

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НОРМАТИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА

А.В. Коновалов, Ю.В. Генсировский

*ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, ул. Горького 25,
Южно-Сахалинск, 693023; e-mail: a.konovалov@geophystech.ru; gensirovskiy@mail.ru*

Поступила в редакцию 28 марта 2024 г.

Оценка риска схода оползней в результате интенсивных сейсмических колебаний является актуальной задачей инженерной геологии. В настоящей работе для оценки устойчивости склона предложена методика нормирования внутренней деформации склона, основанная на вероятностно-стохастическом подходе. В качестве нормируемой величины рассматривается кумулятивное смещение Ньюмарка, для которого подобраны эмпирические соотношения между накопленным смещением, уровнем сейсмического воздействия и критическим ускорением, задаваемым материальными параметрами склона. В предложенной методике учитываются неопределенности положения возможных очагов землетрясений в ближайшие 50 лет в окрестностях исследуемого склона, магнитуды события (событий) и уровня сейсмического воздействия. Учитываются также неопределенности физико-механических параметров склона. Нормативные смещения оцениваются по референтным вероятностям превышения (10 % и 5 %). Полученные значения сравниваются с пороговыми характеристиками, и исходя из этого принимается решение об устойчивости склона к сейсмическим нагрузкам. В качестве нижнего порога, при котором склон можно считать устойчивым, принято значение 10 см. Методика успешно апробирована на хорошо изученном участке западного склона горы Большевик (юг о. Сахалин). Сбалансированная оценка нормативного смещения для 5 % вероятности превышения составила чуть менее 10 см. В работе также даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию методики.

Ключевые слова: сейсмогенный оползень, смещение Ньюмарка, вероятностный анализ, устойчивость склона, неопределенность, стохастическая симуляция, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Повреждения зданий и сооружений, связанные с сейсмогенными оползнями, могут быть такого же порядка или значительно превышать ожидаемый ущерб от непосредственных сейсмических воздействий. Поэтому оценка опасности вторичных эффектов, вызванных землетрясением, является важной практической задачей.

Для количественной оценки оползневой опасности сейсмогенного характера используется понятие устойчивости склона. Это понятие формализуют в виде коэффициента устойчивости (например, [4]) или вероятности [6, 19], что предопределяет расчетные методы прогнозирования сейсмогенных оползней.

В последнее время наряду с псевдостатическим методом расчета коэффициента устойчивости используется характеристика внутренней деформации

оползневого массива. Согласно подходу Н. Ньюмарка [32], накопление деформаций происходит, когда сейсмическое ускорение превышает некоторое критическое значение, зависящее от материальных и геометрических параметров склона. Когда накопленная деформация (смещение) достигает пороговых значений, то склон переходит в неустойчивое состояние. На практике применяются эмпирические соотношения между накопленным смещением и входными параметрами, к которым относятся уровень сейсмического воздействия и критическое ускорение на заданном участке [12, 16, 38, 48]. Существуют и более трудоемкие подходы, которые позволяют рассчитывать накопленную деформацию трехмерной модели методом дискретных (или конечных) элементов [8, 10, 36, 40, 44]. Данные подходы чаще всего реализованы в виде коммерческих программных продуктов.

Одна из проблем деформационного подхода заключается в выборе порогового значения накопленного смещения, определяющего переход от устойчивого к неустойчивому состояниям склона. Авторам известно несколько работ, где такие значения приведены и используются в инженерной практике (например, [5]). Поэтому эмпирический расчет деформаций является компромиссным инструментом анализа устойчивости склона между псевдостатическим методом оценки и компьютерным моделированием напряженно-деформированного состояния оползневого участка [18].

Нормирование внутренней деформации оползневого массива может быть выполнено с помощью детерминистического или вероятностного подходов. К одному из недостатков детерминистического подхода можно отнести консервативность получаемых оценок, связанную с неопределенностями входных параметров, которые не учитываются в расчетах. Указанные проблемы обычно преодолеваются путем стохастической симуляции материальных параметров с учетом информации об их пространственной изменчивости [6, 42]. Тем не менее, такие подходы считаются псевдовероятностными [35], так как в качестве сейсмических нагрузок, оказываемых на склон, принимаются сценарные [19, 45] или нормативные сейсмические воздействия для заданного периода повторяемости (чаще всего это 475-летний период, соответствующий 10 % вероятности превышения) [17, 27]. Неопределенности входных воздействий при этом не учитываются.

