

УДК: 624.131.43  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.2  
EDN: BVYKND



## Определение прочностных и реологических параметров глубоководного илистого основания под действием подвижной нагрузки

А.А. Ананьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** При разработке проектов подводных зданий и сооружений для добычи полезных ископаемых возникает необходимость в разработке расчетных моделей сопротивления и деформирования грунтов океанического дна, используемых в качестве грунтовых оснований фундаментов. Прогноз тяговых усилий агрегата сбора железомарганцевых конкреций на основе расчетной модели сопротивления глубоководного донного основания требует определения прочностных и реологических параметров океанических илов. Анализ публикаций показывает, что для оценки прочности слабых водонасыщенных глинистых грунтов широко применяется метод вращательного среза. Однако, как правило, существующие конструкции приборов не обеспечивают раздельного определения кулоновской (фрикционно-сцепной) и вязкой (скоростной) составляющих сопротивления срезу, а метод вращательного среза не предусматривает учёта влияния тиксотропного разупрочнения. Целью исследования является лабораторное определение прочностных и реологических параметров океанических илов методом вращательного среза для использования в инженерных расчётах сопротивления донного основания при перемещении агрегата. Задачи исследования: анализ применимости метода вращательного среза к условиям напряжённо-деформированного состояния основания агрегата; разработка лабораторного прибора и комплекта лопастных зондов; проведение испытаний для оценки физических, прочностных, реологических и тиксотропных свойств; анализ и обработка результатов экспериментов.

**Результаты.** Разработана конструкция прибора вращательного среза, обеспечивающего определение прочностных и реологических параметров при малых нормальных давлениях, больших перемещениях и высоких скоростях среза. Обеспечена фиксация пиковых и остаточных сопротивлений с учётом тиксотропного разупрочнения. Определены плотность, влажность и пористость океанических илов, характеризующие их физическое и структурное состояние. Определены пиковые и остаточные значения удельного сцепления, угла внутреннего трения, коэффициента вязкости и предела текучести, используемые в качестве входных параметров расчётной модели вязкопластической среды с пределом текучести по критерию Кулона-Мора.

**Выводы.** Полученные прочностные и реологические параметры позволяют на основе расчётной модели прогнозировать сопротивление глубоководного илистого основания при перемещении агрегата сбора как ключевого элемента океанского добычного комплекса и могут использоваться в инженерных расчётах для обоснования проектных решений при проектировании, строительстве и эксплуатации комплекса.

**Ключевые слова:** глубоководное илистое основание; океанические илы; метод вращательного среза; прочностные и реологические параметры; тиксотропное разупрочнение; вязкопластическая модель грунта

**Для цитирования:** Ананьев А. А. Определение прочностных и реологических параметров глубоководного илистого основания под действием подвижной нагрузки // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 19-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.2, EDN: BVYKND

# Determination of strength and rheological parameters of a deep-sea silty seabed under moving load

A.A. Ananiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Saint Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* When developing projects for underwater buildings and structures for mining, there is a need to develop computational models of the resistance and deformation of ocean floor soils used as foundation soils. Prediction of the traction forces of a polymetallic nodule mining collector based on a viscoplastic soil–structure interaction model requires determination of the strength and rheological parameters of the deep-sea silty seabed. These parameters are essential for developing engineering computational models based on laboratory physical modeling. A review of the literature shows that the vane shear test is widely used to assess the strength of weak water-saturated clayey soils. However, existing device designs generally do not allow separate determination of the Coulomb (frictional–cohesive) and viscous components of shear resistance, and the conventional vane shear method does not account for thixotropic strength degradation.

The aim of this study is the laboratory determination of the strength and rheological parameters of oceanic silts using the vane shear method for application in engineering calculations of deep-sea seabed resistance during collector movement. The tasks include: analysis of the applicability of the vane shear method to the stress–strain state of the seabed under collector loading; development of a laboratory vane shear device and a set of vane probes; experimental testing with determination of physical, mechanical, and rheological characteristics; and processing of the experimental results.

*Results.* A laboratory vane shear device was developed that enables determination of strength and rheological parameters under conditions of large strains, high shear rates, and low normal pressures. The device allows recording of peak and residual shear resistance with consideration of thixotropic strength degradation. Density, water content, and porosity of the oceanic silts were determined to characterize their physical and structural state. Peak and residual values of cohesion, internal friction angle, viscosity coefficient, and yield stress were determined and used as input parameters for the viscoplastic model with Mohr–Coulomb yield criterion.

*Conclusions.* The obtained strength and rheological parameters make it possible to predict, using the computational model, the resistance of the deep-sea silty seabed during the movement of the collector unit as a key element of the ocean mining complex, and can be used in engineering calculations to support design decisions in the planning, construction, and operation of the complex.

**Keywords:** deep-sea silty seabed; oceanic silts; vane shear test; strength and rheological parameters; thixotropic strength degradation; viscoplastic soil model

**For citation:** Ananiev A.A. Determination of strength and rheological parameters of a deep-sea silty seabed under moving load // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 19-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.2, EDN: BVYKND

## 1. Введение

При разработке проектов подводных зданий и сооружений для добычи полезных ископаемых возникает необходимость в разработке расчетных моделей сопротивления и деформирования грунтов океанического дна, используемых в качестве грунтовых оснований фундаментов при проектировании.

