

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ОТЛОЖЕНИЯХ БРОВКИ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ПОСЕЛКА АРХИПО-ОСИПОВКА

SUBMARINE LANDSLIDES FORMATION IN THE SHELFBREAK SEDIMENTS OF THE BLACK SEA NEAR ARCHIPO-OSIPOVKA

ИОНОВ В.Ю.

Кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, sevaionov@gmail.com

КАЛИНИН Э.В.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., engeol@geol.msu.ru

ФОМЕНКО И.К.

Главный специалист по изысканиям московского филиала компании «Галф Интерстейт Инжиниринг», к.г.-м.н., г. Москва, ifolga@gmail.com

МИРОНЮК С.Г.

Начальник сектора опасных геологических процессов ООО «Петер Газ», г. Москва, mironyuk.Sergey@petergaz.com

IONOV V.J.

Lomonosov Moscow State University, faculty of geology, chair of engineering and ecological geology, sevaionov@gmail.com

KALININ E.V.

Professor of Lomonosov Moscow State University, faculty of geology, chair of engineering and ecological geology, engeol@geol.msu.ru

FOMENKO I.K.

Chief specialist for engineering survey of the moscow branch of the «Gulf Interstate Engineering» company, Moscow, ifolga@gmail.com

MIRONYUK S.G.

Chief of Geohazard Sector of «Peter Gaz» LLC, Moscow, Mironyuk.Sergey@petergaz.com

Ключевые слова:

подводные оползни; условия формирования; Черное море; шельф; бровка континентального склона; гравитационные процессы; оценка устойчивости склона; морские грунты; физико-механические свойства; коэффициенты сейсмичности.

Key words:

submarine landslides; triggering mechanisms; the Black Sea; shelf; shelfbreak; mass movement processes; slope stability analysis; marine sediments; physical-mechanical properties; seismic coefficients.

Аннотация

В статье на примере участка, расположенного в области бровки континентального склона в северо-восточной части Черного моря, рассмотрены условия формирования подводных оползней. Выполнены расчеты устойчивости склонов с помощью одномерного и двухмерного моделирования с учетом возможных сейсмических воздействий (коэффициентов сейсмичности). Расчеты по одномерным моделям позволили выявить разновидности грунтов, которые могут выступать в роли основных деформируемых горизонтов. Такими грунтами являются илы. Результаты двухмерных расчетов показали, что в статических условиях область шельфа находится в устойчивом состоянии, а в области континентального склона возможно формирование оползней в отложениях, представленных илами и супесями. Из анализа с учетом сейсмических воздействий следует, что глинистые разновидности грунтов теряют устойчивость при сейсмических нагрузках интенсивностью 7 баллов, а песчаные — при 8 баллах и более.

Введение

В последние 20 лет происходит активное освоение месторождений нефти и газа на шельфах Российской Федерации: строятся протяженные морские трубопроводы, такие как «Голубой поток», «Джубга — Лазаревское — Сочи» и «Южный поток».

При освоении месторождений сооружения добычного комплекса обычно располагают на участках с относительно простыми инженерно-геологическими условиями, в то время как подводные трубопроводы зачастую пересекают участки возможного развития подводных гравитационных процессов. Все перечисленные выше трубопроводы проходят по дну Черного моря, а два из них («Голубой поток» и «Южный поток») пересекают область континентального склона — участок, наиболее опасный с точки зрения развития подводных оползней.

Необходимо отметить, что в пределах российского сектора Черного моря обнаружен ряд структур, перспективных для добычи углеводородов [2]. При этом некоторые из месторождений расположены у подножия континентального склона и могут находиться под воздействием подводных гравитационных процессов, что, несомненно, затруднит их освоение.

Целью настоящей статьи является выявление условий формирования подводных оползней в области Кавказского шельфа и бровки континентального склона Черного моря. В соответствии с поставленной целью должны быть решены следующие задачи: (1) изучение инженерно-геологических условий указанного участка; (2) составление расчетной схемы для оценки устойчивости

Abstract

Herein on an example area which is situated at the shelfbreak in the north-eastern part of the Black Sea the formation of submarine landslides is discussed. 1D and 2D slope stability analyses were carried out taking into account possible seismic loads. The 1D analysis revealed soil types within a slip surface could be enclosed. Such soils are organic clays. The 2D analysis shows that in static conditions the shelf area is stable but in organic clays and silts on the continental slope landslides may develop. The slope stability analysis with seismic force shows that clayey soils become unstable under seismic loads of intensity VII and sandy soils do under impacts of intensity VIII and higher.



склонов в соответствии с особенностями подводных инженерно-геологических условий; (3) оценка устойчивости подводных склонов на исследуемом участке.

Одной из первых публикаций, посвященных подводным оползневым процессам в пределах Черного моря, является работа А.Д. Архангельского 1930 года [1], в которой показано, что они повсеместно развиты на континентальном склоне, о чем свидетельствует перемятый вид осадков в кернах станций пробоботбора. В дальнейшем подводные гравитационные процессы Кавказского шельфа рассматривались в 1980-е годы во время исследований подводных каньонов [11, 12, 13]. В конце XX века сотрудниками научного центра «Южморгеология» при проведении геофизических работ был обнаружен гигантский оползень площадью 200 км² в области конуса выноса реки палео-Кубань [6]. В начале XXI века проблемами подводных оползней на Кавказском шельфе активно занимается круг авторов из Института океанологии им. П.П. Шишова РАН [10, 8].

Выводы всех исследователей показывают, что подводные оползни широко развиты на дне Черного моря и могут обладать колоссальными размерами.

При ознакомлении с публикациями, связанными с данной темой, было обнаружено, что, несмотря на широкое распространение на подводных склонах Черного моря гравитационных процессов, они являются слабо изученными. На это указывает и практически полное отсутствие работ по этим проблемам за последние 5 лет.

В публикациях встречаются в основном результаты геофизических и гидрографических исследований, в единичных работах можно найти данные опробования. Ни один из исследователей в явном виде не приводит информации о факторах формирования подводных оползней в Черном море. Практически полностью отсутствуют результаты бурения, а также моделирования подводных гравитационных процессов. Редко можно обнаружить данные о физических свойствах донных осадков и практически полностью отсутствует информация о физико-механических характеристиках грунтов.

Активное освоение акватории Черного моря и слабая изученность подводных оползневых процессов говорят о необходимости детального изучения и прогноза развития последних в данном регионе. Для их исследования был выбран участок, прилегающий к бровке континентального склона в 9 км к югу от поселка Архипо-Осиповка в северо-восточной части Черного моря (рис. 1).

Инженерно-геологические условия рассматриваемого участка

Рассматриваемый участок ограничен с северо-востока изобатой 40 м, а с юго-запада — изобатой 1400 м. Ширина шельфа здесь составляет от 4,0 до 9,5 км. Бровка континентального склона, после которой начинается резкий свал глубин в северо-западной части участка, начинается с изобаты 70 м, постепенно снижаясь в юго-восточном углу до изобаты 100 м.