Практически такому же подходу следуют разработчики российских строительных правил. Здесь выбор сценарных сейсмических воздействий (карты А, В или С из комплекта карт общего сейсмического районирования) предоставляется заказчику инженерных изысканий. При псевдостатическом расчете используются поправочные коэффициенты, которые зависят от исходной сейсмичности рассматриваемого участка. Однако сами коэффициенты не учитывают продолжительность сейсмических колебаний, характер сейсмических воздействий в ближней зоне и другие сейсмические эффекты, влияющие на устойчивость склона [34].

Переход от детерминистических взглядов к идеям сбалансированного риска в конце 20-го столетия дал мощный толчок в развитии методологии полного вероятностного анализа устойчивости склонов к сейсмическим воздействиям [9, 20, 22, 26, 31, 35, 37, 45], учитывающей неопределенности исходной информации. Основоположником идеологии вероятностного анализа можно считать К. Корнелла [7], который в своей известной работе получил аналитическое выражение для вероятности превышения сейсмической

интенсивности, рассматривая сейсмический источник в виде разлома конечной длины.

В настоящей работе предложена методика оценки оползневой опасности на основе стохастического каталога землетрясений и метрики деформации склона, которая, так же как и величина сейсмического воздействия, зависит от магнитуды землетрясения, расстояния от сейсмического источника до участка и локальных грунтовых условий. Такое эмпирическое представление позволяет рассчитать среднегодовую частоту превышения заданного уровня деформации и проанализировать различные эффекты (эпистемические и случайные неопределенности), влияющие на оценку устойчивости склона.

МЕТОД

Вероятностно-стохастический подход. Предлагаемый подход заключается в генерации стохастического каталога землетрясений для продолжительного интервала времени (10^5 лет и более) на основе линейно-аментно-доменной модели сейсмических источников [2, 47], соответствующей современной сейсмологической изученности региона. Далее для каждого сейсмического события рассчитывается сейсмическое воздействие, оказываемое на склон, с учетом сейсмических характеристик грунта и случайной неопределенности эмпирического соотношения затухания сейсмических воздействий. Исходя из эмпирического соотношения между интенсивностью сейсмических воздействий и кумулятивным смещением Ньюмарка рассчитывается величина накопленной деформации на склоне для каждого сейсмического события. Накопленная деформация также подвергается случайным отклонениям, обусловленным статистическим рассеянием материальных параметров участка.

Таким образом, мы получаем стохастический набор данных, представляющий расчетные характеристики накопленной деформации на склоне. Эти данные используются для оценки повторяемости возникающих деформаций (смещений), нормированной на временной отрезок стохастического каталога. На основе теоремы о полной вероятности частоту превышения некоторой случайной величины можно представить в виде:

$$\vartheta(d) = \sum_{i=1}^N \Pr(D_N > d | \text{event}_i) \cdot F_A(\text{event}_i), \quad (1)$$

где $\vartheta(d)$ – среднегодовая частота превышения кумулятивного смещения d ; $\Pr(D_N > d | \text{event}_i)$ – вероятность превышения кумулятивного смещения d от сейсмического события i ; $F_A(\text{event}_i)$ – среднегодовая частота возникновения сейсмического события i ; суммирование производится по всем (N) событиям из стохастического каталога.

Для оценки вероятности превышения используется Пуассоновская модель:

$$P(d, t) = 1 - e^{-\theta(d)t}, \quad (2)$$

где $P(d, t)$ – вероятность превышения кумулятивного смещения d в течение промежутка времени t (обычно 50 лет).

Нормативные смещения оцениваются исходя из референтных значений вероятности (10 %, 5 % и 1 %), принятых в инженерной практике. Полученные нормативные смещения сравниваются с пороговыми характеристиками. Исходя из этого принимается решение об устойчивости склона к сейсмическим воздействиям.

Основная сложность заключается в получении эмпирических данных в целевом регионе, позволяющих откалибровать условную вероятность P_r из (1). Как правило, P_r зависит от материальных параметров склона и/или их комбинаций, а также амплитуды сейсмических воздействий, оказываемых на склон. В подходе Ньюмарка [32], рассмотренном ниже, комбинация физико-механических параметров задает критическое ускорение, превышение которого приводит к зарождению локальной неустойчивости на границе скольжения.

