}{n \sum (I_i)^2 - (\sum I_i)^2}, \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{\left( \sum I_i - \frac{\sum v_i}{\operatorname{tg} \alpha} \right)}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  — число пар опытных значений  $v$  и  $I$ ,  $n = 21$ ;  $\alpha$  — угол наклона зависимости  $v = f(I)$  к оси абсцисс.

Если при вычислении по формуле (3) получалось значение  $I_0 < 0$ , то принималось  $I_0 = 0$ , а  $K_f$  вычислялся по формуле

$$K_f = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sum I_i v_i}{\sum I_i^2}. \quad (4)$$

Проверка наличия у исследуемого грунта начального градиента фильтрации осуществлялась путем перепада напоров воды 4–6 см в двух пьезометрических трубках диаметром 10,95 мм и длиной 410 мм, присоединенных к верхней и нижней камерам одометра.

Испытания для определения коэффициентов сжимаемости  $m_v$  и консолидации  $c_v$  выполнялись параллельно в двух одометрах. Образцы 1 и 2 уплотнялись последовательно прикладываемыми ступенями давления;  $p_1 = 0,005$ ;  $\Delta_1 p = 0,005$ ;  $\Delta_2 p = 0,02$ ;  $\Delta_3 p = 0,02$  МПа. Осадка образца  $s$  (абсолютная вертикальная деформация) на заданной ступени нагружения замерялась двумя индикаторами ИЧ-10 в моменты времени

$t_i = 10, 30$  с, 5, 10, 30, 60 мин и далее несколько раз в течение рабочего дня. Испытания заканчивались при условной стабилизации деформации — менее 0,01 мм за 2 ч. Осадка вычислялась как среднеарифметическое значение показаний измерительных устройств за вычетом поправки на деформацию одометра  $\Delta$ .

Относительная вертикальная деформация  $\varepsilon_i$  и коэффициент пористости  $e_i$  после уплотнения образца  $i$ -й ступенью давления вычислялись по формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta s_i}{h}, \quad (5)$$

где  $\Delta s_i$  — осадка образца при  $i$ -й ступени давления;  $h$  — начальная высота образца, равная 2 см;

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i (1 + e_0), \quad (6)$$

где  $e_0$  — начальное значение коэффициента пористости образца.

Построение консолидационной кривой производилось в координатах  $s = f(t)$  по значениям осадок образца  $s_i$ , замеренных в заданные моменты времени  $t_i$ ; компрессионной кривой в координатах  $e = f(p)$  — по вычисленным по формуле (6) значениям коэффициентов пористости  $e_i$  грунта при давлении на образец  $p_i$ .

Коэффициент полной относительной сжимаемости  $m_v$ , численно равный  $\operatorname{tg} \beta$ , и начальная относительная вертикальная деформация  $\varepsilon_0$  вычислялись по формулам, полученным обработкой экспериментальных точек  $\varepsilon = f(p)$  методом наименьших квадратов:

$$m_v = \operatorname{tg} \beta = \frac{n \sum \varepsilon_i p_i - \sum \varepsilon_i \sum p_i}{n \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum p_i - \frac{\sum \varepsilon_i}{\operatorname{tg} \beta}}{n}, \quad (8)$$

где  $n$  — число пар опытных значений  $\varepsilon$  и  $p$ ,  $n = 8$ ;  $\beta$  — угол наклона зависимости  $\varepsilon = f(p)$  к оси абсцисс.

Коэффициент фильтрационной консолидации  $c_v$  определялся прямыми и косвенными

методами<sup>3</sup>. Прямое вычисление выполнялось по формуле

$$c_v = \frac{K_f}{m_v \cdot \gamma_w}, \quad (9)$$

где  $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$  — удельный вес воды; косвенное — по формулам (10) и (11):

$$c_v = \frac{T_{90} h^2}{t_{90}}, \quad (10)$$

где  $T_{90}$  — коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,90, равный 0,848;  $h$  — высота образца (средняя между начальной высотой, равной 2 см, и высотой после завершения опыта на консолидацию);  $t_{90}$  — время, соответствующее 90 % первичной консолидации;

$$c_v = \frac{T_{50} h^2}{t_{50}}, \quad (11)$$

где  $T_{50}$  — коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,50, равный 0,197;  $h$  — высота образца;  $t_{50}$  — время, соответствующее 50 % первичному сжатию.