Внешний шельф представляет собой пологую аккумулятивную равнину с уклоном менее 1°. При приближении к бровке континентального склона поверхность рельефа становится неровной, уклон возрастает и в месте свала глубин достигает максимальных величин,

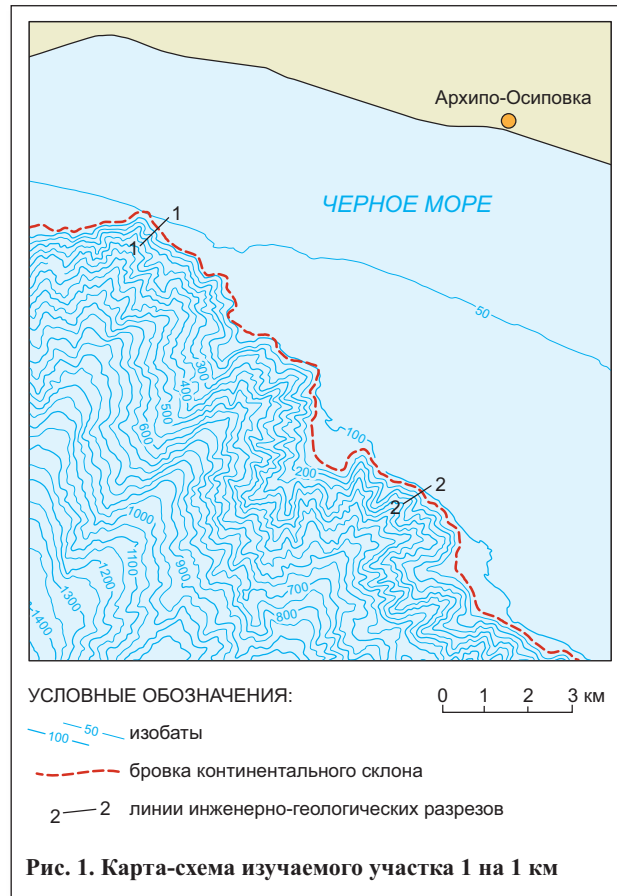


Рис. 1. Карта-схема изучаемого участка 1 на 1 км

превышающих 30°. Его средние значения составляют порядка 10°.

Поверхность континентального склона имеет сложное строение и рассечена системой подводных каньонов, глубина вреза которых достигает 300 м.

Согласно геофизическим данным мощность рыхлых отложений (РО) в области шельфа и бровки континентального склона составляет порядка 20 м. На континентальном склоне РО распределены неравномерно. В донных областях каньонов и их отвершках толщина этих отложений незначительна: она не превышает 2 м на уровне 200-метровой изобаты в юго-восточном углу участка и на уровне 110-метровой изобаты в северной части. При этом мощность РО может увеличиваться до 10–15 м на гребнях, разделяющих каньоны.

Геологическое строение рассматриваемого участка было изучено по данным буровых скважин и станций опробования вдоль линий профилей 1–1 и 2–2 (по архивным материалам ООО «Питер Газ»), представленных на рис. 1. Эти профили имеют северо-восточное простирание, расположены в области бровки континентального склона и перпендикулярны ей, совпадают с направлениями падения подводных склонов. Один из них расположен в северной части участка и имеет длину 1 км, другой — в юго-восточной части и имеет протяженность 870 м. Северный профиль находится в верховьях основного русла подводного каньона, а юго-восточный — в верховьях одного из отвершков.

Указанные разрезы были изучены до глубины 28 м от поверхности дна. В их строении принимают участие грунты палеоцен-эоценового и четвертичного возраста.

Частные значения физических и физико-механических свойств грунтов подвергались статистической обработке по известной методике [4], результаты которой

представлены в табл. 1. Следует отметить, что некоторые идентичные по свойствам разновидности грунтов были встречены в геологических телах различного генезиса, поэтому для них статистическая обработка проводилась совместно.

Грунты палеоцен-эоценового возраста представлены глинами от тугопластичных до полутвердых, глинами от твердых до полутвердых и аргиллитами. Грунты четвертичного возраста — илом глинистым газонасыщенным, илом глинистым, глинами от текучепластичных до мягкопластичных, супесями пылеватыми, песками от пылеватых до мелких, суглинками и глинами тугопластичными, ракушечным грунтом.

Использованные авторами архивные значения свойств отложений включали в себя результаты определения пределов Аттерберга и гранулометрического состава согласно британскому стандарту [21], вследствие чего возникли затруднения при переводе названий грунтов. Для выделения их разновидностей была использована система, предложенная в работе [9], а также личный опыт авторов и архивные данные компании ООО «Питер Газ».

Палеоцен-эоценовые грунты представлены терригенным флишем, а именно глинами и аргиллитами с редкими и маломощными прослоями песчаников.

Глины от тугопластичных до полутвердых имеют среднее значение удельного недренированного сцепления c_{UU} по результатам трехосного сжатия по неконсолидированно-недренированной схеме, равное 121,8 КПа. Для глин от твердых до полутвердых характерно c_{UV} , составляющее 292,8 КПа, и среднее значение влажности $W = 24,3\%$. Аргиллиты по пределу прочности на одноосное сжатие можно определить как грунты от пониженной прочности до малопрочных со средним значением предела прочности на одноосное сжатие $R_{сж} = 8,41$ МПа. По данным бурения угол падения палеоцен-эоценовых отложений составляет от 30 до 80°. Согласно работе [1] их слои падают в Ю-ЮЗ направлении. Максимальная вскрытая мощность отложений палеоцен-эоценового возраста составляет 19 м.

На породах терригенного флиша несогласно залегают **отложения четвертичного возраста**, представленные преимущественно илами, глинами и песками.

Таблица 1

Нормативные показатели физических и физико-механических свойств грунтов*															
Грунт	Возраст	W, %	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	ρ_s , г/см ³	e, безр. азм.	PL, %	LL, %	PI = LL - PL, %	I_p , %	c_{TV} , КПа	c_{LV} , КПа	c_{UV} , КПа	ϕ , град	c, КПа
Ил глинистый газонасыщенный	Q	108,20	1,40	0,67	2,68	2,97	35,69	89,13	53,44	41,96	4,5	4,5	-	-	-
Ил глинистый	Q	56,92	1,63	1,04	2,69	1,59	26,46	58,46	32,00	19,91	7,5	6,1	-	-	-
Глины от текучепластичных до мягкопластичных	Q	44,17	1,77	1,23	2,67	1,18	25,83	59,83	34,00	21,94	25,4	21,5	23,0	-	-
Супеши пылеватые	Q	34,50	1,76	1,31	2,72	1,07	22,00	39,00	17,00	4,52	28,3	7,0	-	-	-
Пески от пылеватых до мелких	Q	27,00	1,94	1,53	2,73	0,79	-	-	-	-	-	-	-	34	12,4
Суглинки и глины тугопластичные	Q	27,00	2,00	1,58	2,68	0,70	25,67	50,00	24,33	12,07	116,6	-	198,0	-	-
Ракушечный грунт	Q	115,00	1,97	0,92	2,79	2,04	-	-	-	-	-	-	-	37	17,0
Глины от тугопластичных до полутвердых	Pg	31,52	1,89	1,44	2,68	0,86	28,82	62,30	33,48	21,47	114,3	87,0	121,8	-	-
Глины от твердых до полутвердых	Pg	24,28	2,02	1,63	2,68	0,65	29,50	82,00	52,50	40,88	112,7	-	292,8	-	-
Аргиллиты	Pg	17,73	2,09	1,78	2,73	0,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W — природная влажность грунта; ρ — плотность грунта; ρ_d — плотность сухого грунта; ρ_s — плотность частиц грунта; e — коэффициент пористости; PL — предел пластичности Аттерберга (нижний предел пластичности, граница раскатывания) по ASTM D4318; LL — предел текучести Аттерберга (верхний предел пластичности) по ASTM D4318; PI — число (коэффициент) пластичности по ASTM D4318; I_p — число пластичности по ГОСТ 25100-95 (рассчитанное по эмпирической зависимости из работы [10]); c_{TV} , c_{LV} , c_{UV} — недренированное удельное сцепление, определенное с помощью испытаний микрокрыльчаткой, лабораторной крыльчаткой и трехосных испытаний по неконсолидированно-недренированной схеме соответственно; ϕ , c — параметры прочности (угол внутреннего трения и удельное сцепление соответственно), определенные при трехосном сжатии.