Оценка критического ускорения (подход Ньюмарка). В динамической модели устойчивости склона, основанной на подходе Ньюмарка [32], оползневой массив рассматривается в виде жесткого блока, скользящего по плоской бесконечной поверхности. Движение блока происходит под воздействием сейсмических колебаний. Такой блок сопротивляется инерционной силе, обусловленной сейсмической нагрузкой, и находится в устойчивом состоянии до тех пор, пока ускорение свободной поверхности не превысит критическое значение. В простейшем случае критическое ускорение, определяемое силой трения, пропорционально весу блока. Блок начинает разгоняться, как только ускорение превысит критическое значение. В какой-то момент времени скорость блока относительно свободной поверхности сравнивается с поступательной скоростью поверхности скольжения, что соответствует нулевому значению абсолютной скорости перемещения блока. Считается, что в этот момент происходит остановка блока, и его движение возобновится после того, как сейсмическое ускорение вновь превысит критическое значение. Полное перемещение блока определяется интегралом скорости. Данную величину называют кумулятивным смещением Ньюмарка.

Кумулятивное смещение не обязательно соответствует непосредственно измеренным косейсмическим деформациям. В подходе Ньюмарка используется идеализированное представление о процессе зарож-

дения неустойчивости склона, однако предложенная характеристика внутренней деформации склона хорошо описывает степень оползневой опасности при сейсмическом воздействии [15, 18, 30].

В более общем случае способность склона выдерживать сейсмическую нагрузку задается статическим фактором устойчивости. Согласно теории предельного равновесия, статический фактор устойчивости F_S , являющийся отношением силы, удерживающей массу на склоне, к силе,двигающей данную массу, задается следующим образом:

$$F_S = \frac{c'}{\gamma z \sin \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} - \frac{m\gamma_w \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha}, \quad (3)$$

где c' – эффективное сцепление; z – толщина скользящего слоя; α – крутизна склона; γ – удельный вес пород; γ_w – удельный вес воды; φ' – угол внутреннего трения (рад.); m – отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения.

Блок находится в устойчивом состоянии, если $F_S > 1$, и в неустойчивом, если $F_S < 1$. Критическое ускорение a_c (в единицах ускорения свободного падения, g) потенциального оползневого блока является простой функцией статического фактора устойчивости и угла склона:

$$a_c = (F_S - 1) \sin \alpha. \quad (4)$$

Оценка накопленной деформации. Авторам известно несколько региональных и глобальных эмпирических соотношений между кумулятивным смещением Ньюмарка D_N , параметрами сейсмических воздействий (пиковое ускорение грунта, интенсивность, по Ариасу, и т.д.) и критическим ускорением [12–14, 16, 29, 38, 48, 50]. Большинство таких соотношений были апробированы на практике в долгосрочном прогнозировании сейсмогенных оползней.

Современные эмпирические зависимости [12, 29, 50] имеют в основном следующее аналитическое представление:

$$\overline{\ln D_N(I_a, a_c)} = B_1 \ln I_a + B_2 a_c + B_3 a_c \ln I_a + B_4, \quad (5)$$

где символ $\overline{}$ обозначает среднее (медианное) значение; B_1, B_2, B_3 и B_4 , – известные коэффициенты; I_a – интенсивность, по Ариасу, задаваемая выражением

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_r} [a(t)]^2 dt. \quad (6)$$

Интегрирование акселерограммы $a(t)$ в (6) осуществляется по всей записи длительностью T_r . Интенсивность I_a измеряется в м/с, ускорение $a(t)$ – в единицах ускорения свободного падения, g .

Преимущество использования метрики I_a заключается в том, что она учитывает широкий спектр

сейсмических колебаний, а также продолжительность сигнала. Продолжительность сейсмических колебаний является критически важным параметром, влияющим на устойчивость склона [34]. Таким образом, величина D_N в дальнейших вычислениях является функцией от входного воздействия I_a и критического ускорения a_c , зависящего в свою очередь от материальных параметров склона.

Строгое количественное определение коэффициентов модели (5) требует детального исследования региональных особенностей оползневых процессов, индуцированных сейсмическими колебаниями. Для рассматриваемого района таких данных может не оказаться. Тогда общий путь преодоления дефицита эмпирических данных – импортирование моделей из регионов с хорошей изученностью.

