

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 6 / 2025, Vol. 17, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/24NZVN625.pdf>

DOI: 10.15862/24NZVN625 (<https://doi.org/10.15862/24NZVN625>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кропоткин, М. П. Уточнение оценки влияния сейсмических воздействий на устойчивость склоновых массивов — подходы и возникающие проблемы / М. П. Кропоткин, Д. И. Вовкогон // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/24NZVN625.pdf>. DOI: 10.15862/24NZVN625.

For citation:

Kropotkin M.P., Vovkogon D.I. Refining the assessment of seismic effects on slope stability — approaches and emerging issues. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(6): 24NZVN625. Available at: <https://esj.today/PDF/24NZVN625.pdf>. DOI: 10.15862/24NZVN625. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.131.543(537):550.347.097.23

Кропоткин Михаил Петрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Институт гидротехнического и энергетического строительства
Доцент кафедры «Инженерных изысканий и геоэкологии»
Кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: Singeos@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1039973

Вовкогон Дмитрий Игоревич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Институт гидротехнического и энергетического строительства
Аспирант кафедры «Инженерных изысканий и геоэкологии»
Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, Москва, Россия
Главный специалист
E-mail: Dmitry.vovkogon@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1266370

**Уточнение оценки влияния сейсмических
воздействий на устойчивость склоновых массивов —
подходы и возникающие проблемы**

Аннотация. На сегодняшний день в отечественной и зарубежной практике проектирования зданий и сооружений для оценки устойчивости склонов и откосов в условиях сейсмического воздействия преимущественно используется псевдостатистический анализ. Однако, действующие отечественные и зарубежные нормы и рекомендации демонстрируют большой разброс используемых коэффициентов, что не позволяет дать корректную оценку степени оползневой опасности. А имеющая ряд недостатков, оценка влияния рельефа согласно своду правил 269.1325800.2016 «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования», совместно с неучетом вертикальных ускорений массива и в сочетании с существенно заниженными коэффициентами сейсмичности, ведет к излишне оптимистичной оценке устойчивости склоновых массивов, что недопустимо при проектировании ответственных зданий и сооружений. В рамках исследования предложен подход, более полно учитывающий геоморфологические условия в виде

эмпирической формулой В.Б. Заалишвили, позволяющей оценить возможные приращения сейсмической интенсивности ΔJ_3 , а также вероятностный характер распределения возможных пиковых ускорений грунта при одинаковой сейсмической интенсивности, при введении в анализ вероятностной шкалы, составленной Ф.Ф. Аптикаевым. В результате проведенных сравнительных расчетов устойчивости склонового массива с применением уточненных коэффициентов сейсмичности, рассчитанных как на основе вышеуказанного подхода, так и отечественных и зарубежных нормативных документов выявлено, что предложенный подход позволяет точнее оценить потенциальную возможность возникновения оползневой защиты, и, соответственно, степень риска в том числе и после частичной реализации противооползневой защиты.

Ключевые слова: землетрясение; коэффициент сейсмичности; рельеф; склоновый массив; расчетная сейсмичность; псевдостатический метод; расчет устойчивости склона; пиковое ускорение грунта

Введение

При количественной оценке устойчивости склонов, расположенных в сейсмических районах, особое значение приобретают методы учета и параметры сейсмических воздействий. В России требования к учету данных воздействий регулируются немногочисленными нормативными документами, такими как: СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*», СП 269.1325800.2016 «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования», ОДМ 218.2.006-2010 «Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог» и др. В отечественной практике, как правило, сейсмическая нагрузка при оценке устойчивости оползнеопасных склонов учитывается на основе псевдостатического подхода. Эффект от землетрясения при этом моделируется путем введения в расчеты коэффициента сейсмичности, значение которого в нашей стране в данный период определяется по ОДМ 218.2.006-2010 (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент динамической сейсмичности μ

Сейсмическая балльность района	15	6	7	8	9	10
Коэффициент динамической сейсмичности μ	0	0,010	0,025	0,050	0,100	0,250

ОДМ 218.2.006-2010

На территории Евросоюза, где действует Eurocode 8 «Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects», предусмотрен иной подход к учету сейсмических сил. Горизонтальный коэффициент сейсмичности $K_{с,гор}$ рассчитывается как $0,5\alpha$, где α — отношение пикового ускорения грунта (PGA) к ускорению свободного падения g . В свою очередь, вертикальный коэффициент сейсмичности определяется как: $K_{с,верт} = 0,33K_{с,гор}$. В отечественных нормах учет вертикальных ускорений в расчетах не предусматривается на склонах. Для оценки сейсмических колебаний Eurocode 8 предусматривает использование топографического коэффициента усиления S_T . Данные коэффициенты усиления применяются, когда склоны длинные и имеют высоту более 30 м. Значение $S_T = 1,4$ принимается для средних углов наклона более 30° , для меньших углов наклона — $S_T = 1,2$. Однако, Eurocode 8 не вводит различий в значениях коэффициента для значительных углов наклона склона, будь то, например, 35° или 70° . Отдельно стоит отметить, что для средних углов наклона менее 15° топографическим эффектом, согласно Eurocode 8 допустимо пренебрегать.