В настоящее время в мировой практике реализуются пилотные проекты по подготовке к опытно-промышленной добыче железомарганцевых конкреций (ЖМК) в зоне Кларион–Клиппертон Тихого океана. Ключевым элементом таких проектов является агрегат сбора (АС) – глубоководный робот, предназначенный для извлечения ЖМК из приповерхностного слоя донных осадков и устойчивого перемещения по илистому основанию океанского дна [1–3]. Результаты натурных испытаний, включая испытания

робота *Patania II*, подтверждают актуальность инженерных исследований взаимодействия АС с донным основанием [4-6]. Анализ этих испытаний показывает, что надёжность работы АС в значительной степени определяется прочностными и реологическими свойствами океанических илов, формирующими сопротивление основания его перемещению. Возобновление отечественных опытно-конструкторских работ, проводившихся в 1980-х годах, требует использования и уточнения ранее полученных результатов при проектировании прототипа АС [7].

Согласно техническим требованиям, скорость движения АС составляет до 1 м/с, удельное давление на грунт – не более 7 кПа, габаритные размеры –  $3,5 \times 2,5 \times 3,5$  м, преодолеваемая крутизна склонов –  $6-10^\circ$ , толщина продуктивного слоя – до 0,15 м [8].

Указанные условия эксплуатации обуславливают прогнозирование сопротивления основания при малых нормальных напряжениях, повышенных скоростях сдвига, нарушенной природной структуре и отсутствии значительного бокового обжатия. В режимах трогания, установившегося движения и повторных циклов нагружения необходимо учитывать пиковые и остаточные параметры прочности и вязкости, а также их изменение под влиянием тиксотропных процессов и масштабного фактора. При этом оборудование и приборы должны обладать достаточной чувствительностью к изменениям контролируемых параметров и обеспечивать их регистрацию с требуемой точностью в условиях судовой лаборатории. Это предъявляет повышенные требования к методике лабораторного определения прочностных и реологических характеристик океанических илов.

Современные исследования показывают, что сопротивление сдвигу слабых водонасыщенных глинистых грунтов обладает выраженной скоростной зависимостью и может быть представлено суммой кулоновской и вязкой составляющих [9–11]. Возможность лабораторного определения параметров прочности и коэффициента вязкости в рамках вязкопластической интерпретации подтверждена для морских глинистых осадков, включая испытания с использованием крыльчатки [12–16]. Установлено влияние истории нагружения, траектории и релаксации напряжений на эволюцию механических характеристик глинистых грунтов [17], а также влияние тиксотропного разупрочнения на параметры сопротивления океанических илов [18]. Вместе с тем исследования глубоководных донных осадков сосредоточены преимущественно на изучении их реологических свойств при длительном естественном нагружении, подводных склоновых деформациях и процессах осадконакопления [19–22] и не предусматривают инженерного определения совокупности параметров прочности и вязкости при действии подвижной нагрузки.

Объектом исследования являются океанические илы, слагающие глубоководное основание АС в зоне Клариян–Клиппертон Тихого океана. Для параметризации вязкопластической модели с пределом текучести по критерию Мора–Кулона необходимы значения удельного сцепления, угла внутреннего трения, коэффициента вязкости и плотности. Наиболее достоверные значения указанных параметров могут быть получены по результатам полевых испытаний, однако их проведение на больших глубинах ограничено техническими возможностями. В этих условиях приоритет приобретают лабораторные исследования образцов донных илов с последующей инженерной интерпретацией результатов.

Анализ применяемых методов показал, что испытания на одноплоскостной срез (ГОСТ 12248.1–2020) и трёхосное сжатие (ГОСТ 12248.1–2020) ориентированы преимущественно на статические условия нагружения, сопровождаются формированием неоднородного напряжённо-деформированного состояния на большом пути деформации и не предусматривают отдельного учёта кулоновской и вязкой составляющих сопротивления. Кроме того, данные методы характеризуются повышенной трудоёмкостью при работе со слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами. Более предпочтительным является метод вращательного среза (ASTM D4648/D4648M:2016), обеспечивающий локализацию зоны сдвига и реализацию режима испытаний с контролируемой скоростью деформации. Однако традиционные конструкции крыльчатых зондов не позволяют отдельно определять кулоновскую и вязкую составляющие

сопротивления, что обуславливает необходимость разработки специализированного лабораторного прибора.

Таким образом, несмотря на наличие публикаций по определению прочностных и реологических характеристик донных грунтов, проблема их комплексной экспериментальной параметризации для расчётных моделей сопротивления при действии подвижной нагрузки остаётся недостаточно разработанной.

Целью работы является лабораторное определение прочностных и реологических параметров океанических илов методом вращательного среза для параметризации расчётных моделей сопротивления глубоководного основания при перемещении агрегата сбора.

Задачами исследования являются: анализ применимости метода вращательного среза; разработка конструкции лабораторного прибора и комплекта лопастных зондов; проведение лабораторных испытаний для определения физических, прочностных, реологических и тиксотропных характеристик океанических илов; обработка и анализ экспериментальных результатов.