Мы будем использовать эмпирические коэффициенты из [12]. Выбранная модель характеризуется относительно небольшим статистическим рассеянием. Она построена по эмпирическим данным из разных сейсмогенных участков Земли и предусматривает разные коэффициенты в зависимости от грунтовых условий рассматриваемого склона (табл. 1). Следует обратить внимание, что практически во всех эмпирических соотношениях используются десятичные логарифмы. В настоящей работе для удобства вычислений десятичные логарифмы заменены на натуральные, поэтому некоторые приводимые коэффициенты отличаются от таковых в оригинальной статье [12].

Вероятностная функция. Вероятность возникновения сейсмогенного оползня в большинстве случаев описывается либо распределением Вейбула [15], либо логистической функцией [30, 41]. Условную вероятность возникновения оползня, то есть вероятность возникновения неустойчивости при заданном уровне сейсмического воздействия, чаще всего ассоциируют с площадным распределением оползней, поэтому предельное значение вероятности никогда не

достигает единицы – ее максимальное значение соответствует приблизительно 0.3 [15]. Такие вероятностные модели, по всей видимости, востребованы при построении региональных карт, которые учитывают площадной характер оползневых явлений.

Вероятность возникновения оползня, откалиброванная с использованием логистической регрессии, лежит в пределах от 0 до 1. По сути, такие модели не учитывают площадной характер оползневых явлений, а полученная вероятностная функция служит простейшим бинарным классификатором. Для достижения классовой сбалансированности (то есть реалистичного соотношения между количеством сошедших оползней и ненарушенными участками на заданной площади) используются эмпирические поправки, которые переводят логистическую вероятность в площадную (например, [33]).

В настоящей работе вместо вероятности возникновения явления используется вероятность превышения физической величины. Исходя из этого определяются нормативные значения, которые далее сравниваются с пороговыми характеристиками. Ниже представлен способ конструирования вероятностной функции.

Изменчивость, наблюдаемая в деформационных характеристиках склона от события к событию и от участка к участку, можно описать нормальным распределением величины $\ln D_N$. Такое представление является идеализированным, но вполне подходящим для расчета инженерного риска. Тогда вероятность превышения заданного уровня кумулятивного смещения d при известных уровне сейсмического воздействия I_a на склоне и критическом ускорении a_c задается функцией распределения стандартной нормальной величины, т.е.

$$\Pr(D_N > d | I_a, a_c) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln d - \ln D_N(I_a, a_c)}{\sigma_{\ln D_N}}\right), \quad (7)$$

где Φ – функция Лапласа (или функция распределения стандартной нормальной величины); $\sigma_{\ln D_N}$ – известное стандартное отклонение модели (5).

Стохастическая симуляция сейсмических воздействий осуществляется по моделям затухания, в которых амплитудные характеристики сейсмических колебаний задаются с помощью магнитуды землетрясения m и расстояния r от очага до участка. Такие модели подвержены неопределенностям, оцениваемым эмпирическим путем с помощью регрессионного анализа, т.е.

$$\ln I_a = \overline{\ln I_a(m, r)} + \sigma_{\ln I_a} \varepsilon, \quad (8)$$

где $\overline{\ln I_a(m, r)}$ – среднее значение параметра; $\sigma_{\ln I_a}$ – стандартное отклонение от среднего значения; ε – случайная составляющая, задаваемая нормальным

Таблица 1. Параметры эмпирических соотношений, используемых в тестовых расчетах для средних грунтовых условий (soil site).

Параметр	Значение
B_1	0.802
B_2	25.285
B_3	7.377
B_4	4.407
k	2.76
c	8.059
$\sigma_{\ln D_N}$	0.631
$\sigma_{\ln I_a}$	1.559

распределением с нулевым средним и единичной дисперсией.

Тогда с учетом (5) и (8) стохастическое представление D_N можно записать как:

$$\begin{aligned} \ln D_N(I_a, a_c) &= \overline{\ln D_N(I_a, a_c)} + \sigma_{\ln D_N} \eta = \\ &= \overline{\ln D_N(m, r, a_c)} + (B_1 + B_3 a_c) \sigma_{\ln I_a} \varepsilon + \\ &+ \sigma_{\ln D_N} \eta = \overline{\ln D_N(m, r, a_c)} + \sigma_{tot} \xi, \end{aligned} \quad (9)$$

где η и ξ – взаимно независимые случайные переменные, подчиняющиеся стандартному нормальному распределению; σ_{tot} – общее стандартное отклонение, определяемое выражением:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(B_1 + B_3 a_c)^2 \sigma_{\ln I_a}^2 + \sigma_{\ln D_N}^2}. \quad (10)$$