В некоторых отечественных нормах также предусмотрен учет морфологических особенностей территории. В СП 269.1325800.2016 при сейсмическом микрорайонировании предусматривается уточнение балльности сейсмического воздействия на основе корректировки амплитуд колебаний грунта в зависимости от рельефа местности. Используется коэффициент учета рельефа местности $K_{р.м.}$, на который умножают амплитуды колебаний грунта. Для долин, врезанных в коренные породы на глубину 100 м и более, при отношении высоты бортов H к ширине долины B по верху не менее 0,5, рекомендуется принимать значение коэффициента $K_{р.м.}$ равным 0,5 для дна долины и 1,25 для верха ее бортов.

Описанные критерии и условия, определяющие значения коэффициента рельефа местности, на наш взгляд, имеют существенные недостатки (рис. 1).

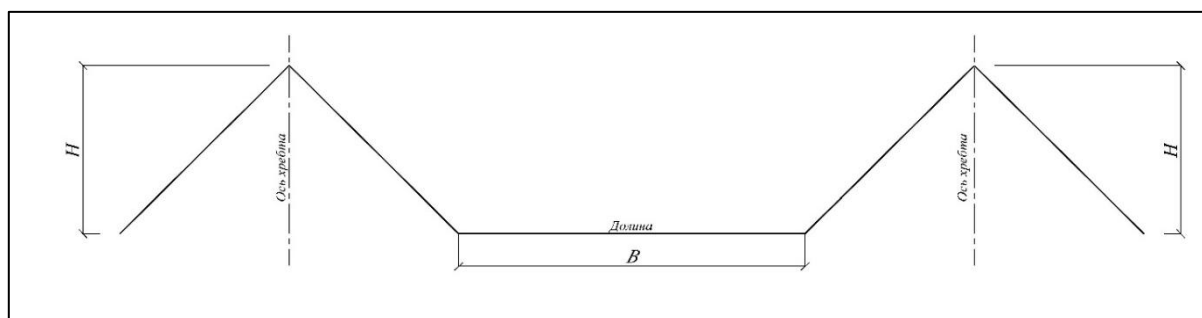


Рисунок 1. Схема горной долины (разработано авторами)

Данная поправка, во-первых, занижает сейсмичность в горных долинах — фронт продольных и поперечных сейсмических волн подходит к склоновому массиву снизу, т. е. интенсивность сейсмического воздействия не должна существенно падать. Данные рекомендации вообще не учитывают распространенные горные территории с долинами, значительно превышающими по своей ширине высоты хребтов, т. е. при соотношении $H/B < 0,5$. Во-вторых, на «коэффициент рельефа местности» прямого влияния не оказывает крутизна бортов, примыкающих к долине. В-третьих, принимается по сути, врезанность долины в «плато». Между тем, в горной местности долины чаще всего находятся между двумя хребтами, на которых наблюдается значительное топографическое усиление колебаний. По мере подхода сейсмических волн к гребню хребта происходит интенсификация горизонтальных колебаний, преимущественно, поперек его оси.

Помимо этого, область применения такого подхода ограничивается нахождением проектируемых сооружений в долине. Оползнеопасные, в том числе для сооружений в долине, участки, располагаемые на склонах, где в нижней и средней их частях «уточненная» таким способом сейсмичность, окажется ниже фоновой на равнине.

Таким образом, некорректный учет влияния рельефа, в случае применения вышеупомянутого подхода, а также неучет вертикальных ускорений массива в сочетании с существенно заниженными коэффициентами сейсмичности, установленными отечественными нормами, приводит к излишне оптимистичной оценке устойчивости склоновых массивов. Опираясь на отечественные и зарубежные нормативные документы, для одного и того же участка при одинаковой фоновой сейсмичности, можно получить коэффициенты сейсмичности, различающиеся многократно с соответствующей радикальной разницей в коэффициенте устойчивости. Значительная вариативность в оценке устойчивости склоновых массивов при сейсмических воздействиях демонстрирует потенциальную возможность неверного учета оползневой опасности во время сейсмического события.

Кроме того, следует отметить, что с применением различных подходов к определению коэффициента сейсмичности значительно меняется не только общая оценка устойчивости, но и потенциальный объем и мощность оползневого тела.

Результаты, полученные в ходе сравнительного анализа [1], продемонстрировали необходимость в разработке более совершенного метода комплексного учета сейсмического воздействия.