Время  $t_{90}$  и  $t_{50}$ , а также время начала  $t_0$  и завершения 100 %-ной фильтрационной консолидации  $t_{100}$  определялись по кривым, построенным в координатах  $s = f(\sqrt{t}); s = f(\lg t)$ .

<sup>3</sup> Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами. М.: Стройиздат, 1989. 64 с.

## Результаты и обсуждение

Результаты определения физических характеристик донных осадков, представленные в табл. 1, свидетельствуют об их очень низкой плотности, высокой влажности и пористости.

Физические показатели грунтов полигонов I, II, III близки по значениям, что указывает на их сходство в природном состоянии. В соответствии со строительной классификацией ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация» исследованные пробы донного осадка можно отнести к глинистым илам и группе слабых водонасыщенных глинистых грунтов [17].

Результаты определения коэффициентов фильтрации  $K_f$  по формулам (2) и (4), полной относительной сжимаемости  $m_v$  по формуле (7) и консолидации  $c_v$  по формуле (9) образцов илов полигонов I, II, III представлены в табл. 2.

Аппроксимация опытных точек образцов 1 и 2 как общей совокупности в координатах  $v = f(I)$  показана на рис. 2.

Опыты по фильтрации воды в образцах илов полигонов I, III подтверждают справедливость закона Дарси (рис. 2, а, в). Вместе с тем испытание образцов полигона II показывает незначительное отклонение от этого

Таблица 1

Показатели физических свойств океанических илов

№ полигона	Влажность грунта $w'$ , %	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость грунта $n$ , %	Коэффициент пористости грунта $e_0$ , доли ед.
I	328	1,21	2,40	88	7,53
II	357	1,20		89	8,25
III	302	1,22		88	7,0

Таблица 2

Фильтрационно-компрессионные параметры океанических илов

№ полигона	Коэффициент фильтрации $K_f$ , см/с	Коэффициент полной относительной сжимаемости $m_v$ , кПа <sup>-1</sup>	Коэффициент консолидации $c_v$ , см <sup>2</sup> /мин
I	$2,46 \cdot 10^{-5}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	3,60
II	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	4,05
III	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$7,54 \cdot 10^{-3}$	1,24

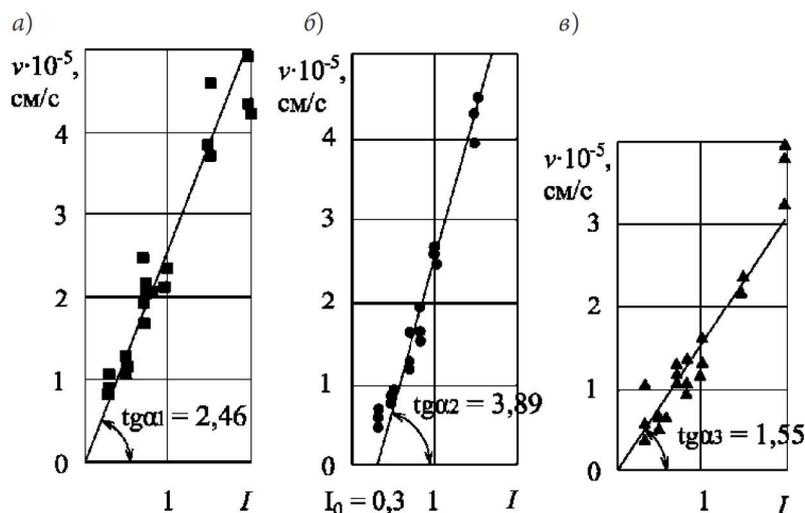


Рис. 2. Графики  $V = f(I)$  для образцов ила 1 и 2: а — полигон I; б — полигон II; в — полигон III

закона — зафиксирован начальный градиент напора  $I_0 = 0,3$  (рис. 2, б).