Максимальная вскрытая мощность этих отложений составила 19 м.

Суглинки и глины тугопластичные в основном покрывают континентальный склон и в местах расположения некоторых станций опробования и скважинах замещаются глинистыми конгломератами (галькой тугопластичной глины и аргиллита в глинистом матриксе). Также в этих отложениях встречаются редкие и тонкие прослои песка и битой ракуши. Конгломераты указывают на оползневой генезис этих отложений [1], а тонкие прослои песка и битой ракуши (мощностью до 10 см) свидетельствуют о периодическом возникновении в прошлом подводных гравитационных потоков на данном участке. Эти грунты являются крайне неоднородными, их свойства в пределах указанного слоя могут изменяться в широких пределах и имеют случайный характер. Свойства обломков различного размера и состава существенно отличаются от свойств глинистого матрикса. Суглинки и глины тугопластичные характеризуются низкой влажностью (в среднем 27%), сравнительно высокой плотностью (в среднем 2 г/см³) и высоким недренированным сцеплением c_{TV} по результатам определений с помощью микрокрыльчатки (116,6 КПа).

Ракушечные грунты встречены в юго-восточной части рассматриваемого участка. Эти отложения залегают в области шельфа и бровки континентального склона непосредственно на породах терригенного флиша, а также перекрывают толщу песков. В большинстве случаев они представляют собой битую ракушу. Вследствие сложностей, связанных с определением физических и физико-механических свойств таких грунтов, они оказались неопробованными, поэтому в расчетах устойчивости склонов были использованы характеристики аналогичных грунтов, полученные для района Кавказского шельфа Черного моря, расположенного к юго-востоку от рассматриваемого участка [5].

Пески мелкие и пылеватые встречены в области шельфа и бровки континентального склона в юго-западной части рассматриваемого участка. Они формируют погребенную аккумулятивную форму, напоминающую бар или банку. Среднее значение их влажности составляет 27%. Эти пески характеризуются высоким содержанием карбонатов (в среднем 67%). В расчетах устойчивости склонов для данных грунтов также использовались физико-механические характеристики, определенные для песков из смежного района Черного моря.

Супеси пылеватые локально распространены на рассматриваемом участке и приурочены к аккумулятивному песчаному телу, расположенному в области шельфа в юго-западной части участка. Они характеризуются консистенцией от текучей до пластичной.

Глины от текучепластичных до мягкопластичных широко распространены как в области шельфа, так и на континентальном склоне. В области континентального склона эти отложения характеризуются оползневым генезисом. В них встречаются обломки полускальных пород, тугопластичных и полутвердых глин различной степени окатанности, редко можно обнаружить тонкие прослои битой ракуши и песка. Среднее значение влажности этих глин составляет 44,2%. Их среднее сопротивление недренированному сдвигу c_{LV} по результатам определения лабораторной крыльчаткой равно 21,5 КПа.

Илы глинистые почти сплошным чехлом покрывают всю территорию рассматриваемого участка. Они характеризуются высокой влажностью (в среднем 56,9%), низкой плотностью (в среднем 1,63 г/см³), средним коэффициентом пористости (1,59), содержанием органического вещества 5,3% и карбонатов 29,8%.

Илы глинистые газонасыщенные имеют небольшую мощность (максимум 2,7 м), но широко распространены как в области шельфа, так и на континентальном склоне. Они характеризуются аномально высокой влажностью (в среднем 108,2%), низкой плотностью (1,41 г/см³), высоким коэффициентом пористости (2,97) и низким сопротивлением недренированному сдвигу c_{LV} по результатам определения лабораторной крыльчаткой (4,5 КПа).

Среди опасных геологических и инженерно-геологических процессов на исследуемом участке следует отметить сейсмические (поскольку рассматриваемая территория является высокосейсмичной) и оползневые (предположительно).

Методика расчета устойчивости подводных склонов

В настоящей работе расчет устойчивости подводных склонов проводился на одномерных и двухмерных моделях с использованием методов предельного равновесия. В основе этих методов лежит расчет коэффициента устойчивости (запаса) вдоль поверхности скольжения.

Коэффициент устойчивости K_y представляет собой либо отношение суммы удерживающих оползневое тело сил ($\sum F_{res}$) к сумме сдвигающих его сил (F_{mob}), либо отношение сумм моментов этих сил ($\sum M_{res}$ и $\sum M_{mob}$ соответственно) [7]:

$$K_y = \frac{\sum F_{res}}{\sum F_{mob}} = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{mob}}. \quad (1)$$

Использованная методика расчета предполагала, что при значении коэффициента устойчивости 1,2 склон находится в состоянии предельного равновесия.

В случае решения двухмерной задачи в момент предельного равновесия должно выполняться следующее основное условие: тело находится в равновесии только в том случае, если суммы проекций всех действующих на него сил на любую ось (горизонтальную или вертикальную) и сумма моментов этих же сил относительно центра вращения равны нулю:

$$\sum F_H = 0; \sum F_V = 0; \sum M_0 = 0. \quad (2)$$

Большинство методов оценки устойчивости склонов основано на том, что формирование оползня на склоне происходит в результате смещения грунтов по поверхности скольжения в соответствии с теорией прочности Кулона — Мора.

В процессе расчета оползневое тело делится на фрагменты, которые снизу ограничены поверхностью скольжения (или сдвига), сверху — дневной поверхностью, а справа и слева — вертикальными плоскостями (или отрезками в случае плоской задачи).

В момент предельного равновесия вдоль поверхности скольжения действует зависимость:

$$s = \sigma' f' \cdot \operatorname{tg} \varphi' + c', \quad (3)$$

где s — сопротивление грунта сдвигу, КПа; c' — удельное сцепление, КПа; — эффективный угол внутреннего трения, град.; — эффективное нормальное напряжение на поверхности скольжения во время обрушения, КПа.

Вертикальные фрагменты, составляющие оползневое тело, взаимодействуют между собой: со стороны фрагмента, расположенного выше, рассматриваемый фрагмент испытывает давление, а со стороны расположенного ниже он встречает сопротивление. Величины и направления сил взаимодействия между фрагментами неизвестны, поэтому в каждом методе величины этих сил определяются различными способами.

В настоящей работе для расчета устойчивости склонов были выбраны метод Терцаги и метод общего предельного равновесия (метод GLE — General Limit Equilibrium).

При использовании *метода Терцаги* оползневое тело разбивается на вертикальные фрагменты, а равнодействующая сил взаимодействия каждого фрагмента с двумя соседними направлена по касательной к круглоцилиндрической поверхности скольжения.

При расчете коэффициента устойчивости склона K_y (безразмерн.) для статических условий по методу Терцаги было использовано следующее соотношение:

$$K_y = \frac{c \cdot \beta + p' \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{p' \cdot \sin \alpha}, \quad (4)$$

где K_y — коэффициент устойчивости склона, — вес фрагмента, взвешенного в воде, Н; β — длина основания фрагмента, м; α — уклон основания фрагмента, град.; φ — угол внутреннего трения грунта, град.; c — удельное сцепление грунта, Па.

При учете сейсмического воздействия (о котором будет рассказано ниже) формула для расчета K_y выглядит следующим образом:

$$K_y = \frac{c \cdot \beta + (p' + k_v \cdot p) \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{(p' + k_v \cdot p) \cdot \sin \alpha + k_h \cdot p \cdot \cos \alpha}, \quad (5)$$

где — вес фрагмента при природной влажности грунта, Н; k_h — безразмерный коэффициент сейсмичности для горизонтального сейсмического ускорения; k_v — безразмерный коэффициент сейсмичности для вертикального сейсмического ускорения.