При оценке сейсмического воздействия необходимо также учитывать вероятностный характер распределения возможных пиковых ускорений грунта при одной и той же интенсивности землетрясения. Ф.Ф. Аптикаевым [2] на основе анализа установлены вероятности ускорений разной величины для соответствующих значений интенсивности (табл. 2).

Таблица 2

**Вероятности пиковых ускорений грунта PGA (см/с²)
при соответствующих значениях интенсивности I (баллы)**

P	Интенсивность I , баллы															
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
0,02	0,33	0,53	0,85	1,3	2,1	3,3	5,3	8,5	13	21	46	74	130	205	325	515
0,05	0,42	0,67	1,05	1,7	2,7	4,2	6,7	10,5	17	27	55	88	155	245	390	610
0,10	0,53	0,84	1,34	2,1	3,4	5,3	8,4	13,4	21	33	65	105	175	275	440	695
0,16	0,62	0,98	1,57	2,5	3,9	6,2	9,8	15,7	25	39	74	115	200	310	495	780
0,30	0,84	1,33	2,12	3,4	5,3	8,4	13,3	21,2	33	53	91	145	240	375	595	935
0,50	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28	44	70	110	175	280	440	700	1 100
0,70	1,45	2,3	3,7	5,8	9,2	14,5	23	37	58	92	130	210	330	515	820	1 290
0,84	1,96	3,1	5	7,8	12,4	19,6	31	50	78	125	165	260	395	620	990	1 550
0,90	2,3	3,7	5,9	9,2	14,8	23	37	59	92	145	185	295	445	695	1 110	1 740
0,95	2,9	4,6	7,4	11,6	18,4	29	46	74	115	185	220	350	505	790	1 260	1 980
0,98	3,7	5,9	9,6	14,8	24	37	59	94	145	235	260	415	600	940	1 500	2 350

[2]

Вероятностная шкала составлена при совместном использовании результатов оценки частоты распределения ускорений при различных интенсивностях, а также уравнения (1), отражающего зависимость центров статистических распределений скорректированных амплитуд A_c ускорений от интенсивности I :

$$\lg A_c = -0,75 + 0,4I \pm 0,08. \quad (1)$$

Представленная шкала позволяет определять вероятность тех или иных ускорений при заданной интенсивности. Это, в свою очередь, позволяет более обосновано подходить к оценке риска возникновения оползневого процесса.

Для построения инструментальной части шкалы использовались все доступные данные об одновременной оценке сейсмической интенсивности и параметров сильных движений грунта. 50 %-ые вероятности превышения значений пиковых ускорений грунта при конкретной сейсмической интенсивности соответствуют сейсмической шкале ГОСТ Р 57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности».

Рельеф местности, во многом обуславливает интенсивность сейсмического воздействия, т. к. по мере приближения к вершине склона происходит увеличение интенсивности колебаний, что является следствием концентрации энергии землетрясения в верхней части хребта. В зависимости от локальных условий склона происходит изменение амплитуд колебаний. С увеличением крутизны склона линейно растет интенсивность колебаний горизонтальных составляющих в области коротких периодов. Подобным явлениям посвящен ряд научных исследований и работ [3–8].

Один из подходов, учитывающий влияние геоморфологических условий на формирование сейсмической интенсивности разработан В.Б. Заалишвили [9]. Им предложена эмпирическая формула для оценки возможного приращения сейсмической интенсивности ΔJ_s , обусловленного рельефом (2):

$$\Delta J_3 = -0,71 + 0,53 \lg(\alpha \cdot H) + K, \quad (2)$$

где:

$\alpha \cdot H$ — коэффициент рельефности: α — угол наклона рельефа, °; H — относительная высота (высота середины потенциального оползневого массива), м;

K — коэффициент, учитывающий тип грунта.

В то же время, как показали результаты исследования А.Г. Бугаевского [10], существует значительная разница амплитуд и частот горизонтальных колебаний гребня хребта в направлениях вдоль и поперек его оси, приводящая, на определенных частотах, к трехкратному превышению амплитуд колебаний поперек оси гребня хребта над амплитудами колебаний вдоль его оси. На сегодняшний день, результаты данного анализа не находят своего отражения в отечественных и зарубежных нормативных документах.

Вероятно, формула (2) применима для оценки приращения сейсмического воздействия на склоновые массивы, расположенный поперек оси горного хребта. Возможность применения формулы (2) в широком диапазоне высот склонов требует дальнейшего изучения.

Исходные данные

В данной работе выполнялась оценка влияния сейсмического воздействия на устойчивость склонового массива с применением уточненных коэффициентов сейсмичности, рассчитанных на основе вышеуказанных подходов, как и отечественных и зарубежных нормативных документов.