Результаты проверки наличия у илов начального градиента фильтрации с помощью пьезометров показали выравнивание напоров за 15 ч, что свидетельствует об отсутствии начального градиента фильтрации у испытанной пробы. Поэтому можно утверждать, что гидростатическое давление не оказывает влияния на сжимаемость скелета

грунта. Подтверждением этому служат исследования [18, 19].

Вид консолидационных кривых на рис. 3 свидетельствует об относительно медленном, затухающем характере уплотнения илов.

В опытах зафиксирована сильная сжимаемость образцов на всех ступенях изменения давления, даже таких небольших, как 0,005 МПа. На момент времени окончания испытаний (15 ч) максимальная осад-

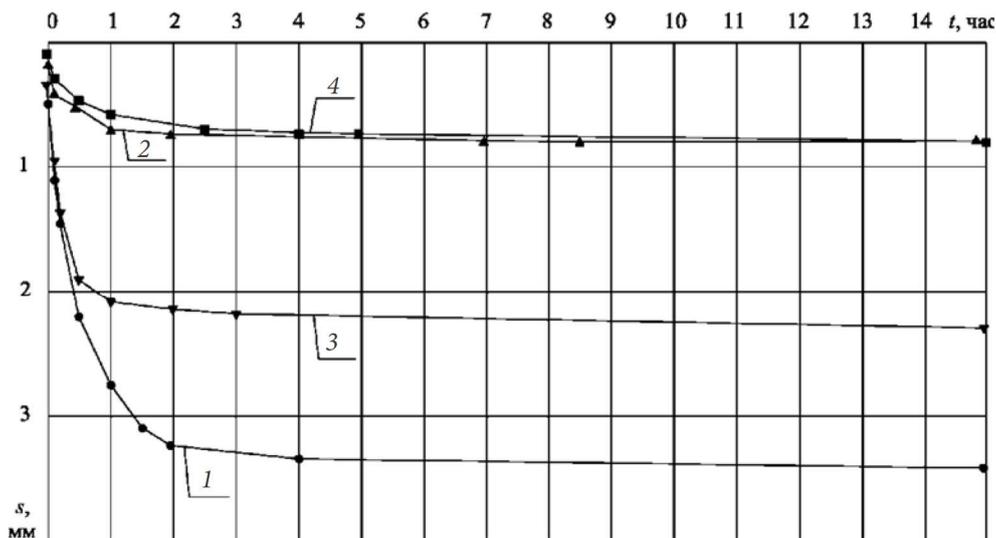


Рис. 3. Графики  $s = f(t)$ . Полигон I. Образец ила 1: 1 — ступень давления  $p_1 = 0,005$ ; 2 —  $\Delta p = 0,005$  МПа; 3 —  $\Delta p = 0,02$  МПа; 4 —  $\Delta p = 0,02$  МПа

ка образца ила 1 полигона I при давлении 0,005 МПа составила 3,8 мм; 0,05 МПа — 7,4 мм (см. рис. 3).

Как видно из рис. 4, а, компрессионные кривые образцов ила 1 и 2 полигона I нелинейны. Наблюдается резкое снижение (в 1,5–1,7 раза) коэффициента пористости при их уплотнении малыми нагрузками. Вид компрессионных кривых указывает на отсутствие структурной прочности у образцов. Сглаживание опытных точек линейной зависимостью  $\varepsilon = f(p)$  представлено на рис. 4, б.

Компрессионные испытания образцов илов ненарушенного сложения района Кларин-Клиппертон на борту судна подтверждают, что характерной особенностью донных осадков является начало уплотнения при малых нагрузках начиная с 0,001 МПа и близкая к нулю величина структурной прочности. Коэффициент сжимаемости глинистых осадков в интервале опробования слоя мощностью 5–100 см достигает значений  $(1,7...9,6) \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}$  [20]. Значения коэффициентов сжимаемости образцов, полученные на борту судна и в лаборатории на суше (табл. 2) совпадают.