В настоящей работе метод Терцаги вследствие его простоты был применен при проведении одномерного расчета устойчивости в программе Microsoft Office Excel. Одномерный расчет предполагает, что поверхность скольжения параллельна поверхности модельного склона и что вместо реальных инженерно-геологических разрезов при оценке устойчивости используются модельные разрезы. Использование последних может быть оправданным, если значения длины и ширины оползня превышают его мощность на несколько порядков, вследствие чего модельный разрез можно рассматривать как бесконечный. При таком подходе можно оценивать устойчивость не всего оползневое тело, а только одного его фрагмента, опирающегося на основание единичной длины. Использование одномер-

ной схемы может быть оправданным также при проведении поверочных расчетов.

При использовании компьютерной техники одномерный расчет не является трудоемким и позволяет оценивать устойчивость при изменении значений отдельных параметров. В данной работе он был выполнен при различных значениях крутизны модельного склона, мощности смещаемых отложений и сейсмических коэффициентов.

Минимальная мощность сползающих отложений на модельных разрезах составила 1 м, а максимальная — 20 м, что соответствует минимальному и максимальному значениям мощности рыхлых отложений по данным сейсмического профилирования на рассматриваемом участке Кавказского шельфа. Уклоны модельных склонов находились в диапазоне от 1° (среднего уклона шельфа) до 40° (максимального уклона в области бровки континентального склона).

При использовании *метода GLE* должны соблюдаться условия как равновесия моментов, так и равновесия сил. Это означает, что для расчета коэффициента устойчивости склона используются два соотношения — удовлетворяющее равновесию сил и удовлетворяющее равновесию моментов. В методах предельного равновесия эта задача является статически определенной для каждого отдельного фрагмента, однако в отношении сил, действующих на границах фрагментов, возникает необходимость в принятии допущений. Решение задачи об устойчивости склона в целом методами предельного равновесия является статически неопределенным и, чтобы «замкнуть» систему уравнений и определить направление результирующей силы взаимодействия между фрагментами, в методе GLE вводится соотношение, предложенное Моргенштерном и Прайсом [24]:

$$F_N = F_t \lambda f(x), \quad (6)$$

где F_t — касательные составляющие сил взаимодействия, Н; F_N — нормальные составляющие сил взаимодействия, Н; $f(x)$ — функциональная зависимость между F_t и F_N ; λ — доля используемой функции, д. ед.

Вид $f(x)$ может быть различным. В настоящей работе была выбрана полусинусоидальная зависимость. Применение уравнения (6) делает задачу расчета устойчивости склона по методу GLE статически определенной.

Последние исследования И.К. Фоменко [17] показывают, что метод GLE отличается высокой точностью и результаты оценки устойчивости по нему сопоставимы с итогами расчета методом конечных элементов.

Метод GLE использовался в данной работе при проведении двухмерного расчета с использованием инженерно-геологических разрезов в программах SLOPE/W 2007 и Slide.

Построение расчетной схемы устойчивости подводных склонов и определение прочностных свойств грунтов

Под водой большинство грунтов (особенно дисперсных) находится в состоянии полного водонасыщения, поэтому при расчетах устойчивости подводных склонов

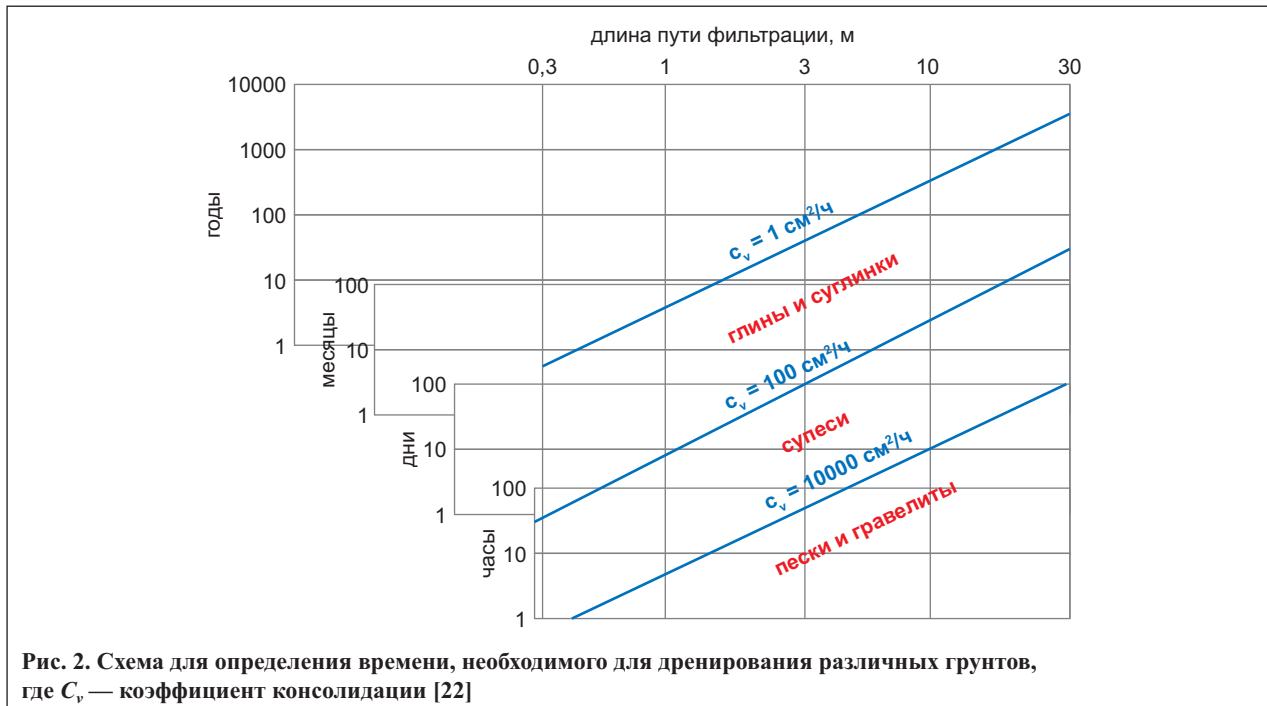


Рис. 2. Схема для определения времени, необходимого для дренирования различных грунтов, где C_v — коэффициент консолидации [22]

важно определить, в каких условиях находится массив грунта — дренированных или недренированных.

Если нагрузка на грунт передается медленно или прошло значительное время после ее изменения, отток поровой воды из массива в окружающее пространство будет обеспечен и условия будут дренированными. В этом случае поровое давление не будет отличаться от гидростатического и нагрузка на грунт будет восприниматься только через его скелет. Следовательно, поведение грунта будет описываться прочностными характеристиками, определенными через эффективные напряжения.

При кратковременном нагружении массива грунта отток из него воды будет затруднен, вследствие чего поровое давление возрастет и будет отличаться от гидростатического. Такие условия можно считать недренированными. В этом случае нагрузка на грунт будет передаваться не только через его скелет, но и через поровую воду. Вследствие этого для расчета устойчивости в недренированных условиях необходимо использовать прочностные параметры, определенные через полные напряжения.

Дренирование массива зависит в первую очередь от времени, во вторую — от фильтрационных характеристик слагающих его грунтов и, наконец, от его размеров. Время, необходимое для перехода от недренированных условий к дренированным, для различных типов грунтов можно оценить по диаграмме, представленной на рис. 2.