Рассматривался склоновый массив, расположенный на полуострове Абрау, характерной особенностью которого, как и в целом кавказских берегов Черного моря, является наличие большого количества палеосейсмодислокаций, представленных крупными блоковыми оползнями и обвалами [11; 12]. Возможная активизация склоновых процессов, инициированных землетрясениями, может стать серьезной проблемой при развитии данной территории.

Данный район относится к высокосейсмичной зоне Северного Кавказа. Рассматриваемая территория подвержена сейсмическим воздействиям из нескольких зон возникновения очагов землетрясений с магнитудами от 5,0 до 6,5 (рис. 2).

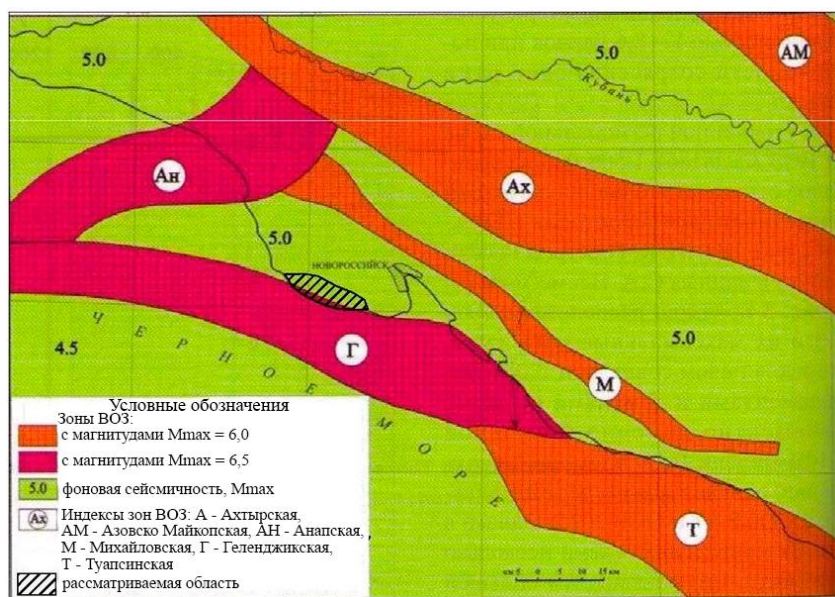
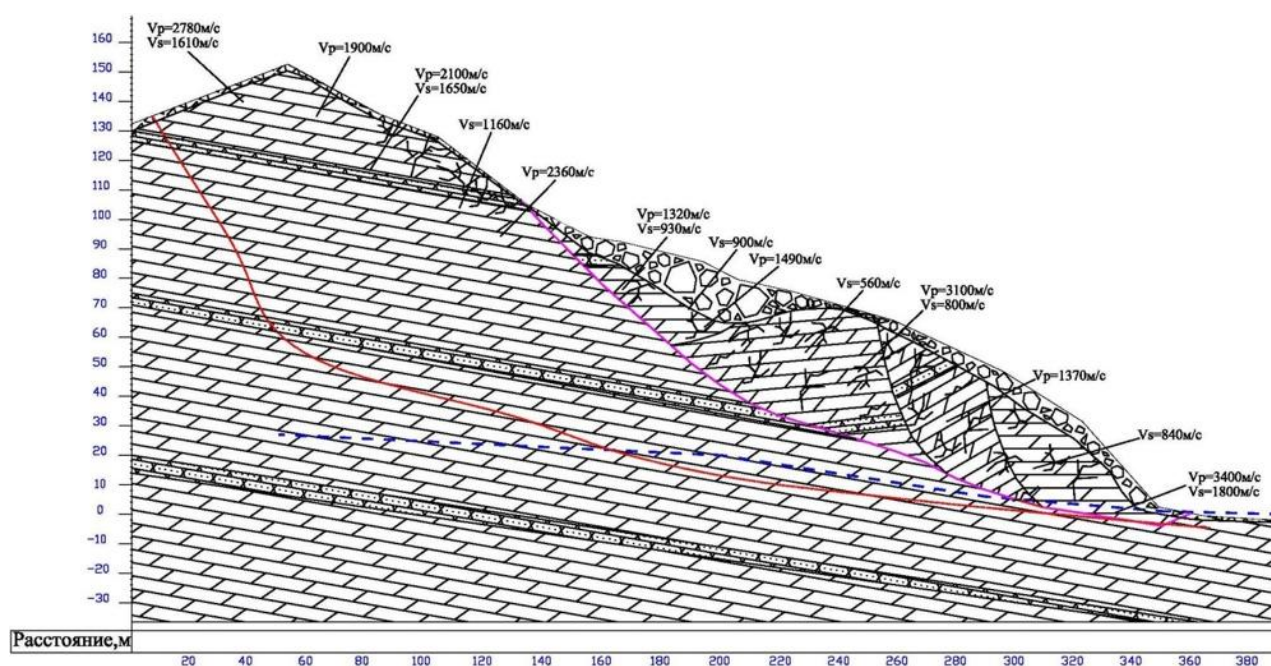