График  $s = f(\lg t)$ , полученный путем обработки консолидационной кривой образца ила 1 полигона I при вертикальном давлении  $p_1 = 0,005 \text{ МПа}$  (см. рис. 3, кривая 1) логарифмическим методом, показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, график относится к первому виду кривых с преобладающим вкладом фильтрационных явлений в общем ходе осадок. Время, требуемое для 50 %-ной и 100 %-ной фильтрационной консолидации  $t_{50}$  и  $t_{100}$  соответственно, равно 16 и 126 мин, осадка  $s_{50}$  и  $s_{100}$  в указанные моменты времени составила 1,8 и 3,35 мм. При этом откорректированный ноль компрессии  $d_0 = 0,25$ . Точка В на графике принята за окончание фильтрационного этапа уплотнения, равного 126 мин. Близкие по значениям друг к другу результаты получены при обработке кривой консолидации образца 2. Коэффициенты консолидации, определенные по формуле (11) при односторонней фильтрации образцов 1 и 2 полигона I, получились соответственно равными 0,041 и 0,055  $\text{см}^2/\text{мин}$ . Сжатие, следующее за 100 %-ным первичным сжатием, можно определить как вторичное сжатие за счет деформаций ползучести.

График  $s = f(\sqrt{t})$ , полученный путем обработки консолидационной кривой образца ила 1 полигона I при вертикальном давлении  $p_1 = 0,005 \text{ МПа}$  методом «корень квадратный из времени», показан на рис. 6.

Как видно из графика, время первичного сжатия  $t_{100}$  у образца 1 полигона I получилась в 1,5 раза меньше, чем при обработке кривой консолидации логарифмическим мето-

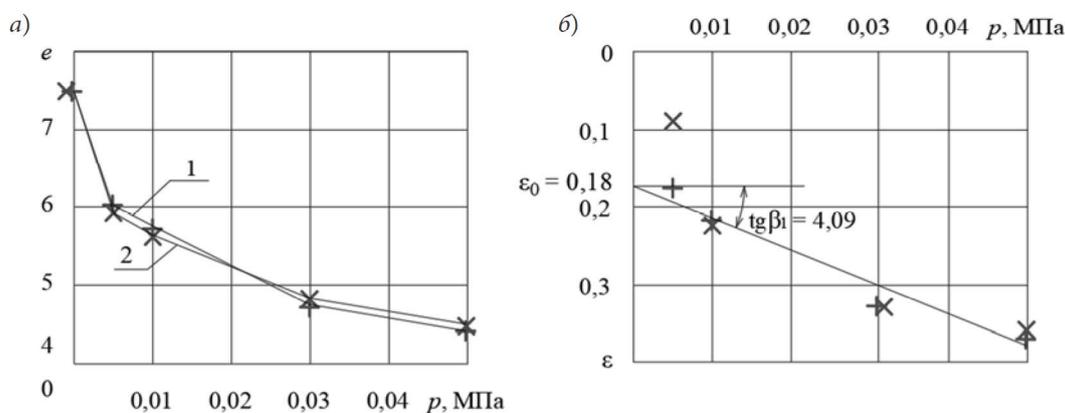


Рис. 4. Графики  $e = f(p)$  и  $\varepsilon = f(p)$ . Полигон I. Образцы ила 1 и 2: а — компрессионные кривые; б — прямая наилучшего приближения к экспериментальным точкам

дом, и составило 83 мин. Осадка  $s_{100}$  оказалась равной 3,0 мм, что близко к значению при обработке в координатах  $s = f(\lg t)$  (см. рис. 5). При этом ордината точки *a* — начало фильтрационной консолидации образца 1 — равна 0,3 мм. Достаточно близкие друг к другу результаты получены при обработке кривой консолидации образца 1 логарифмическим методом ( $t_{100} = 126$  мин и  $s_{100} = 3,35$  мм) и образца 2 методом «корень квадратный из времени» ( $t_{100} = 119$  мин,  $s_{100} = 3,6$  мм). Коэффициенты консолидации образцов 1 и 2 полигона 1, определенные по формуле (10) при односторонней фильтрации, получились соответственно равными 0,052 и 0,043 см<sup>2</sup>/мин, что также близко к значениям, полученным при обработке консолидационной кривой логарифмическим методом.