Среднее значение $\overline{\ln D_N(m, r, a_c)}$ в (9) задается следующей формулой:

$$\begin{aligned} \overline{\ln D_N(m, r, a_c)} &= B_1 \overline{\ln I_a(m, r)} + \\ &+ B_2 a_c + B_3 a_c \overline{\ln I_a(m, r)} + B_4. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, с учетом статистического рассеяния сейсмического воздействия, генерируемого событием, обозначенным индексом i , вероятность превышения кумулятивного смещения d может быть записана как:

$$\Pr(D_N > d | event_i, a_c) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln d - \overline{\ln D_N(m_i, r_i, a_c)}}{\sigma_{tot}}\right). \quad (12)$$

Неопределенность материальных параметров. Известно, что физико-механические параметры не всегда определяются однозначно. Они подвержены как сезонным вариациям, так и пространственной неоднородности [6, 28, 40]. Пространственная неоднородность материальных параметров чаще всего учитывается путем их стохастической симуляции по заданным статистическим законам распределения (нормальное, логнормальное, бета-перт и др.) с учетом пространственной автокорреляционной функции. Критическое ускорение a_c , как и материальные параметры, от которых оно зависит, также подвержено пространственной изменчивости. Такой подход актуален для детерминистических методов оценки устойчивости. В нашем же случае используется статистический подход, в рамках которого регрессионное соотношение между деформационной характеристикой склона, уровнем сейсмического воздействия и критическим ускорением построено с учетом неопределенности последнего, поэтому можно считать, что пространственная неопределенность уже учитывается в стандартном отклонении модели.

Другого рода неопределенность связана с сезонными вариациями материальных параметров. В частности, критической в нашей задаче является сте-

пень обводненности грунтов. В разное время года она может принимать разные значения. Кроме того, для одного участка могут выделяться несколько потенциальных границ скольжения. Чтобы учесть разные модели склона необходимо ввести (экспертные) веса модели, полная сумма которых равна единице. Тогда полную вероятность можно записать как:

$$P(d, t) = \sum_j w_j P_j(d, t), \quad (13)$$

где w_j – вес модели j ; $P_j(d, t)$ – вероятность превышения, рассчитанная для модели j .

Расчетные процедуры. Развиваемая в настоящей работе вероятностно-стохастическая методология оценки оползневой опасности сейсмогенного характера сводится к следующим последовательным шагам:

1) Генерация стохастического каталога землетрясений согласно имеющейся модели сейсмических источников (рекомендуется задавать временной интервал не менее 10^5 лет).

2) Оценка интенсивности Ариаса $\overline{\ln I_a(m, r)}$ на исследуемом участке для каждого сгенерированного (стохастического) сейсмического события согласно региональной модели затухания.

3) Оценка кумулятивного смещения Ньюмарка для каждого события согласно формуле (11) в рамках заданной модели склона.

4) Оценка вероятности превышения согласно формуле (12) на заранее заданной расчетной сетке кумулятивного смещения.

5) Оценка среднегодовой повторяемости как функции, зависящей от кумулятивного смещения, согласно формуле (1) и оценка пуассоновской вероятности согласно формуле (2).

6) Оценка сбалансированной вероятности, учитывающей разные модели склона, согласно (13).

7) Нормирование кумулятивного смещения, соответствующего 5 % и/или 10 % вероятности превышения.

8) Сравнение нормативных смещений с пороговыми значениями и принятие решения (анализ и выбор пороговых значений представлен в следующем разделе).

Пороговое значение кумулятивного смещения. Пороговое значение косейсмического смещения, которое определяет переход от устойчивого к неустойчивому состоянию склона, варьируется в зависимости от типа склона, грунтовых условий, региональных особенностей и проектных решений [3]. Так, например, смещения до 100 см могут быть допустимыми для хорошо сконструированных плотин.

Материалы с высокой пластичностью в меньшей степени подвержены деградации даже при относительно высоких внутренних деформациях, в то время как хрупкие материалы при тех же самых нагрузках могут разрушиться.

Т.Л. Юд [49] использовал несколько пороговых значений смещения грунта (10 и 30 см) для оценки характера поврежденности зданий. Позже эти же пороговые значения применялись в оценках устойчивости природных склонов: если кумулятивное смещение не превосходит 10 см, то склон считается устойчивым, а если оно превышает 30 см – неустойчивым и опасным. В промежуточном диапазоне, между 10 и 30 см, требовалось дополнительное исследование склона. В [46] рассматривался более консервативный порог смещения, выше которого (>5 см) происходит образование макроскопических трещин и дальнейшее обрушение склона. В целом, для природных склонов пороговое значение варьируется в диапазоне 5–15 см для разных регионов Земли и типов оползней [5, 21, 43].