Рисунок 2. Схема зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ) (по [13], с изменениями)

В качестве типового участка выбран массив, на котором выявлен скальный оползень сдвига длиной (по падению) 160 м, шириной около 700 м. Мощность его изменяется от 20 м до 60 м, уменьшаясь вниз по склону. Разрез представлен мергелями серыми сильновыветрелыми, сильно трещиноватыми, малопрочными, с прослоями трещиноватого песчаника (рис. 3).



V_p — скорость продольных волн (м/с); V_s — скорость поперечных волн (м/с)

Рисунок 3. Схематический разрез типового массива, составленный по материалам С.Г. Миронюка (по [14], с изменениями)

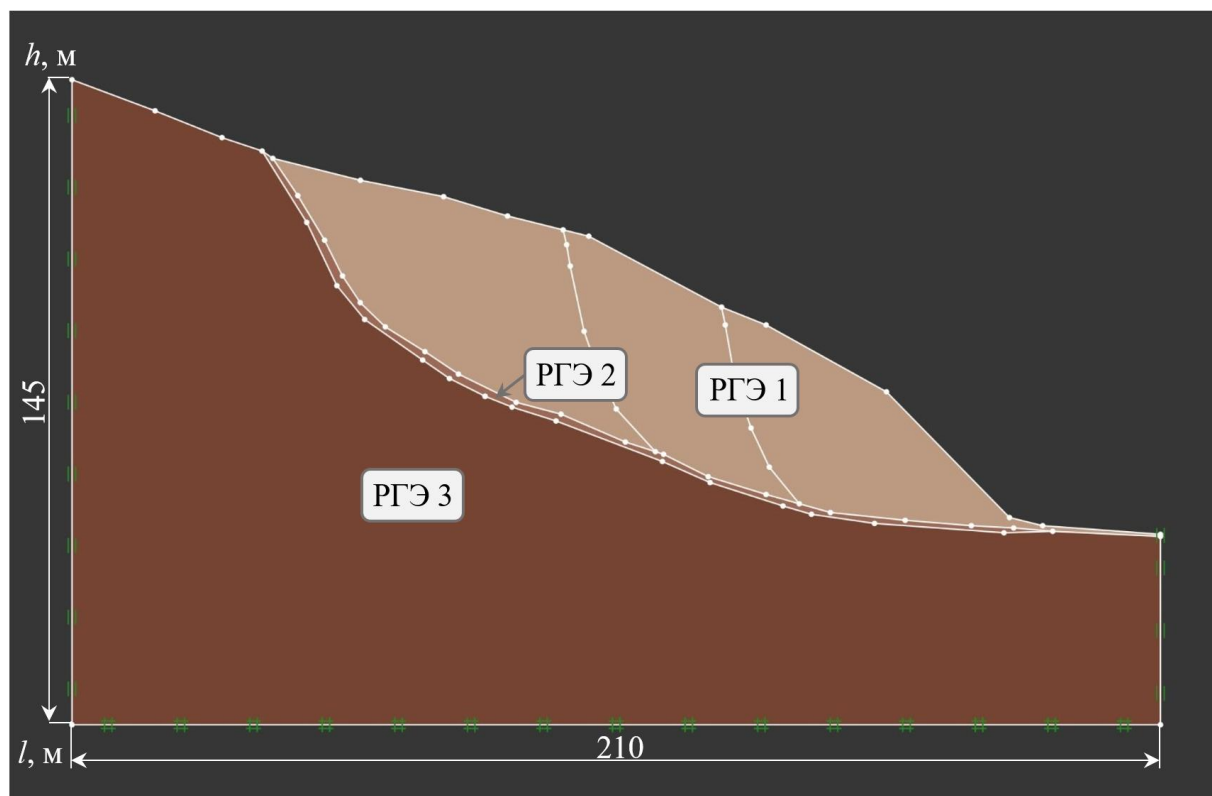


Рисунок 4. Расчетная модель (разработано авторами)

По картам ОСП-2015 (А, В) рассматриваемая территория характеризуется фоновой сейсмичностью 8–9 баллов. В случае потенциального размещения линейного объекта (магистральной автодороги, трубопровода и т. п.), который характеризуется в соответствии со статьей 48.1 Градостроительного кодекса РФ как технически сложный, исходная сейсмичность территории определяется по карте ОСП-2015В и составляет 9 баллов с соответствующим периодом повторяемости сотрясений 1 раз в 1 000 лет. При детализации с шагом через 0,1 балла территория характеризуется сейсмичностью 8,6 балла при той же повторяемости сотрясений для «средних» грунтовых условий [15]. Грунты, нарушенные предыдущими стадиями оползания, хотя и являются преимущественно полускальными, по сейсмической жесткости следует отнести к «средним».