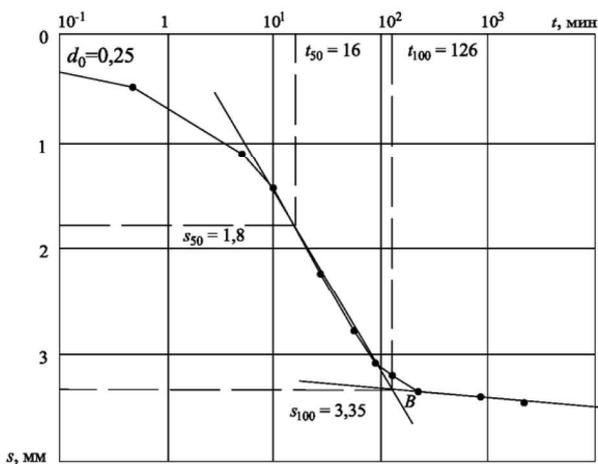


Рис. 5. График  $s = f(\lg t)$  при давлении на образец  $p_1 = 0,005$  МПа. Полигон I. Образец ила 1

### Заключение

Океанические илы района Кларирон–Клиппертон Тихого океана характеризуются весьма малой степенью литификации, аномально низкой плотностью, высокой пористостью и влажностью, отсутствием газов как в свободном, так и растворенном виде, низкой прочностью и высокой сжимаемостью. Фильтрация воды в илах имеет замедленный характер, начальный градиент напора близок к нулю. Гидростатическое давление не оказывает влияния на сжимаемость скелета грунта.

Начало уплотнения илов в условиях компрессионного сжатия наблюдается при малых нагрузках начиная с 0,005 МПа, — структурная прочность илов близка к нулю. При этом доля деформации, обусловленная фильтрационными явлениями, на момент окончания испытаний составила 95–97 %. Значения коэффициента фильтрационной консолидации  $c_v$ , определенные прямым методом по формуле (9) (см. табл. 2), на два порядка превышают значения этого коэффициента, вычисленные косвенными методами — по формулам (10) и (11). Параметры фильтрационной консолидации илов рекомендуется устанавливать по консолидационной кривой, построенной в координатах  $s = f(\lg t)$  при проектной нагрузке, точку начала консолидации определять в координатах  $s = f(\sqrt{t})$ .

В результате выполненных работ установлены значения расчетных параметров илов для расчета осадки основания АС по

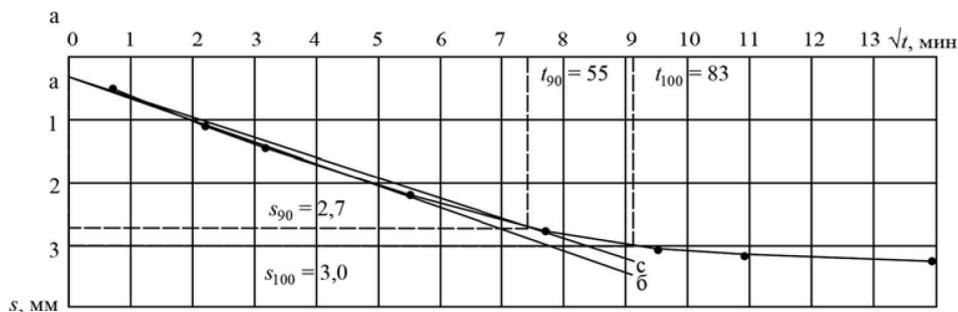


Рис. 6. График  $s = f(\sqrt{t})$  при давлении на образец  $p_1 = 0,005$  МПа. Полигон I. Образец ила 1

модели одномерной фильтрационной консолидации: время фильтрационного этапа уплотнения 126 мин; коэффициент консолидации  $0,041...0,055 \text{ см}^2/\text{мин}$ ; коэффициент полной относительной сжимаемости  $(4,09...7,54) \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$ ; коэффициент фильтрации  $(1,55...2,46) \cdot 10^{-5} \text{ см/с}$ .