В зависимости от условий (дренированных или недренированных) для анализа устойчивости подводных склонов может быть использовано три подхода, то есть проведение расчетов тремя путями: (1) через эффективные напряжения; (2) через полные напряжения; (3) с использованием недренированного сцепления (последний подход представляет собой разновидность расчета через полные напряжения при наличии в разрезе глинистых грунтов) [18].

В распоряжении авторов настоящей статьи из прочностных характеристик были только значения недренированного сцепления глинистых грунтов, то есть

расчетная схема предполагала недренированные условия. Вследствие того что рассматриваемый район является сейсмически активным и массивы грунтов в его пределах находятся под периодическим воздействием сейсмических нагрузок, выполнение расчета в недренированных условиях является обоснованным.

Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов

Расчет устойчивости склонов с использованием как одномерных, так и двумерных моделей проводился с учетом сейсмического воздействия. Во время землетрясения возникают инерционные силы, которые действуют в горизонтальном и вертикальном направлениях и приложены к центру масс каждого отсека. Инерционные силы могут быть определены следующим образом:

$$F_h = \frac{a_h}{g} \cdot p = k_h \cdot p; \quad (7)$$

$$F_v = \frac{a_v}{g} \cdot p = k_v \cdot p; \quad (8)$$

где F_h — инерционная сила в горизонтальном направлении, Н; F_v — инерционная сила в вертикальном направлении, Н; a_h — горизонтальное сейсмическое ускорение, м/с²; a_v — вертикальное сейсмическое ускорение, м/с²; g — ускорение свободного падения, м/с².

Следовательно, для расчетов устойчивости склонов при сейсмических воздействиях в качестве исходных данных необходимо знать пиковые сейсмические ускорения, характерные для исследуемой территории [26].

Для расчета коэффициентов k_h и k_v использовался подход, изложенный в Еврокоде [25]:

$$k_h = 0,5 \cdot k_s \cdot \frac{a_g}{g} = 0,5 \cdot 1,6 \cdot \frac{a_g}{g}; \quad (9)$$

Таблица 2

Значения ускорений и коэффициентов сейсмичности, использованные в расчетах устойчивости склонов				
Характеристика	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
	7	8	9	10
Сейсмическое ускорение, выбранное для расчетов (проектное), m/c^2	1	3	4	8
Коэффициент сейсмичности k_h	0,09	0,27	0,36	0,72
Коэффициент сейсмичности k_v	0,0297	0,0891	0,1188	0,2376
	-0,0297	-0,0891	-0,1188	-0,2376

$$k_v = \pm 0,33 \cdot k_h \quad (10)$$

где a_g — ускорение для 2-й категории грунтов по сейсмическим свойствам, m/c^2 [15]; k_s — коэффициент, зависящий от типа грунта (для морских дисперсных грунтов $k_s = 1,6$ [23]).

В российской практике сейсмического микрорайонирования используется не количественная оценка интенсивности землетрясений (в ускорениях), а качественная (в баллах по шкале MSK-64). Согласно СНиП II-7-81* [14] для рассматриваемого в данной статье участка характерны следующие значения интенсивности по шкале MSK-64: 8 баллов при периоде повторяемости сотрясений $T = 500$ лет; 9 баллов при $T = 1000$ лет; 10 баллов при $T = 5000$ лет. Поэтому расчет устойчивости был выполнен авторами для сейсмических сотрясений силой от 7 до 10 баллов.

Так как для расчета необходимы величины интенсивности не в баллах, а в ускорениях, для перехода были использованы данные, представленные в СНиП 2.05.06-85* [15]. Землетрясениям интенсивностью 7, 9 и 10 баллов соответствуют сейсмические ускорения 100, 400 и 800 cm/c^2 соответственно. Согласно работе [20] для рассматриваемого участка характерны ускорения в интервале 0,2–0,3g (m/c^2) при $T = 500$ лет (что соответствует интенсивности 8 баллов). Придерживаясь консервативного подхода, авторы выбрали большее (0,3g, m/c^2) значение ускорения.

Таким образом, были получены значения ускорений и коэффициентов сейсмичности в вертикальном и горизонтальном направлениях (табл. 2), которые в дальнейшем использовались в расчетах устойчивости склонов.

Результаты расчетов устойчивости

Как упоминалось выше, для рассматриваемого участка из прочностных характеристик в распоряжении авторов статьи были только значения недренированного сцепления глинистых грунтов, поэтому одномерный расчет был выполнен только для глинистых грунтов с недренированным сцеплением.

Одномерные модели

Результаты одномерных расчетов показывают, что наименее устойчивыми являются отложения, представленные *слабыми глинистыми газонасыщенными*. Если обратиться к инженерно-геологическим разрезам рассматриваемого участка, можно заметить, что эти

отложения залегают на поверхности и их мощность не превышает 1,9 м.

Согласно результатам расчетов при мощности илов глинистых газонасыщенных, равной 2 м, массив, сложенный данными грунтами, будет находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне склона 26° . Это означает, что в области континентального склона, где значения уклона превышают 30° , эти отложения будут неустойчивыми. Можно предположить, что глинистые газонасыщенные илы могут залежать лишь в области шельфа и на участках континентального склона с уклонами менее 26° , а на участках с большими уклонами они будут отсутствовать. По результатам расчетов при сейсмическом воздействии интенсивностью 7 баллов при мощности слоя этих отложений 2 м они будут находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне 7° , что соответствует уклону в области бровки континентального склона. При землетрясениях интенсивностью более 7 баллов они будут неустойчивыми при любых уклонах.

Глинистые илы являются на изучаемой территории наиболее распространенными отложениями. Их мощность на рассматриваемом участке может достигать 11,5 м. При их толщине 2, 5, 10 и 20 м массив будет находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне 29, 11, 5 и 2° соответственно (рис. 3). Результаты расчетов показывают, что в статических условиях эти отложения в северной части участка, где они имеют максимальную мощность, находятся в состоянии предельного равновесия еще в области шельфа. В области же бровки и самого континентального склона они неустойчивы (в противном случае их мощность незначительна, то есть ≤ 1 м). В других зонах исследуемого участка, где глинистый ил имеет меньшую мощность, он, так же как и глинистый газонасыщенный ил, может залежать стабильно в области шельфа и на относительно пологих участках континентального склона, причем в области склона толщина его слоя не может превышать 5 м.

При расчете с учетом сейсмического воздействия при интенсивности землетрясения 10 баллов во всем диапазоне расчетных значений мощности и уклона данные отложения являются неустойчивыми. При землетрясениях интенсивностью 7 (рис. 4), 8 и 9 баллов при небольшой мощности отложений (2 м, редко 1 м) модельные склоны находятся в состоянии, близком к предельному равновесию, как на шельфе, так на континентальном склоне. При большей мощности эти грунты неустойчивы.