Для проведения расчетов устойчивости была выбрана нижняя половина склонового массива, в которой ранее уже происходили оползневые процессы. Общая высота рассматриваемой части склона 105 м, средняя крутизна $\alpha = 29^\circ$ (рис. 4).

Геомеханическая модель включает три расчетно-геологических элемента (РГЭ), для которых в расчетах приняты характеристики, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Свойства грунтов РГЭ

РГЭ №	Плотность ρ , т/м ³	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Угол внутреннего трения ϕ , град.	Сцепление C , кПа
1	2,25	600	0,24	28,5	70
2	2,15	200	0,25	24,5	25
3	2,42	1500	0,25	31	100

По [14], с измерениями

Приближенные характеристики грунтов РГЭ-1 и РГЭ-3 определены исходя из данных по объектам-аналогам, а также скоростям продольных и поперечных волн, определенных на данном участке в ходе изысканий геофизическими методами [14]. Прочностные характеристики грунтов РГЭ-2, являющихся зоной смещения, происходивших ранее оползней определены с помощью методики Хоека-Брауна. При характерном для данных грунтов параметре ненарушенной породы $m_i = 10$ и индексе геологической прочности (GSI), для нарушенных оползанием грунтов, около 25, по номограммам Хоека определены значения: $\phi = 24,5^\circ$ и $C = 25$ КПа [16].

Методика и результаты

Первоначально рассчитан коэффициент устойчивости склона без учета сейсмического воздействия. Расчеты выполнялись в программном комплексе OPTUM G2 (Optum Computational Engineering, г. Копенгаген, Дания), где коэффициент устойчивости (коэффициент безопасности) рассчитываются с помощью предельного анализа методом конечных элементов (МКЭ) с уменьшением прочности (SR-FELA). SR-FELA также обеспечивает возможность вычисления строгих верхних и нижних границ истинного коэффициента устойчивости.

Коэффициент устойчивости данного массива без учета сейсмического воздействия 1,282.

На следующем этапе была произведена серия расчетов устойчивости склонового массива, учитывающая как стандартные подходы к определению коэффициента сейсмичности, так и усовершенствованный подход, который включает в себя учет вероятностного распределения пиковых ускорений грунта при заданной сейсмичности и учет влияния геоморфологических условий (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расчетов

№ п/п	Расчет	Пиковые ускорения грунта (PGA), см/с ²	Коэффициент сейсмичности, K_c	Расчет МКЭ (OPTUM G2), K_y
1	ОДМ 218.2.006-2010 (при $P = 0,5$)	440	0,08	1,216
2	Формула В.Б. Заалишвили + табл. Ф.Ф. Аптикаева (при $P = 0,9$) + ОДМ 218.2.006-2010	1 740	0,3	1,06
3	табл. Ф.Ф. Аптикаева (при $P = 0,5$) + Eurocode 8 (с учетом $S_T = 1,2$)	440	$K_{c,гор} = 0,264$ $K_{c,верт} = 0,087$	1,08
4	табл. Ф.Ф. Аптикаева (при $P = 0,9$) + Eurocode 8 (с учетом $S_T = 1,2$)	695	$K_{c,гор} = 0,417$ $K_{c,верт} = 0,138$	0,989

Разработано авторами

Первый расчет устойчивости произведен с применением коэффициента сейсмичности $K_c = 0,08$, согласно ОДМ 218.2.006-2010 для 8,6-ми балльного сейсмического воздействия.

Во втором варианте расчета значение K_c определено с учетом приращения сейсмической интенсивности, рассчитанной по формуле В.Б. Заалишвили (3).

Для рассматриваемого участка склона получено следующее значение:

$$\Delta I_3 = -0,71 + 0,53 \lg(29 \cdot 31) + 0,3 = 1,14 \text{ балла.} \quad (3)$$

Следовательно, расчетная сейсмичность для данного участка составила 9,74 балла.