С инженерно-строительной точки зрения результаты таких исследований необходимы для расчётного обоснования проектных решений при создании океанского добычного комплекса. Получаемые прочностные и реологические параметры океанических илов могут использоваться при обосновании параметров работы донных механизмов, размещении и конструктивных решениях вспомогательных сооружений, а также выборе рациональной технологической схемы добычи полезного ископаемого с учётом сопротивления глубоководного илистого основания океанского дна.

## 2. Материалы и методы

Пробы океанических илов были отобраны на полигонах I, II и III российского участка рудной провинции Кларион–Клиппертон из приповерхностного слоя донных осадков мощностью порядка 4 м с помощью коробчатого прободоотборника КП-0.15-1.5. Испытания проводились на пробах, утративших естественную структуру в процессе отбора и транспортировки. Следует отметить, что отбор проб илов ненарушенного сложения с глубин океана 4–5 тыс. м в настоящее время технически невозможен, а воспроизведение монолитов в лабораторных условиях практически неосуществимо.

Физические характеристики океанических илов определяют как непосредственными испытаниями, так и расчетным путем:  $w$  – естественную влажность,  $\rho$  – плотность,  $\rho_s$  – плотность частиц грунта, – в соответствии с требованиями ГОСТ 5180–2015;  $e_0$  – коэффициент пористости,  $\rho_d$  – плотность сухого грунта,  $n$  – пористость,  $w'$  – влажность с учетом минерализации поровой воды, – соответственно по формулам (A5, A8, A11) ГОСТ 25100–2020 и (1) [18].

Прочностные и реологические параметры океанических илов: удельное сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , коэффициент вязкости  $\eta$ , предел текучести  $\tau_0$  определяют с учетом отдельных положений ASTM D4648/D4648M:2016 и ГОСТ 20276.5–2020 на специально разработанном для судовой лаборатории приборе вращательного среза (ПВС) (рис.1).

Прибор предназначен для экспресс-определения прочностных и реологических характеристик слабых водонасыщенных глинистых грунтов. Принцип его действия основан на срезе грунта лопастным зондом (штамп-крыльчаткой или крыльчаткой) при заданной скорости вращения поворотного столика и нормальном давлении на образец с одновременным измерением крутящего момента на валу зонда и угла поворота образца.

Прибор разработан при участии автора, прошёл метрологическую аттестацию и был успешно апробирован при испытании океанических илов в стационарных и судовых лабораториях в ходе глубоководных инженерно-геологических исследований [14]. Краткая техническая характеристика ПВС и оборудования представлены в табл.1.

Испытания грунта проводят следующим образом. ПВС устанавливают в горизонтальном положении. Вращением рукоятки подъёмно-опускного механизма кронштейн с валом 6 выводят в крайнее верхнее положение. На поворотный столик 3 устанавливают и закрепляют стопорными винтами кольцо 11 с образцом грунта. Для определения прочностных параметров  $c$  и  $\varphi$  на вал 6 устанавливают штамп-крыльчатку 8

и фиксируют её стопорным винтом. С помощью подъёмно-опускного механизма штамп-крыльчатку подводят к поверхности образца, после чего стопорный винт ослабляют, и зонд под действием собственного веса внедряется в грунт. Дополнительное нормальное давление на образец создают установкой грузов 9 на грузовой столик штампа-крыльчатки. Сопротивление грунта срезу определяют на идентичных образцах не менее чем при трёх значениях нормального давления при заданной постоянной скорости вращения поворотного столика.

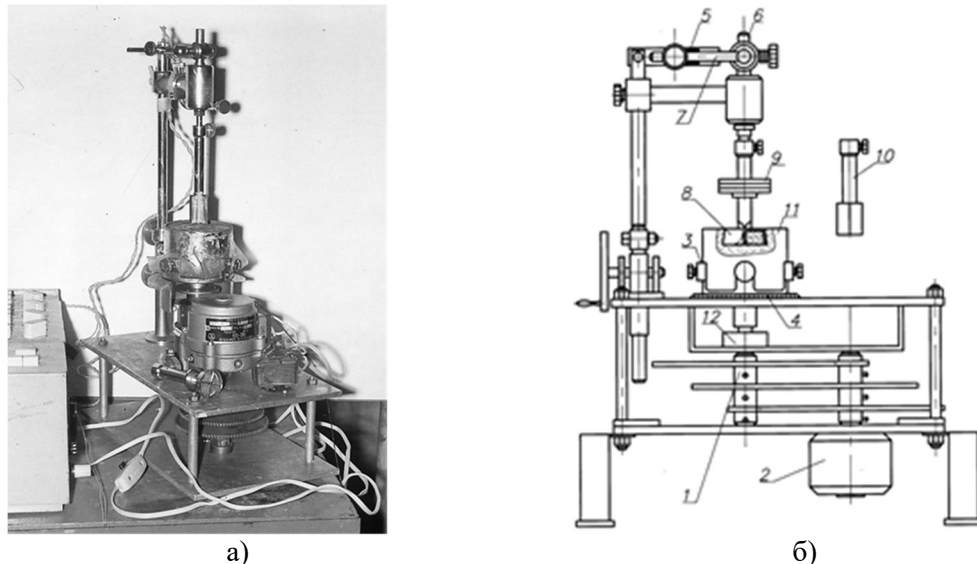


Рис.1. Общий вид прибора вращательного среза (а) и его конструктивная схема (б): 1 – механический редуктор; 2 – электромотор; 3 – поворотный столик; 4 – лимб; 5 – тензопластина; 6 – вал; 7 – Г-образный упор; 8 – штамп-крыльчатка; 9 – грузы; 10 – крыльчатка; 11 – кольцо с грунтом; 12 – датчик угла поворота [23]