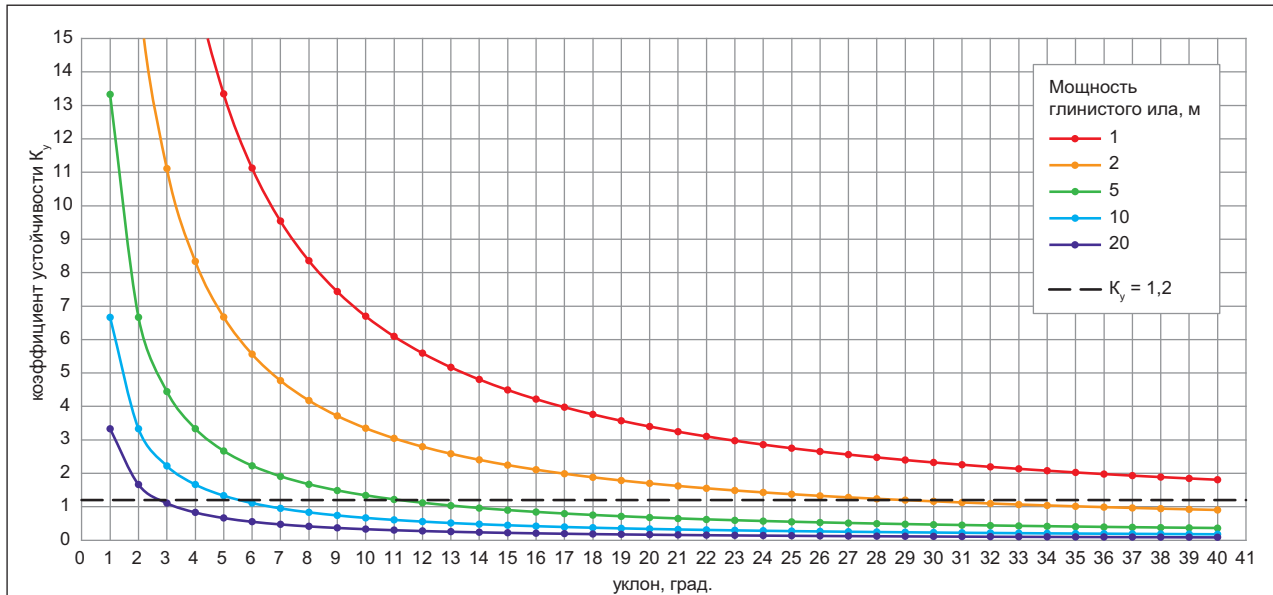


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента устойчивости K_y от уклона для модельных склонов, сложенных глинистыми илами с глубиной расположения поверхности скольжения 1, 2, 5, 10 и 20 м при расчетах с недренированным сцеплением

Глины от текучепластичных до мягкопластичных являются более устойчивыми по сравнению с отложениями, рассмотренными выше. Их мощность на изучаемом участке превышает 4,5 м. Подошва сложенного этими грунтами слоя, вскрытая скважиной в северной части участка, расположена на глубине 16 м, поэтому при анализе результатов расчета устойчивости необходимо учитывать мощность смещаемых отложений приближающуюся к этому значению. Одномерный расчет устойчивости показывает, что при толщине 1 и 2 м они будут устойчивыми во всем диапазоне расчетных значений уклона. При мощности 5, 10 и 20 м предельное равновесие этих отложений достигается при уклоне 34, 16 и 8° соответственно. В статических условиях глины от текучепластичных до мягкопластичных могут находиться в устойчивом состоянии в области шельфа. На бровке и на континентальном склоне они устойчивы при мощности порядка 10 м и меньше. Расчет с учетом сейсмического воздействия показывает, что при сейсмических нагрузках

интенсивностью 9 и 10 баллов эти отложения неустойчивы при мощности 2, 5, 10 и 20 м, а при толщине 1 м (редко 2 м) они находятся в состоянии предельного равновесия.

Для супесей пылеватых на рассматриваемом участке характерна мощность не более 3 м. Однако данные грунты могут слагать самую нижнюю часть разреза четвертичных отложений. Они наблюдаются в основном в области шельфа и бровки континентального склона. Подошва слоя этих отложений находится на глубине 19 м и более. В статических условиях при мощности 1 и 2 м они находятся в устойчивом состоянии во всем диапазоне уклонов. При мощности 5, 10 и 20 м они находятся в состоянии предельного равновесия при уклоне 35, 16 и 8° соответственно. Эти результаты означают, что в северной части участка в области бровки континентального склона, где уклоны начинают приближаться к 8°, массив четвертичных отложений находится в состоянии, близком к предельному равновесию. В южной части участка супесчаные отложения

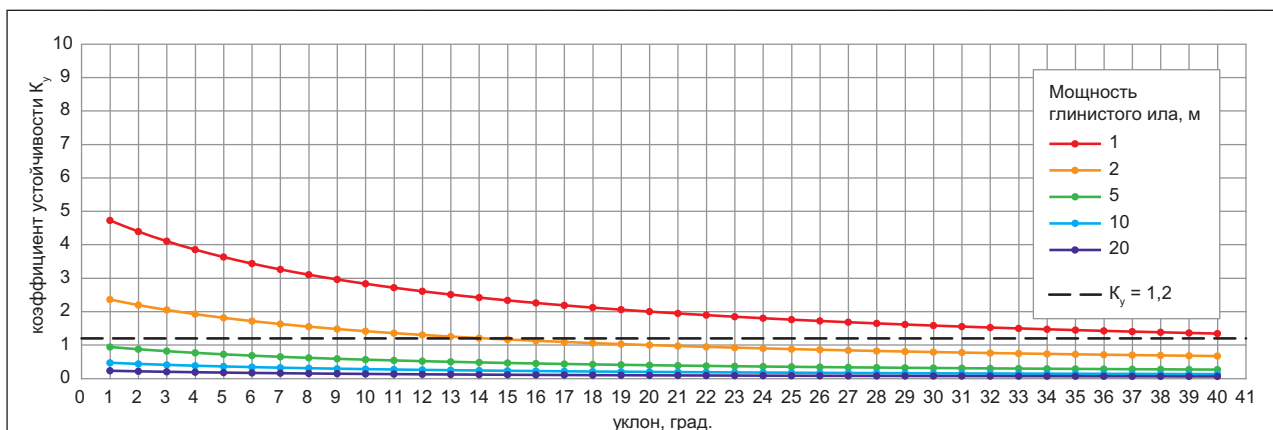
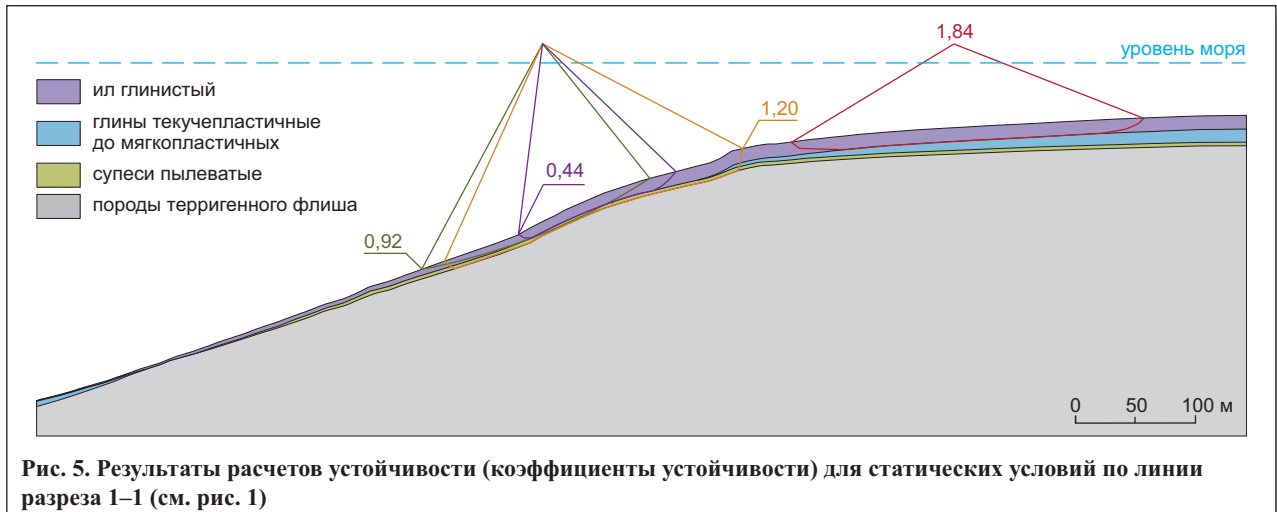


Рис. 4. График зависимости коэффициента устойчивости K_y от уклона для модельных склонов, сложенных глинистыми илами с глубиной расположения поверхности скольжения 1, 2, 5, 10 и 20 м при расчетах с недренированным сцеплением с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов при положительном значении коэффициента сейсмичности для вертикального сейсмического ускорения



залегают только в области шельфа и на небольших глубинах, поэтому находятся в устойчивом состоянии.