В настоящей работе мы будем придерживаться устоявшихся в инженерной практике решений, принимая нижний порог равным 10 см, а верхний – 30 см. Если нормативное смещение меньше 10 см, то склон можно считать безопасным. Однако если оно больше 30 см, то это говорит о высокой степени оползневой опасности, и такой участок следует воспринимать как неустойчивый. В промежуточном диапазоне, от 10 до 30 см, следует проводить дополнительные исследования, в частности моделирование поведения склона на сейсмическое воздействие. Выбор сценарных землетрясений и соответствующих записей также следует проводить на основе вероятностного подхода. Такой способ в сейсмологии называется деагрегацией сейсмической опасности. Методика деагрегации оползневой опасности приведена в [23].

Вычислительные программы. Для генерации синтетического каталога использовался программный каркас Openquake. Openquake распространяется в открытом исходном коде и имеет лицензию, не ограничивающую использование данного продукта: <https://github.com/gem/oq-engine/blob/master/LICENSE>. Расчеты реализованы с помощью языка программирования Python.

МАТЕРИАЛЫ

Район исследований. В настоящей работе рассматривается юг о. Сахалин как один из самых сейсмичных районов, связанный с активностью Центрально-Сахалинского разлома. По мнению ряда исследователей [1], данный разлом отождествляется с границей Евразийской и Североамериканской лито-

сферных плит. Палеосейсмологические исследования на разломе показали, что здесь в прошлом происходили подвижки, магнитуда которых достигала $M_w=7.5$.

В 10–15 км от выхода разлома на свободную поверхность расположен областной центр Сахалина – г. Южно-Сахалинск. Город расположен в центральной части Сусунайской низменности. Его восточная граница проходит по западному макросклону Сусунайского хребта. В настоящее время на этой территории ведется активное строительство жилых, спортивных и туристических объектов. Поэтому оценка оползневого потенциала данных территорий является крайне актуальной задачей.

Для тестового расчета принят хорошо изученный участок западного склона горы Большевик (рис. 1) с координатами: 46.958329 гр. с.ш., 142.777664 гр. в.д.

Инженерно-геологическая характеристика.

В геологическом строении территории принимают участие образования палеозой-мезозойского (Pz-Mz), палеоген-неогенового (P-N₁) комплексов и нелитифицированных генетических подразделений образований четвертичного возраста (Q).

На рассматриваемом участке от поверхности разрез представлен элювиально-делювиальными отложениями (e-dQ), которые подстилаются нерасчлененными поздней мел-плиоценовыми образованиями (K₂-N₁).

Элювиально-делювиальные образования представлены продуктами выветривания скальных и полускальных грунтов, сохранившими структуру и текстуру исходных пород. Исследуемые грунты неоднородны по составу и свойствам как в плане, так и по глубине. Это связано с тем, что грунты обладают разной степенью выветрелости с различными прочностными и деформационными характеристиками, которые возрастают с глубиной.

По данным гидрогеологических наблюдений, проводившихся на склоне, водоносный горизонт обнаружен на глубинах 2.2–10.2 м, что соответствует абсолютным отметкам 269.43–274.8 м (БС). Грунтовые воды обладают небольшим местным напором 0.3–1.3 м. Питание водоносных горизонтов осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков. Область питания совпадает с областью распространения.

В пределах рассматриваемой площади выделяется три инженерно-геологических элемента грунта: ИГЭ 1 – суглинок легкий пылеватый твердый с дресвой, ИГЭ 2 – щебенистый грунт с супесчаным заполнителем до 19 % и ИГЭ 3 – суглинок легкий пылеватый твердый дресвяный до 46 %.

Данные по физико-механическим свойствам этих грунтов приняты к расчету в нашей работе.



Рис. 1. Фотоснимок склона, рассматриваемого в качестве тестового участка.

Модель сейсмических источников и синтетический каталог. Модель сейсмических источников для исследуемого района построена таким образом, что возможные события с большой магнитудой отнесены к сейсмолинеаментам, в то время как фоновые – к доменам (площадным источникам). Параметры модели задают повторяемость землетрясений разной магнитуды, а также максимальную магнитуду M_{max} .