Fig. 1. General view of the vane shear device (a) and its design scheme (b): 1 – mechanical gearbox; 2 – electric motor; 3 – rotary table; 4 – limb; 5 – strain gauge plate; 6 – shaft; 7 – L-shaped stop; 8 – vane stamp; 9 – weights; 10 – vane; 11 – ring with soil; 12 – angle sensor [23]

Таблица 1

Техническая характеристика ПВС и оборудования

| Прибор и оборудование            | Высота $H$ , см | Длина $L$ , см | Ширина $B$ , см | Скорость $V$ , об/мин | Масса $m$ , кг | Диаметр $D$ , см | Площадь $A$ , см <sup>2</sup> |
|----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| Прибор вращательного среза (ПВС) | 45              | 30             | 17              | 3,2;8,9;15,3          | 7,35           | -                | -                             |
| Штамп-крыльчатка                 | 0,7             | -              | -               | -                     | 0,15           | 3                | 7                             |
| Крыльчатка                       | 3               | -              | -               | -                     | 0,12           | 3                | -                             |
| Рабочее кольцо                   | 6               | -              | -               | -                     | 0,25           | 7,1              | 38,5                          |

Для определения реологических параметров  $\eta$  и  $\tau_0$  на вал 6 устанавливают крыльчатку 10 и фиксируют её стопорным винтом. С помощью подъёмно-опускного механизма крыльчатку заглубляют в образец грунта на полную высоту лопастей. Испытания проводят на идентичных образцах при трёх значениях скорости вращения поворотного столика.

С помощью редуктора 1 задают требуемую скорость вращения поворотного столика 3 и включают электродвигатель 2. При вращении образец грунта подвергается вращательному срезу зондом 8 или 10, в результате чего на вал 6 передаётся крутящий момент  $M$ , обусловленный сопротивлением грунта сдвигу. Крутящий момент через Г-образный упор 7 вызывает упругий прогиб  $\Delta$  пластины 5, который измеряется индикатором и тензодатчиком. Одновременно лимб 4 и датчик 12 фиксируют угол поворота  $\alpha$  столика 3. Срез образца продолжают до достижения заданного значения угла  $\alpha$ .

По измеренным в процессе испытания значениям  $\Delta$  и  $\alpha$  строят зависимость  $\Delta = f(\alpha)$ , которую используют для расчета касательного напряжения  $\tau$  и перемещения среза  $U$  и

построения графика  $\tau = f(U)$ . При автоматизации хода испытаний график зависимости  $\Delta = f(\alpha)$  регистрируют в электронном виде.

Сопротивление срезу  $\tau$ , кПа, определяют по формуле

$$\tau = M / B, \quad (1)$$

где  $M$  – крутящий момент, кН·м, принимаемый по градуировочной зависимости  $M = f(\Delta)$ ;  $B$  – статический момент площади поверхности среза, м<sup>3</sup>. Для штампа-крыльчатки:

$$B = \pi D^3 / 12, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр крыльчатки, м.

Для крыльчатки статический момент вычисляют по формуле (5.7) ГОСТ 20276.5–2020. Линейную скорость среза  $V$ , м/с, определяют из соотношения

$$V = U / t. \quad (3)$$

где  $U$  – перемещение среза, м;  $t$  – время деформирования образца, с.

Скорость относительной деформации среза  $\dot{\gamma}$ , 1/с, вычисляют по формуле

$$\dot{\gamma} = 2V / D. \quad (4)$$

Процедура изготовления образцов океанических илов заключалась в следующем. Пробу грунта подвергали тиксотропному разупрочнению механическим перемешиванием в течение 3 мин с использованием лабораторного миксера, после чего укладывали в рабочее кольцо прибора. Кольцо с грунтом помещали в эксикатор, заполненный морской водой, где образцы выдерживали в течение 1 или 6 суток до начала испытаний для восстановления структурных связей после перемешивания. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 65 мм при отношении высоты к диаметру 0,92.

В ходе экспериментов по схеме неконсолидированного быстрого среза определяли пиковое  $\tau_{\max}$  (наибольшее касательное напряжение) и остаточное  $\tau_{\text{res}}$  (установившееся касательное напряжение) сопротивления срезу при перемещении среза  $U = 0,4$  м (4 оборота образца). Параметры испытаний варьировали в соответствии с программой работ в следующих диапазонах: нормальное давление  $p = 4,27 - 10,9$  кПа; скорость среза  $\dot{\gamma} = 0,33 - 1,6$  1/с; время тиксотропного упрочнения  $t_{\text{упр}} = 1$  и 6 сут. Каждое значение сопротивления срезу  $\tau$  получали по результатам испытаний пяти идентичных образцов.