По результатам расчетов с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 и 10 баллов, данные отложения являются неустойчивыми при мощности 2–20 м. При толщине 1 м (редко 2 м) они находятся в состоянии, близком к предельному равновесию. При интенсивности сотрясений 7 и 8 баллов при мощности 1 и 2 м данные отложения устойчивы, при толщине 5 и 10 м они находятся в состоянии, близком к предельному равновесию, а при 20 м являются неустойчивыми. При сейсмических нагрузках даже в южной части участка, где эти грунты залегают на глубине порядка 10 м, их можно рассматривать как потенциально оползнеопасные.

Суглинки и глины тугопластичные распространены только в области континентального склона при глубине расположения подошвы слоя около 6,5 м. В статических условиях для расчетных интервалов значений уклона и мощности эти отложения неустойчивы лишь при мощности 20 м и при уклоне, превышающем 30°. Анализ с учетом сейсмического воздействия показывает, что при мощности 1, 2 и даже 5 м они устойчивы. При этом в условиях рассматриваемого участка данные отложения находятся в состоянии предельного равновесия (или являются неустойчивыми) только при интенсивности сейсмического воздействия выше 8 баллов.

Двухмерные модели

Основой для расчетов устойчивости с использованием двухмерных моделей являлись инженерно-геологические разрезы, совпадающие с профилями, описание которых представлено выше. Для расчетов использовались нормативные характеристики грунтов, полученные в результате статистической обработки. Анализ устойчивости на двухмерных моделях, так же как одномерный, выполнялся для статических условий и с учетом сейсмического воздействия.

Напомним, что согласно результатам одномерного расчета формирование оползней возможно в отложениях и континентального склона, и шельфа. В ходе же проведения двухмерного анализа были обнаружены существенные различия в их устойчивости. Для получения полноценного представления об устойчивости рассматриваемых подводных склонов оценка устойчи-

вости шельфа и континентального склона должна проводиться раздельно.

Расчеты для статических условий

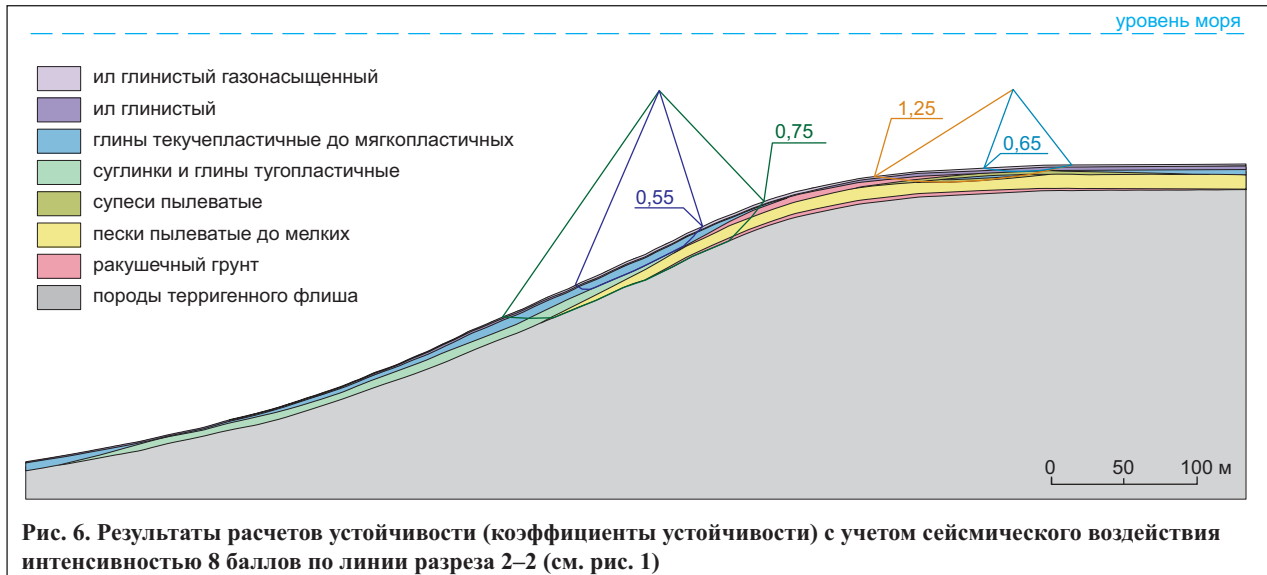
По результатам расчетов по недренированной схеме для статических условий область шельфа находится в устойчивом состоянии. Минимальные коэффициенты устойчивости приурочены к отложениям, представленным илом глинистым и илом глинистым газонасыщенным. Поверхность предполагаемого смещения для них имеет $K_s = 1,84$ (рис. 5), что свидетельствует об устойчивом положении массива.

В области континентального склона формирование оползней может быть связано с илами, глинами от текучепластичных до мягкопластичных и пылеватыми супесями. Необходимо отметить, что поверхности предполагаемого смещения, находящиеся в илах, характеризуются крайне низкими значениями коэффициента устойчивости (минимальное из них составляет 0,44). Это может свидетельствовать о невозможности нахождения этих отложений на наиболее крутых участках континентального склона.

Поверхности предполагаемого смещения, находящиеся в супесчаных отложениях (по линии разреза 1–1) (см. рис. 1), характеризуются коэффициентами устойчивости 0,92 и выше. При этом данные поверхности очерчивают снизу тела толщиной около 12 м и протяженностью до 190 м. Поверхности же, характеризующиеся состоянием предельного равновесия в этих грунтах ($K_s = 1,2$), формируют тела протяженностью до 250 м и захватывают полную мощность четвертичных отложений в области континентального склона.

Формирование на континентальном склоне в статических условиях оползней в отложениях, представленных глинами от текучепластичных до мягкопластичных, суглинками и глинами тугопластичными, а также песчаными и ракушечными грунтами, практически невозможно вследствие высоких значений коэффициентов устойчивости поверхностей смещения, находящихся в этих отложениях.

По результатам расчетов для статических условий можно сделать следующие выводы: шельф находится в устойчивом состоянии, а в области склона поверхность скольжения будет заключена в отложениях, представленных илом глинистым и илом глинистым газо-



насыщенным. Формирование оползней в консолидированных отложениях (за исключением супесчаных) маловероятно вследствие высокой прочности последних.

Расчеты с учетом сейсмических воздействий

Результаты оценки устойчивости подводных склонов с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов показывают, что поверхности предполагаемых смещений *вдоль профиля 1–1* (см. рис. 1) как на шельфе, так и на континентальном склоне характеризуются низкими коэффициентами устойчивости.

На *шельфе* поверхность предполагаемого смещения с минимальным значением коэффициента устойчивости (0,4) заключена в илах глинистых и залегает на глубине порядка 10–12 м. Возможно возникновение оползней и в отложениях, залегающих ниже, — супесях и глинах от текучепластичных до мягкопластичных. В таком случае неустойчивым будет весь массив рыхлых отложений. При этом согласно результатам расчетов возможно возникновение оползневых тел протяженностью до 280 м и мощностью до 20 м, характеризующихся коэффициентами устойчивости около 0,8.