Также в расчете учитывалась вероятностная шкала Ф.Ф. Аптикаева. В рамках работы значение сейсмической интенсивности определено по карте ОСР-2015В. Так как у ответственных линейных объектов (автомагистралей, крупнейшие нефте- и газопроводы) срок эксплуатации составляет не 50, а, как правило, 100 лет и более, соответственно, вероятность превышения фоновой интенсивности сейсмического воздействия составляет 10 % за 100 лет. Для указанных сооружений, имеющих повышенный уровень ответственности, подобная вероятность превышения представляется чрезмерно опасной. Соответственно, по таблице 1 использовались значения PGA при вероятности не $P = 0,5$, а $P = 0,9$. Пиковые ускорения грунтов при интенсивности 9,5 баллов и $P = 0,9$ могут достигать 1 740 см/с², что по ГОСТ Р 57546-2017 соответствует интенсивности воздействия 10,0–10,5 баллов. Вышеуказанное значение интенсивности выбрано как наиболее близкое к уточнённой по влиянию рельефа сейсмичности (8,6 + 1,14 = 9,74 балла). Значение $K_c = 0,3$ в данном случае было определено с помощью экстраполяции, учитывая ближайшее значение $K_c = 0,25$ (при $I = 10$ баллов) по ОДМ 218.2.006-2010.

В рамках следующего варианта расчета использовалась методика Eurocode 8, использующая горизонтальный и вертикальный коэффициенты сейсмичности, а также топографический коэффициент усиления. Для расчета коэффициента сейсмичности использовалось значение $PGA = 440$ см/с² вероятность не превышения которого составляет 50 % при интенсивности сейсмического воздействия 8,5 баллов, как наиболее близкой к исходной ($I = 8,6$ балла). Как отмечалось ранее, вероятность $P = 0,5$ является стандартной в шкале сейсмической интенсивности, представленной в ГОСТ Р 57546-2017. Вычисленные коэффициенты сейсмичности представлены в таблице 3.

Четвертый случай аналогичен предыдущему за исключением применения в расчете значения $PGA = 695$ см/с² (при $I = 8,5$ баллов) при 90 % вероятности их не превышения (табл. 3).

Как и ожидалось, оценка устойчивости склонового массива без учета рельефа дает излишне оптимистичный результат. Стандартный расчет дает некоторый запас устойчивости склонового массива ($K_y = 1,216$). При таком расчете с 10 % вероятностью превышения

интенсивности сейсмического события в течение 100 лет, запас устойчивости уже недопустимо мал. Расчеты, учитывающие влияние рельефа местности на сейсмическое воздействие, а также использование значений пиковых ускорений грунта, соответствующих более низкому риску, учитывая ответственность сооружения, — 2 % вероятности превышения воздействия в течение 100 лет ($10\% \cdot 0,1/0,5$), показывает переход склонового массива либо к состоянию предельного равновесия, при использовании $K_c = 0,3$, определенного по ОДМ 218.2.006-2010, либо к потере устойчивости, при использовании $K_{c,гор} = 0,417$, $K_{c,верт} = 0,138$, рассчитанных по методике Eurocode 8, с оползанием массива ранее смещенных грунтов и разрушением сооружения.

То есть очевидна необходимость в подборе соответствующей инженерной защиты, либо в изменении местоположения объекта (например, минуя зону древних оползней).

Выводы

Учет рельефа, а также вероятностного характера распределения возможных сейсмических ускорений, позволяет уточнить сейсмическую опасность и риски, как при оценке сейсмостойкости функционирующих зданий и сооружений, так и при проектировании объектов, а также в случае возможности возникновения опасных геологических склоновых процессов и проектировании инженерной защиты от них.

Существующие рекомендации СП 269.1325800.2016 в части уточнения сейсмического воздействия на участках со значительной неровностью рельефа нельзя признать удачными. Недооценка распространенных геоморфологических аспектов, таких как: широкие долины, крутизна бортов, наличие высоких хребтов, значительно усиливающих сейсмические колебания, существенно занижает интенсивность сейсмических воздействий, что приводит к недооценке сейсмической опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кропоткин М.П. Сравнительный анализ использования различных подходов к оценке устойчивости склоновых массивов в условиях сейсмического воздействия / М.П. Кропоткин, Д.И. Вовкогон. — DOI 10.25296/1997-8650-2023-17-3-22-35. // Инженерные изыскания. — 2023. — Том XVII, № 3 — С. 22–35.
2. Аптикаев Ф.Ф., Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф.Ф. Аптикаев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений — 2005. — № 5. — С. 33–37.
3. Алешин А.С., Малышев Р.В. Исследование влияния рельефа на параметры сейсмического волнового поля методом конечных элементов / А.С. Алешин, Р.В. Малышев // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2012. — Т. 39, № 3. — С. 41–48.
4. Заалишвили В.Б. Влияние геоморфологических особенностей горной территории на формирование сейсмической интенсивности / В.Б. Заалишвили, И.Л. Габеева, Д.А. Мельков // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2013. — № 6(56). — С. 87–92.
5. Мавлянова Н.Г. Особенности сейсмогравитационных процессов в зонах активного проявления землетрясений центральной Азии (на примере территории Узбекистана) / Н.Г. Мавлянова, Р.С. Ибрагимов, Т.Л. Ибрагимова, Х.Х. Рахматуллаев. — DOI 10.31857/S0869780921020053 // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2021. — № 2. — С. 27–40.

6. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / О.В. Павленко. — М.: Научный мир, 2009. — 284 с.
7. Bard P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues // 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, 28 August — 2 September 1994, V. 1 / Ed. G. Duma. Rotterdam: Balkema, 1994. P. 305–327.
8. Geli L. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results / L. Geli, P.-Y. Bard, B. Jullien. —DOI 10.1785/BSSA0780010042 // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1988. — Vol. 78, No 1, — pp. 42–63.
9. Заалишвили В.Б. / Способ сейсмического микрорайонирования / В.Б. Заалишвили, И.Л. Габеева, Д.А. Мельков // Патент Российской Федерации № 2399934 от 20 сентября 2010 г.
10. Бугаевский А.Г. Влияние неизометричности формы горного рельефа на характеристики сейсмических колебаний / А.Г. Бугаевский. — DOI 10.21455/VIS2024.3-9. // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2024. — Т. 51, № 3. — С. 166–176.
11. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа / А.С. Несмеянов. — М.: Недра, 1992. — 254 с.
12. Попков В.И. Сейсмогравитационные деформации и оценка сейсмической опасности южного склона Северо-Западного Кавказа / В.И. Попков, О.Ю. Крицкая, А.А. Остапенко // Актуальные проблемы современной сейсмологии: сб. докладов Международной конференции, посвященной 50-летию Института сейсмологии имени Г.А. Мавлянова АН РУз, 12–14 октября 2016 г. Ташкент, Узбекистан, 2016. — С. 452–456.
13. Несмеянов С.А. Шовные зоны как верхнекоровые сейсмогенерирующие / А.С. Несмеянов // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2012. — № 1. — С. 5–28.
14. Миронюк С.Г. Оценка устойчивости обвальнo-оползневого склона Черноморского побережья с учетом возможных сейсмических воздействий / С.Г. Миронюк, М.П. Кропоткин, В.Ю. Ионов // Изучение опасных природных процессов и явлений при инженерных изысканиях. сб. докладов Общерос. науч.-практич. конф. 2019 г. Москва: Геомаркетинг, 2019. — С. 99–113.
15. Трифонов Б.А. Особенности проведения сейсмического микрорайонирования на урбанизированной территории морского побережья г. Геленджика при высотном строительстве / Б.А. Трифонов, В.В. Севостьянов. — DOI 10.25296/1997-8650-2018-12-5-6-82-90 // Инженерные изыскания. — 2018. — Том XII, № 5-6, — С. 82–90.
16. Hoek E. Putting numbers to geology: an engineer's viewpoint / E. Hoek // Felsbau Rock and Soil Engineering. — 1999. — № 3. — pp. 139–151.

Kropotkin Mikhail Petrovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
Institute of Hydrotechnical and Power Engineering
E-mail: Singeos@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1039973

Vovkogon Dmitry Igorevich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
Institute of Hydrotechnical and Power Engineering
Complex of Urban Development Policy and Construction of the City of Moscow, Moscow, Russia
E-mail: Dmitry.vovkogon@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1266370

Refining the assessment of seismic effects on slope stability — approaches and emerging issues

Abstract. Today, pseudo-static analysis is predominantly used in domestic and foreign building and structure design practices to assess the stability of slopes and embankments under seismic conditions. However, current domestic and foreign standards and recommendations demonstrate a wide range of coefficients used, which does not allow for a correct assessment of the degree of landslide hazard. The assessment of the influence of relief according to the set of rules 269.1325800.2016 «Transport structures in seismic areas. Rules for refining the initial seismicity and seismic microzonation», which has a number of shortcomings, together with the failure to take into account vertical accelerations of the massif and in combination with significantly underestimated seismicity coefficients, leads to an overly optimistic assessment of the stability of slope massifs, which is unacceptable when designing critical buildings and structures. The study proposes an approach that takes geomorphological conditions into account more fully in the form of V.B. Zaalishvili's empirical formula, which allows for the estimation of possible increments in seismic intensity ΔJ_s , as well as the probabilistic nature of the distribution of possible peak ground accelerations at the same seismic intensity, when introducing the probability scale compiled by F.F. Aptikayev into the analysis. As a result of comparative calculations of the stability of the slope massif using refined seismicity coefficients calculated on the basis of both the above approach and domestic and foreign regulatory documents, it was found that the proposed approach allows for a more accurate assessment of the potential possibility of a landslide process and, accordingly, the degree of risk, including after partial implementation of landslide protection measures.

Keywords: earthquake; earthquake intensity factor; relief; slope massif; calculated seismicity; pseudo-static method; slope stability calculation; peak ground acceleration