#### Библиографический список

1. Глузов И. Ф., Александров В. В., Кудряшов В. Е., Костюк А. Н., Грибанов А. М. Принципы построения судовых комплексов для добычи твердых полезных ископаемых // Советская геология. 1990. № 12. С. 96–105.
2. Yungmeister D. A., Sudarikov S. M., Kireev K. A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferro-manganese nodules // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 235. Pp. 88–95. DOI 10.31897/PMI.2019.1.88.
3. Неизвестнов Я. В., Кондратенко А. В., Андреев С. А. Введение. Из истории изучения глубоководных областей океана // Инженерная геология рудной провинции Клариян–Клиппертон в Тихом океане: тр. ВНИИОкеангеологии Минприроды РФ и РАН. 2004. Т. 197. С. 3–11.
4. Liu Z., Liu K., Chen X., Ma Z., Zhang H., Lv R., Wei C., Ma K. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives // International Journal of Mining Science and Technology. 2023. Vol. 33 (9). Pp. 1083–1115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.07.007>
5. Юрко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. Современные тенденции развития техники и технологий разведки и добычи железомарганцевых конкреций и кобальтоносных железомарганцевых корок Мирового океана // Океанологические исследования. 2023. Т. 51, № 4. С. 186–215. URL: [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8)
6. Голованов Г. Китайский глубоководный аппарат для добычи ископаемых успешно испытан на глубине 4 км // Хайтек+. 14 июля 2024 г. URL: <https://hightech.plus/2024/07/14/kitaiskii-glubokovodnii-apparat-dlya-dobichi-iskopaemih-uspeshno-ispitan-na-glubine-4-km> (дата обращения: 26.02.2025).
7. Богданов М. Ю. Разработка технических требований к агрегату сбора ЖМК. Шифр: ТТЗ ПАС-ЖМК / Росгеология. URL: <https://ppt-online.org/902831> (дата обращения: 16.02.2025).
8. Ананьев А. А., Кондратенко А. В. Программа проектирования основания агрегата сбора глубоководных железомарганцевых конкреций // Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 10–12 октября 2012 г. СПб.: СПбГАСУ, 2012. Ч. II. С. 38–39.
9. Ananyev A. A. Investigation of strength and deformability of the deep-water clay base of the ferromanganese nodules collection unit // E35 Web Conf. XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022», Rostov-on-Don, 2022. Vol. 363. 02007. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302007>
10. Ananyev A. A. Investigation of the characteristics of the deep-water silty base of the ferromanganese nodules collection unit // Proceedings of the II International scientific and practical conference «Technologies, Materials Science and Engineering». Dushanbe, 5–7 April, 2023. Vol. 2999. 020027. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0158747>
11. Ananyev A. A. Study of the resistance on the side surface of the underwater vehicle's soil base // Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Smart Geotechnics for Smart Societies». Astana, 14–18 August, 2023. Pp. 2227–2234. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003299127>
12. Кондратенко А. В., Смолов Ю. С. Отбор грунтовых проб и конкреций // Инженерная геология рудной провинции Клариян–Клиппертон в Тихом океане: тр. ВНИИОкеангеологии Минприроды РФ и РАН. 2004. Т. 197. С. 52–60.
13. Кондратенко А. В., Куринный Н. А., Иванов В. Н., Козлов С. А., Зайончек В. Г., Бевзюк В. М., Тестова Н. П. Методические рекомендации по лабораторному изучению инженерно-геологических свойств глубоководных донных осадков. Л.: ПГО «Севморгеология», 1986. 52 с.
14. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248–2010. 2-е изд., доп. и испр. М.: ООО «Прондо», 2014. 812 с.
15. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматгиз, 1962. 349 с.
16. А. с. 387252, СССР М. Кл. G01n 3/10, E02d 1/00. Устройство для определения сжимаемости грунта / Л. В. Иванов, Нгуен Ван Куанг. ЛИСИ. № 1657204/29-14, заявл. 11.05.1971; опубл. 21.06.1973.
17. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
18. Далматов Б. И., Бронин В. Н., Заварзин Л. Г., Зеленкова Н. И. Оценка влияния гидростатического давления на уплотнение глинистых грунтов различ-

ной консистенции // Инженерная геология. 1984. № 2. С. 58–60.