Отложения, залегающие на протяжении всего *континентального склона* в северной части рассматриваемого участка, при сейсмических нагрузках 7 баллов и выше будут неустойчивыми. При этом следует ожидать массового проявления оползней, захватывающих рыхлые отложения на полную мощность.

Для профиля, расположенного на *юго-востоке* рассматриваемого участка (по линии *разреза 2–2*) (см. рис. 1), характерно устойчивое состояние отложений на шельфе даже при сейсмической нагрузке интенсивностью 7 баллов и неустойчивое на континентальном склоне при нагрузке 7 баллов и выше.

В области *шельфа* поверхность с минимальным коэффициентом устойчивости (1,4) находится в илах. При сейсмической нагрузке 8 баллов можно наблюдать множество поверхностей скольжения с коэффициентом устойчивости ниже 1,2 (при минимальном $K_y = 0,65$) в илах и супесях. При этом песчаные грунты являются устойчивыми. Песчаные и ракушечные отложения становятся неустойчивыми при сейсмических нагрузках 9 баллов и выше — согласно результатам расчетов возможно формирование оползневых тел протяженностью

до 170 м, захватывающих четвертичные отложения на полную мощность (около 19 м).

В *юго-восточной* части участка в области континентального склона глинистые разновидности грунтов являются неустойчивыми при сейсмических нагрузках 7 баллов и выше. Основным деформируемым горизонтом являются глины от текучепластичных до мягкопластичных. Суглинки и глины тугопластичные, а также песчаные грунты при 7-балльных нагрузках находятся в устойчивом состоянии. Песчаные и глинистые грунты тугопластичной консистенции теряют устойчивость при 8 баллах и выше (поверхность предполагаемого смещения в этих отложениях с минимальным коэффициентом устойчивости 0,75 очерчивает тело протяженностью около 180 м и мощностью примерно 18 м) (рис. 6).

При моделировании нагрузок от землетрясений интенсивностью 9 и 10 баллов следует, что на рассматриваемом участке возможно формирование оползневых тел протяженностью более 180 м.

Таким образом, сейсмическая нагрузка интенсивностью 8 баллов для песчаных отложений и глинистых грунтов тугопластичной консистенции является критической.

Выводы

Необходимость исследования оползней на подводных склонах Черного моря продиктована той опасностью, которую они представляют для линейных сооружений.

Природные условия рассмотренного в статье участка свидетельствуют о возможном развитии здесь подводных оползневых процессов. По данным бурения и опробования в разрезе встречаются глинистые конгломераты, тонкие прослои битой ракушки и песка, которые указывают на периодическое возникновение в прошлом подводных гравитационных потоков.

Наиболее важным вопросом исследования является оценка устойчивости Кавказского шельфа Черного моря. Из факторов, способных повлиять на устойчивость склона на рассматриваемом участке, следует выделить возможные сейсмические воздействия, поскольку данная территория является высокосейсмичной.

Расчеты с использованием одномерных моделей позволили выявить разновидности грунтов, которые могут выступать в роли основных деформируемых горизонтов. Такими грунтами являются различные илы. Расчеты на двухмерных моделях позволили определить контуры оползневых тел и оценить масштабность возможного развития оползневых процессов.

Двухмерный анализ показывает, что в статических условиях область шельфа находится в устойчивом состоянии, а в области континентального склона возможно формирование оползней в отложениях, представленных илами и супесями.

Из результатов расчетов с учетом сейсмических воздействий следует, что существуют принципиальные различия в устойчивости массивов, сложенных

только глинистыми грунтами и сложенных преимущественно песчаными отложениями. Так, разрез в северной части участка, сложенный глинистыми разновидностями грунтов, теряет устойчивость при 7-балльных нагрузках. Для разреза в юго-восточной части, представленного преимущественно песчаными грунтами, критическое значение интенсивности землетрясения составляет 8 баллов.

При проектировании подводных сооружений в области внешнего шельфа, бровки и континентального склона восточного сектора Черного моря необходимо учитывать возможное влияние подводных гравитационных процессов, которые могут формироваться даже при незначительных воздействиях на массивы грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельский А.Д.* Оползание осадков на дне Черного моря и геологическое значение этого явления // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1930. Т. 8. Вып. 1-2. С. 32–80.
2. Роджерс Д. Богатства Черного моря // Нефть и газ. 2010. № 11. С. 94–99.
3. *Болдырев Г.Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
4. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Минстрой России, МНТКС, 1996.
5. *Ионов В.Ю., Калинин Э.В.* Оползни на Кавказском шельфе Черного моря и оценка их устойчивости // Концептуальные проблемы литологических исследований в России: материалы 6-го Всероссийского литологического совещания, Казань, 26-30 сентября 2011 г. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2011. Т. 1. С. 351–354.
6. *Казанцев Р.А., Кругляков В.В.* Гигантский оползень на дне Черного моря // Природа. 1998. № 10. С. 86–87.
7. *Калинин Э.В.* Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. 246 с.
8. *Лобковский Л.И., Гарагаиш И.А.* Математический анализ устойчивости Кавказского склона Черного моря и развитие оползневых процессов при землетрясениях // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 390–402.
9. *Локтев А.С.* Методические основы инженерно-геологических изысканий для нефтегазопромысловых сооружений на шельфе арктических морей: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 256 с.
10. *Москаленко В.Н., Шимкус К.М.* Оползневые образования и отложения турбидитовых потоков на Кавказском материковом склоне Черного моря // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 2005. Т. 80. Вып. 6. С. 33–38.
11. *Сафьянов Г.А.* Взаимодействия подводных каньонов и береговой зоны океана // Комплексные исследования природы океана. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 7. С. 23–27.
12. *Сафьянов Г.А., Менишиков В.Л., Пешков В.М.* Подводные каньоны — их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 197 с.
13. *Сафьянов Г.А., Пыхов Н.В.* Геоморфология, осадки и литодинамика конуса выноса ингурского подводного каньона (Черное море) // Литодинамика и гидродинамика контактной зоны океана. М.: Наука, 1981. С. 78–91.
14. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2000. 44 с.
15. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой России, 1997.
16. *Фоменко И.К., Захаров В.С., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н.* Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона) // Геориск. 2009. № 4. С. 50–55.
17. *Фоменко И.К., Сироткина О.Н.* Современные тенденции в расчете устойчивости склонов // Инженерные изыскания в строительстве: материалы 7-й общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2011. С. 78–81.
18. *Хуан Я.Х.* Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1983.
19. *Чугаев Р.Р.* Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига грунта. М.-Л.: Энергия, 1964. 178 с.
20. *Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T. et al.* Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // Annali Geofis. 1999. V. 42. P. 1139–1151.
21. BSI BS 1377-2. EN-Methods of test for soils for civil engineering purposes Part 2. Classification tests. London, UK: British Standards Institution, 1990.
22. *Duncan J.M., Wright S.G.* Soil strength and slope stability. New Jersey: Wiley, 2005.
23. EN 1998-1:2004 (E). Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. UK: British Standards Institution, 2004.
24. *Morgenstern N.R., Price V.E.* The analysis of the stability of general slip surfaces // Geotechnique. 1965. V. 15. P. 70–93.
25. prEN 1998-5:2003 (E). Eurocode 8/ Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. UK: British Standards Institution, 2003.
26. Stability modeling with SLOPE/W 2007 version. An engineering methodology. Fourth edition. Canada: GEO-SLOPE International Ltd., 2008. P. 355.