На рис. 2, а показано положение площадных и линейных сейсмических источников юга о. Сахалин, используемых для синтеза каталога. Данная модель апробирована в прикладных задачах по оценке сейсмической опасности. Параметры модели приведены в [24].

На рис. 2, б показано положение эпицентров сильных землетрясений согласно синтезированному каталогу, который насчитывает в общей сложности 71627 событий с $M \geq 4$ во временном интервале 10^5 лет. В каталоге содержится информация о повторяемости сгенерированного события, координатах и глубине его центроида, магнитуде, а также геометрических характеристиках площадки разрыва (углы

простираения, падения и подвижки). Под центроидом понимается центр прямоугольной площадки.

Зависимость между количеством землетрясений и магнитудой следует известному «фундаментальному» закону сейсмологии Гутенберга-Рихтера (рис. 3).

Региональная модель затухания интенсивности Ариаса. Модели затухания сейсмических воздействий, в том числе интенсивности по Ариасу, имеют ярко выраженные региональные особенности, обусловленные тектоническими и грунтовыми условиями, а также характеристиками очага землетрясения. Д. Кифер и Р. Уилсон [21] разработали модель затухания интенсивности по Ариасу для прогноза оползневых эффектов. Поэтому в качестве первого приближения предлагается использовать следующее аналитическое представление:

$$\ln I_a = \ln 10 \cdot M - k \ln R - c, \quad (14)$$

где M – моментная магнитуда землетрясения; R – гипоцентральное расстояние, измеряемое в км; k и c – эмпирические коэффициенты.

Модель (14) подходит для широкого диапазона магнитуд. Эмпирические коэффициенты для Сахали-