Параметры  $\phi$  и  $c$  вычисляли по формулам (9) и (10) ГОСТ 20522 – 2012. Значения  $\eta$  и  $\tau_0$  определяли как коэффициенты линейной зависимости

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (5)$$

по результатам статистической обработки экспериментальных точек методом наименьших квадратов согласно ГОСТ 20522–2012.

### 3. Результаты и обсуждение

Значения физических характеристик донных осадков полигонов I, II и III (табл. 2) близки, что свидетельствует о сходстве их физического состояния в природных условиях. В соответствии со строительной классификацией ГОСТ 25100–2020 исследованные пробы относятся к глинистым илам.

Низкие значения плотности и высокие значения влажности и пористости свидетельствуют о том, что грунт находится в состоянии с пониженной прочностью и высокой деформируемостью, что в инженерной литературе часто описывают как слабые водонасыщенные глинистые грунты [24].

Таблица 2

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 $e_0$ , д. е. |
|------------|---------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| I          | 328                       | 1,21                                        | 2,40                                                 | 88                        | 7,53                                        |
| II         | 357                       | 1,20                                        |                                                      | 89                        | 8,25                                        |
| III        | 302                       | 1,22                                        |                                                      | 88                        | 7,0                                         |

На рис. 2 приведены характерные графики зависимости сопротивления сдвигу от пути сдвига  $\tau = f(U)$  океанического ила, полученные при испытаниях образцов крыльчаткой и штампом-крыльчаткой со скоростью сдвига  $V = 0,024$  м/с. Кривые имеют типичную для слабых грунтов форму с выраженными пиковым и остаточным значениями сопротивления.

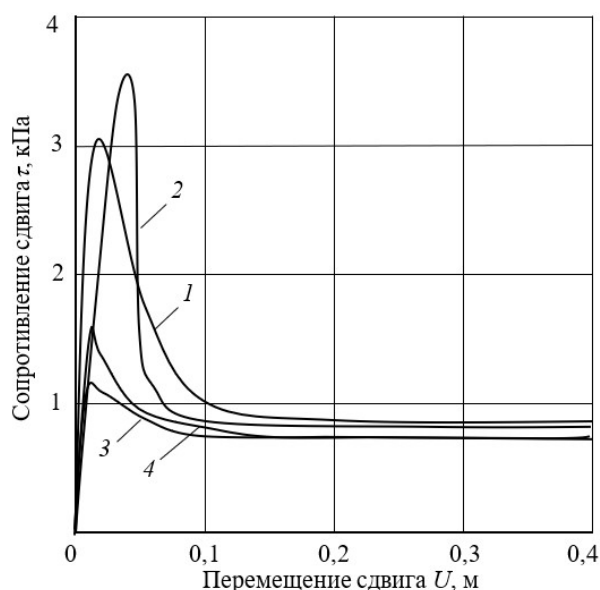


Рис. 2. Графики  $\tau = f(U)$  океанического ила при скорости среза  $V = 0,024$  м/с и времени тиксотропного упрочнения  $t_{упр.} = 1$  и 6 сут: 1, 2 — крыльчатка; 3, 4 — штамп-крыльчатка ( $p = 6,7$  кПа) (иллюстрация автора)

Fig. 2. Graphs of  $\tau = f(U)$  for oceanic silt at shear velocity  $V = 0.024$  m/s and thixotropic strengthening time  $t_{str.} = 1$  and 6 days: 1, 2 — vane shear; 3, 4 — vane stamp ( $p = 6.7$  kPa) (illustration by the author)

Исследованный донный грунт характеризуется низкими значениями пиковой прочности  $\tau_{max} = 3,1\text{--}3,7$  кПа и остаточной  $\tau_{res} = 0,8\text{--}1,0$  кПа при испытании крыльчаткой и соответственно  $\tau_{max} = 1,2\text{--}1,6$  кПа и  $\tau_{res} = 0,6\text{--}0,7$  кПа при испытании штампом-крыльчаткой. За время тиксотропного упрочнения ( $t_{упр.} = 6$  сут) отмечается увеличение пиковой прочности, тогда как остаточная прочность практически не изменяется. Средние значения  $\tau_{max}$ , полученные при испытании крыльчаткой, в 2,4 раза превышают результаты, определённые штампом-крыльчаткой, тогда как  $\tau_{res}$  практически совпадают. Пиковые сопротивления превышают остаточные в 3,7 раза при срезе крыльчаткой и в 2 раза — штампом-крыльчаткой. Снижение прочности океанического ила обусловлено частичным разрушением пространственной коагуляционной структуры после достижения пика и переходом грунта к режиму преимущественно межчастичного трения при сохранении остаточных структурных связей.

По результатам испытаний штампом-крыльчаткой и линейной аппроксимации зависимости  $\tau = f(p)$  определены параметры прочности: удельное сцепление  $c_{max} = 0,87\text{--}1,15$  кПа,  $c_{res} = 0,25\text{--}0,35$  кПа, а также угол внутреннего трения  $\phi_{max} = \phi_{res} = 3\text{--}4^\circ$  (рис.3).