19. Шулятьев О. А. Исследование изменения порового давления в глинистых грунтах при действии гидростатического давления // Фундаментостроение в условиях слабых и мерзлых грунтов: межвуз. тематич. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1983. С. 88–95.

20. Кондратенко А. В. Деформационные свойства донных грунтов // Инженерная геология рудной провинции Клариян–Клиппертон в Тихом океане: тр. ВНИИОкеангеологии Минприроды РФ и РАН. 2004. Т. 197. С. 45–50.

## References

1. Glumov I. F., Aleksandrov V. V., Kudryashov V. E., Kostyuk A. N., Griбанov A. M. *Printsipy postroyeniya sudovykh kompleksov dlya dobychi tverdykh poleznykh iskopaemykh* [Principles of building ship complexes for the extraction of solid minerals]. *Sovetskaya geologiya – Soviet Geology*, 1990, no. 12, pp. 96–105.

2. Yungmeister D. A., Sudarikov S. M., Kireev K. A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferro-manganese nodules. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 88–95. DOI 10.31897/PMI.2019.1.88.

3. Neizvestnov Ya. V., Kondratenko A. V., Andreev S. A. *Vvedenie. Iz istorii izucheniya glubokovodnykh oblastey okeana* [Introduction. From the history of the study of deep ocean areas]. *Inzhenernaya geologiya rudnoy provintsii Klarion–Klipperton v Tikhom okeane. Trudy VNII Okeangeologii Minprirody RF i RAN* [Engineering Geology of the Clarion–Clipperton ore province in the Pacific Ocean. Trudy All-Russian Research Institute of Oceanology of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences]. 2004, vol. 197, pp. 3–11.

4. Liu Z., Liu K., Chen X., Ma Z., Zhang H., Lv R., Wei C., Ma K. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, vol. 33 (9), pp. 1083–1115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.07.007>

5. Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. *Sovremennye tendentsii razvitiya tekhniki i tekhnologiy razvedki i dobychi zhelezomargantsevykh konkretyy i kobalt'onosnykh zhelezomargantsevykh korok Mirovogo okeana* [Current trends in the development of equipment and technologies for exploration and extraction of iron-manganese nodules and cobalt-rich iron-manganese crusts of the World Ocean]. *Okeanologicheskie issledovaniya – Oceanological Research*, 2023, vol. 51, no. 4, pp. 186–215.

Available at: [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8)

6. Golovanov G. *Kitayskiy glubokovodniy apparat dlya dobychi iskopaemykh uspeshno ispytan na glubine 4 km* [Chinese deep-sea mining vehicle successfully tested at a depth of 4 km]. *Khaytek+*, July 14, 2024. Available at: <https://hightech.plus/2024/07/14/kitaiskii-glubokovodniy-apparat-dlya-dobichi-iskopaemih-uspeshno-ispitan-na-glubine-4-km> (accessed: 26.02.2025).

7. Bogdanov M. Yu. *Razrabotka tekhnicheskikh trebovaniy k agregatu sbora ZhMK. Shifr: TTZ PAS-ZhMK* [Development of technical requirements for the LMK collection unit. Code: TTZ PAS-ZhMK]. *Rosgeologiya*. Available at: <https://ppt-online.org/902831> (accessed: 16.02.2025).

8. Ananyev A. A., Kondratenko A. V. *Programma proektirovaniya osnovaniya agregata sbora glubokovodnykh zhelezomargantsevykh konkretyy* [Program for designing the base of the unit for collecting deep-sea iron-manganese nodules]. *Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva i puti ikh effektivnogo resheniya. Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 10–12 oktyabrya 2012 g.* [Actual problems of modern construction and ways of their effective solution. Proceedings of the International Scientific-Practical Conf. St. Petersburg, October 10–12, 2012]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, pt. II, pp. 38–39.