Совпадение углов внутреннего трения обусловлено неизменностью формы и минерального состава частиц. Величина  $c_{max}$  примерно втрое превышает  $c_{res}$ , тогда как значения  $\phi_{max}$  и  $\phi_{res}$  практически совпадают, увеличиваясь с  $3^\circ$  при  $t_{упр.} = 1$  сут до  $4^\circ$  после  $t_{упр.} = 6$  сут. Это указывает на доминирующую роль структурной составляющей прочности при относительно стабильном фрикционном вкладе. За 6 суток тиксотропного упрочнения сцепление возрастает в среднем на 35 %, тогда как угол внутреннего трения увеличивается лишь на  $1^\circ$ . Таким образом, временной фактор существенно влияет на сцепление и в значительно меньшей степени — на трение частиц, не изменяя соотношение между пиковыми и остаточными значениями угла внутреннего трения.



Рис. 3. Графики  $\tau = f(p)$  океанического ила при скорости среза  $V = 0,024$  м/с и времени тиксотропного упрочнения  $t_{упр} = 1$  и 6 сут: 1, 2 – пикового ( $\tau_{max}$ ); 3, 4 – остаточного ( $\tau_{res}$ ) (иллюстрация автора)

Fig. 3. Graphs of  $\tau = f(p)$  for oceanic silt at shear velocity  $V = 0.024$  m/s and thixotropic strengthening time  $t_{str.} = 1$  and 6 days: 1, 2 – peak ( $\tau_{max}$ ); 3, 4 – residual ( $\tau_{res}$ ) (illustration by the author)

На рис. 4 представлены зависимости скорости деформации среза от сопротивления срезу  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  для океанического ила после тиксотропного упрочнения в течение 1 и 6 сут. Графики получены при испытаниях крыльчаткой при трёх значениях скорости среза, соответствующих  $\dot{\gamma} = 0,33; 0,93$  и  $1,6$  с<sup>-1</sup>.



Рис. 5. Графики  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  океанического ила при времени тиксотропного упрочнения  $t_{упр} = 1$  и 6 сут: 1, 2 – пикового ( $\tau_{max}$ ); 3, 4 – остаточного ( $\tau_{res}$ ): (иллюстрация автора)

Fig. 5. Graphs of  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  for oceanic silt at thixotropic strengthening time  $t_{str.} = 1$  and 6 days: 1, 2 – peak ( $\tau_{max}$ ); 3, 4 – residual ( $\tau_{res}$ ) (illustration by the author)

Как следует из зависимостей 1–4, увеличение скорости среза в 4,8 раза приводит к росту пиковой прочности  $\tau_{max}$  с 2,7 до 3,8 кПа и остаточной  $\tau_{res}$  с 0,8 до 1,0 кПа, что свидетельствует о выраженной скоростной чувствительности прочности ила, прежде всего её структурной составляющей. Сопоставление графиков показывает, что тиксотропное упрочнение заметно влияет на  $\tau_{max}$ , тогда как изменение  $\tau_{res}$  выражено значительно слабее.

Линейные участки реологических кривых при  $\tau > \tau_0$  свидетельствуют о вязкопластическом характере деформирования океанических илов, для которого с достаточной точностью применим закон Бингама–Шведова. Значения коэффициентов вязкости составили:  $\eta_{max} = 350\text{--}470$  Па·с;  $\eta_{res} = 150\text{--}160$  Па·с, пределов текучести:  $\tau_{0,max} = 2,6\text{--}3,0$  кПа;  $\tau_{0,res} = 0,7$  кПа. Реологические параметры изменяются менее существенно по сравнению с удельным сцеплением и слабо зависят от продолжительности тиксотропного упрочнения. Это указывает на преимущественное влияние временного фактора на структурную составляющую прочности при относительной стабильности вязкостных свойств материала.

Прямых аналогов исследований прочностных и реологических параметров океанических илов по применённой схеме испытаний не выявлено. Наиболее близкими по методике являются исследования физических, прочностных и тиксотропных свойств донных осадков рудной провинции Кларифон–Клиппертон [14, 25].

Физические характеристики исследованных илов (табл. 2) сопоставимы с данными судовых определений: влажность 182–292 %, плотность 1,2–1,3 г/см<sup>3</sup>, пористость 81–89 %, коэффициент пористости 4,26–8,02. Полученные значения сопротивления вращательному срезу ( $\tau_{max} = 3,1\text{--}3,7$  кПа  $\tau_{res} = 0,8\text{--}1,0$  кПа) соответствуют характеристикам продуктивного слоя донных осадков, вмещающего железомарганцевые конкреции ( $\tau_{max} = 0,7\text{--}2,6$  кПа  $\tau_{res} = 0,8\text{--}0,9$  кПа), и близки к нижней границе прочности подстилающих отложений ( $\tau_{max} = 1,8\text{--}$

17,4 кПа  $\tau_{\text{res}} = 0,6\text{--}6,9$  кПа). Более высокие значения, полученные при судовых испытаниях, вероятно обусловлены лучшей сохранностью природной структуры образцов и естественным ростом прочности с поддонной глубиной залегания. Сопоставимые закономерности установлены и при тиксотропном разупрочнении донных осадков: снижение прочности образцов ненарушенного сложения (порядка 6 кПа) под действием вибрационной нагрузки достигала 70–80 %, что подтверждает определяющую роль структурных связей в формировании сопротивления сдвигу [25].

Сравнение выполнено по результатам испытаний океанических илов крыльчаткой на разработанном ПВС, поскольку использование различных методик не обеспечивает их прямой сопоставимости. Полученные диапазоны прочностных характеристик не выходят за пределы опубликованных данных для слабых морских глинистых грунтов, что подтверждает корректность применённого методического подхода.

#### 4. Заключение

Океанические илы покровного слоя района Кларион–Клиппертон Тихого океана характеризуются высокой влажностью (302–328 %), значительной пористостью (88–89 %) и низкой плотностью (1,20–1,22 г/см<sup>3</sup>), что определяет их слабое механическое состояние.

Для параметризации расчётных моделей сопротивления глубоководного основания при перемещении АС определены прочностные и реологические параметры океанических илов методом вращательного среза с использованием ПВС и набора крыльчатых зондов.

Донные осадки характеризуются низкими значениями пикового и остаточного удельных сцеплений ( $c_{\text{max}} = 0,87\text{--}1,15$  кПа;  $c_{\text{res}} = 0,25$  до 0,35 кПа) при практически неизменном угле внутреннего трения (3–4°). По уровню прочности они соответствуют состоянию структурно-разупрочнённого основания, при котором сопротивление срезу, определенное с использованием крыльчатки, может снижаться до 40–50 % от исходной под действием подвижной нагрузки.

Сопротивление срезу океанических илов зависит от скорости деформирования. Получены коэффициенты вязкости  $\eta_{\text{max}} = 350\text{--}470$  Па·с и  $\eta_{\text{res}} = 150\text{--}160$  Па·с.

Тиксотропное упрочнение увеличивает сцепление на 30–35 % при незначительном изменении фрикционных и вязкостных параметров. Рост сцепления при тиксотропном упрочнении океанических илов отражает восстановление структурных (коагуляционных) связей, тогда как практически неизменный угол внутреннего трения свидетельствует о стабильности фрикционного механизма сопротивления.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных прочностных и реологических параметров океанических илов в инженерных расчётах сопротивления глубоководного илистого основания для обоснования проектных решений, связанных с агрегатом сбора как элементом океанского добычного комплекса, планируемого к строительству.

#### Список литературы / References

1. Конференция «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана»: сборник тезисов. Санкт-Петербург 17-19 июня 2024 года. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2024. – 81 с.  
The conference «Development of the mineral resources of the World Ocean»: collection of abstracts. St. Petersburg, June 17-19, 2024. St. Petersburg: VNII Oceanology, 2024. 81 p.
2. Юнгмейстер Д.А., Судариков С.М., Киреев К.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88-95. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.88  
Yungmeister, D. A., Sudarikov, S. M., Kireev, K. A. Feasibility of the types of deep-water machinery for the extraction of marine ferro-manganese nodules // Journal of Mining Institute. 2019. 235 (1). P. 88-95. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.88
3. Zhang, X.; Zuo, Y.; Wei, J.; Sha, F.; Yuan, Z.; Liu, X.; Xi, M.; Xu, J.A. Review on Underwater Collection a Transportation Equipment of Polymetallic of Polymetallic Nodules in Deep-Sea Mining. J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 788. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12050788>