9. Ananyev A. A. Investigation of strength and deformability of the deep-water clay base of the ferromanganese nodules collection unit. *E35 Web Conf. XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2022»*, Rostov-on-Don, 2022, vol. 363, 02007. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302007>

10. Ananyev A. A. Investigation of the characteristics of the deep-water silty base of the ferromanganese nodules collection unit. *Proceedings of the II International scientific and practical conference «Technologies, Materials Science and Engineering»*. Dushanbe, 5–7 April, 2023, vol. 2999, 020027. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0158747>.

11. Ananyev A. A. Study of the resistance on the side surface of the underwater vehicle's soil base. *Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Smart Geotechnics for Smart Societies»*. Astana, 14–18 August, 2023, pp. 2227–2234. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003299127>

12. Kondratenko A. V., Smolov Yu. S. *Otbor gruntovykh prob i konkretyy* [Sampling of soil samples and nodules]. *Inzhenernaya geologiya rudnoy provintsii Klarion–Klipperton v Tikhom okeane. Trudy VNII Okeangeologii Minprirody RF i RAN* [Engineering geology of the Clarion–Clipperton ore province in the Pacific Ocean. Proceedings

of the All-Russian Research Institute of Oceanology of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences]. 2004, vol. 197, pp 52–60.

13. Kondratenko A. V., Kurinniy N. A., Ivanov V. N., Kozlov S. A., Zayonchek V. G., Bevzyuk V. M., Testova N. P. *Metodicheskie rekomendatsii po laboratornomu izucheniyu inzhenerno-geologicheskikh svoystv glubokovodnykh donnykh osadkov* [Guidelines for laboratory study of engineering and geological properties of deep-sea bottom sediments]. Leningrad, Sevmorgeologiya Publ., 1986, 52 p.

14. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248–2010* [Methods for Determining Mechanical Properties of Soils with Comments to GOST 12248-2010]. 2-nd ed., revised. Moscow, Prondo Publ., 2014, 812 p.

15. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [The method of least squares and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing]. 2-nd ed., revised. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, 349 p.

16. Ivanov L. V., Nguen Van Kuang. A. s. 387252, SSSR M. Kl.G01n 3/10, E02d 1/00. *Ustroystvo dlya opredeleniya szhimaemosti grunta* [Soil compressibility determining device]. Leningrad, LISI Publ., 1973.

17. Abelev M. Yu. *Stroitel'stvo promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzheniy na slabyykh*

*vodonasyshchennykh gruntakh* [Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983, 248 p.

18. Dalmatov B. I., Bronin V. N., Zavarzin L. G., Zelenkova N. I. *Otsenka vliyaniya gidrostaticheskogo davleniya na uplotnenie glinistykh gruntov razlichnoy konsistentsii* [Assessment of the effect of hydrostatic pressure on the compaction of clay soils of various consistencies]. *Inzhenernaya geologiya – Engineering Geology*, 1984, no. 2, pp. 58–60.

19. Shulyat'ev O. A. *Issledovanie izmeneniya porovogo davleniya v glinistykh gruntakh pri deystvii gidrostaticheskogo davleniya* [Study of pore pressure variation in clay soils under hydrostatic pressure]. *Fundamentostroenie v usloviyakhslabykh i merzlykh gruntov. Trudy mezhvuz. tematich. conf.* [Foundation construction in conditions of weak and frozen soils. Proceedings of the inter-university thematic conf.] Leningrad, LISI Publ., 1983, pp. 88–95.

20. Kondratenko A. V. *Deformatsionnye svoystva donnykh gruntov* [Deformation properties of bottom layer soils]. *Inzhenernaya geologiya rudnoy provintsii Klarion–Klipperton v Tikhom okeane. Trudy VNII Okeangeologii Minprirody RF i RAN* [Engineering geology of the Clarion–Clipperton ore province in the Pacific Ocean. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Oceanology of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences]. 2004, vol. 197, pp. 45–50.