4. 9 Subsea Mineral Harvesters. 2024. URL: <https://deepseamining.ac/article/52#gsc.tab=0> (reference date: 10/02/2025)
5. Robotics & Automation News // GSR rescues its deep-sea manganese mining robot. 2021. URL: [https://roboticsandautomationnews.com/2021/05/03/gsr-rescues-its-deep-sea-mining-robot/42979/?utm\\_source=chatgpt.com](https://roboticsandautomationnews.com/2021/05/03/gsr-rescues-its-deep-sea-mining-robot/42979/?utm_source=chatgpt.com) (reference date: 10/02/2025)
6. Kang, Y., Liu, S. The Development History and Latest Progress of Deep-Sea Polymetallic Nodule Mining Technology // Minerals. 2021. 11. 1132. DOI: 10.3390/min11101132
7. 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/niokr/0KuV7OwqGmeotmLDg9PGj9X8tEVZ7TOX.pdf> (дата обращения: 10.02.2025)  
Development of technical specification and feasibility study for the FMN collection unit. Research work «PAS-GMK-TT». Bauman Moscow State Technical University. URL: <https://www.sudprom2030.ru/files/niokr/0KuV7OwqGmeotmLDg9PGj9X8tEVZ7TOX.pdf> (reference date: 10/02/2025)
8. Разработка технических требований к агрегату сбора ЖМК. Шифр: ТТЗ-ЖМК. Росгеология. URL: <https://ppt-online.org/902831> (дата обращения: 16.02.2025)  
Development of technical requirements for the FMN collection unit. Code: TTZ-FMN. Rosgeology. URL: <https://ppt-online.org/902831> (reference date: 02/16/2025)
9. Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Y., Anzhelo G.O. Viscosity of Clayey Soils: Experimental Studies // Appl. Sci. 2024. 14. 5974. DOI: 10.3390/app14145974
10. Liu Y., Fang N., Zheng Y., Wu K., Chen R., Lu H., Vuong V.Q. Creep behavior and quantitative prediction of marine soft clay based on a nonlinear elasto-plastic-viscous element assembly model // J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 1142. DOI: 10.3390/jmse13061142
11. Robinson, S., Brown, M. J., Knappett, J., Brennan, A., Caballero, D. D., Arroyo, M. The variation of large strain viscous rate effects from undrained triaxial element testing of Kaolin clay // Acta Geotechnica. 2025. DOI: 10.1007/s11440-025-02797-3
12. Anderson D.G. Strength properties of some Pacific and Indian Oceans sediments // Technical Note N-1177. 1971. Port Hueneme. Naval Civil Engineering Laboratory. 47 p. DOI: 10.5962/bhl.title.48218
13. Neizvestnov, J.V., Bronin, V.N., Bakenov, H.Z., Ananyev, A.A. Complex researches of ocean silt: collection of scientific articles – International colloquium on viscoplasticity of geomaterials / University of Bucharest. 1990. P. 18-22.
14. Кондратенко А.В. Физико-механические свойства донных образований на глубоководных месторождениях железомарганцевых конкреций // Горный журнал. 2012. № 3. С. 37-41.  
Kondratenko, A.V. Physico-mechanical properties of bottom formations in deep-sea deposits of ferromanganese nodules // Mining journal. 2012. Iss. 3. P. 37-41
15. Ananiev A.A. Investigation of strength and deformability of the deep-water clay base of the ferromanganese nodules collection unit: E35 Web Conf Volume 363, 02007 (2022) 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. 9 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202236302007
16. Shen J., Wang X., Chen Q., Ye Z., Gao Q., Chen J. Numerical Investigations of Undrained Shear Strength of Sensitive Clay Using Miniature Vane Shear Tests // J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 1094. DOI: 10.3390/jmse11051094
17. Королева И.В. Особенности деформирования глин при блочном ступенчатом статическом трехосном нагружении // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.10  
Koroleva, I.V. Deformation of clay under block step-by-step static triaxial loading // Construction: science and education. 2025. 15(1). 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.
18. Ананьев А.А., Кондратенко А.В. Оптимизация определения параметров прочности океанических илов района Кларион-Клиппертон Тихого океана. Геотехника. 2024. Том XVI, № 3, С. 52–63. DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-3-52-63

- Ananyev A.A., Kondratenko A.V.. Optimization of determination of strength parameters of oceanic silts in the Clarion-Clipperton area of the Pacific Ocean. *Geotechnics*. 2024. Vol. XVI, No. 3, P. 52–63, DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-3-52-63
19. Li H., Xiu Z., Liu L., Dong J., Xie, Q., Huan, M., Luo, C., Zeng, Y., Guo, X. Rheological properties of deep-sea shallow sediments in the Western Pacific mining area // *Soils and Foundations* 65. 2025. P. 1-13. DOI:10.1016/j.sandf.2025.101632
20. Liu J., Li. S., Duan G. Steady rheological behavior and unified strength model for reconstituted deep-sea sediments // *Engineering Geology* 2023. Vol. 316. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107058
21. Godoy V.B., Schnaid F., Alves A. R., Holthusen D., Leonhard A., Reichert J., M. Viscous and Rheological Behavior of a Marine Soil Under Static and Dynamic Loading // *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2025. Vol.147. Iss. 6. 062103. 13 p. OMAE-25-1050. DOI: 10.1115/1.4069096
22. Wei Xin., Li J., Sun Z., Xu L. Study on the steady-state and dynamic rheological characteristics of five clayey materials // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol.458. 139583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139583
23. Ананьев А.А. Оценка сопротивлений основания океанского дна при взаимодействии с подвижными нагрузками: сб. тр. научно-технической конференции – Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства / Санкт-Петербургский госуд. архит. – строит. ун-т. СПб., 2010. С 341-347  
Ananyev A.A. Estimation of seabed resistances under interaction with mobile loads. *Proc. Sci.-Tech. Conf. Current Issues of Geotechnics in Solving Complex New Construction Challenges / Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*, Saint Petersburg, 2010, P. 341–347
24. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских зданий на слабых водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.  
Abelev M.Y. Construction of industrial and civil buildings on weak water-saturated soils. Moscow: Stroyizdat, 248 p.
25. Вознесенский Е.А., Федотов А.Ю. Динамические свойства глубоководных илов Тихого океана // *Инженерная геология*. 1991, № 3. С. 9-19.  
Voznesensky E.A., Fedotov A.Yu. Dynamic properties of deep-sea silts of the Pacific Ocean // *Engineering geology*. 1991, No. 3. P. 9–19.

#### Информация об авторах

**Ананьев Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
Email: andrej.3@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4951-8727

#### Information about the authors

**Andrey A. Ananiev**, candidate of technical sciences, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation  
Email: andrej.3@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4951-8727

*Дата поступления: 11.05.2025*

*Дата принятия: 27.04.2026*