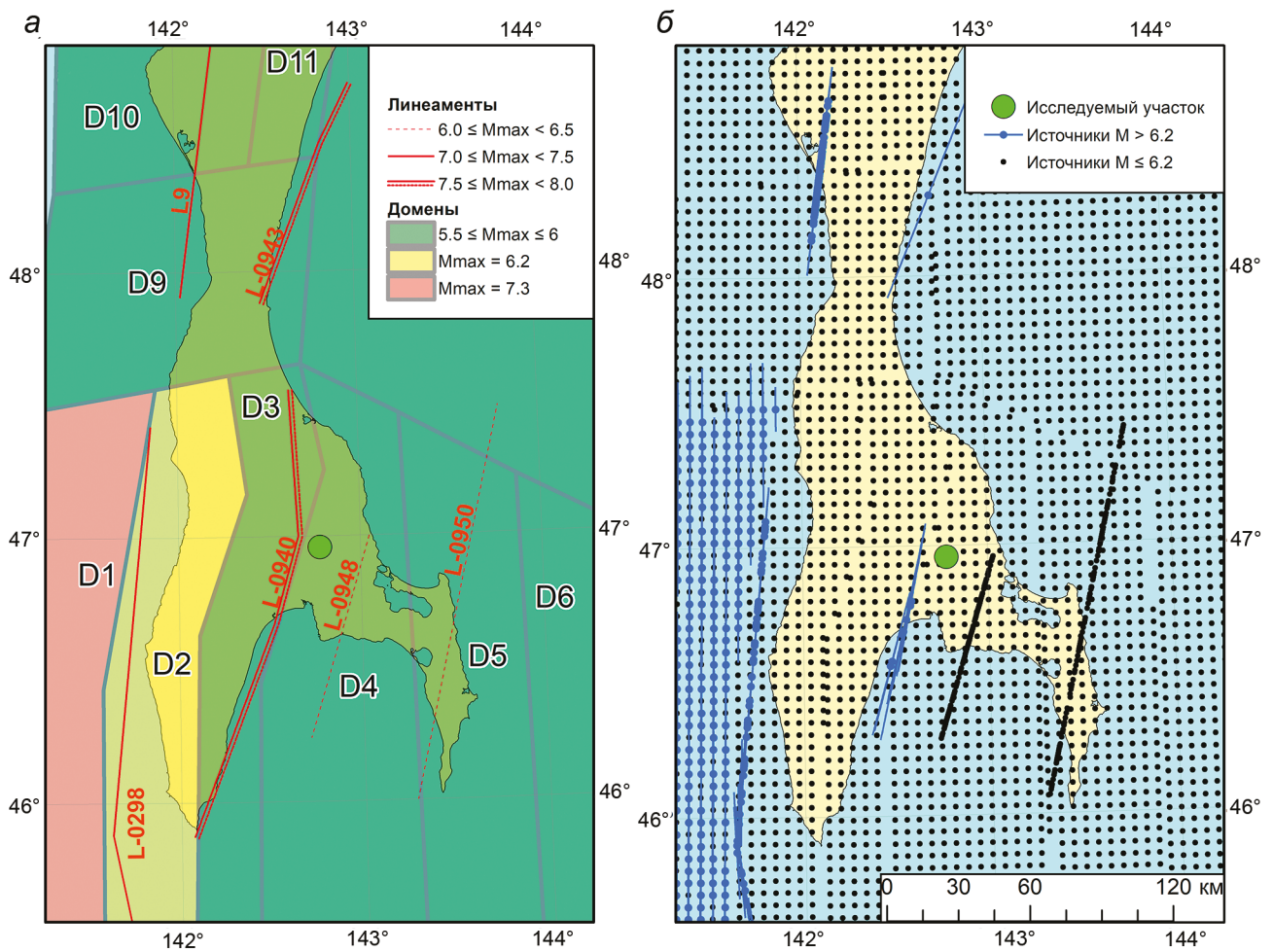


Рис. 2. Карта юга о. Сахалин:

a – актуальная линеаментно-доменная модель, используемая в практике инженерных изысканий, *б* – пространственное распределение синтезированных сейсмических источников. Для удобства, события с $M \leq 6.2$ изображены в виде точек, $M > 6.2$ – в виде разломов.

на определены в [25] (табл. 1). Региональная модель разработана для средних грунтовых условий. К недостаткам модели следует отнести ее упрощенный аналитический вид и использование гипоцентрального расстояния в качестве пространственной метрики, в то время как современные модели затухания параметризуются наикратчайшим расстоянием до площадки разрыва. С другой стороны, интенсивность Ариаса чаще всего ассоциируется с амплитудами высокочастотного излучения. В этом случае наилучшая пространственная метрика соответствует расстоянию от «макросейсмического» гипоцентра до участка [11]. Под «макросейсмическим» гипоцентром понимается положение максимального излучения на площадке разрыва. Чаще всего начало вспарывания разрыва (другими словами гипоцентр землетрясения) и положение максимального излучения совпадают, в том числе для коровых землетрясений (например, [39]).

Поэтому выражение (14) вполне подходит в качестве начального приближения.

Модели склона. Материальные и геометрические параметры склона приведены в табл. 2. Данные характеристики получены по результатам инженерно-геологических и инженерно-геофизических изысканий. Выделяются три плоскости скольжения, которые положены в основу склоновых моделей. Каждая плоскость задается своими коэффициентами сцепления и трения. Крутизна для всех плоскостей одинаковая и составляет 23 гр.

Второй фактор неопределенности связан со степенью водонасыщения грунтов, влияющей на оценку критического ускорения. Очевидно, что отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения (коэффициент m в (4)) зависит от сезонной вариативности уровня грунтовых вод. Мы будем условно разделять два состояния – обводненное и не

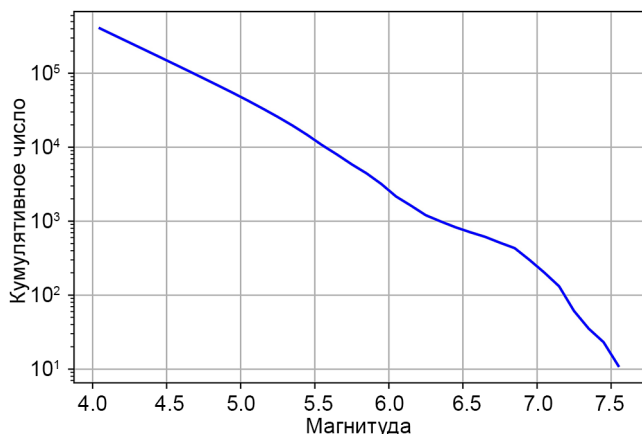


Рис. 3. Кумулятивное магнитудно-частотное распределение землетрясений согласно сгенерированному каталогу.

обводненное, считая, что средний уровень грунтовых вод, соответствующий обводненному состоянию, находится на отметке 3.5 м.

Таким образом, мы рассматриваем шесть моделей склона. Ниже представлено краткое описание моделей.

Модель склона 1 соответствует толщине скользящего слоя 5 м, при этом принимается «сухая» модель грунтов, для которой коэффициент m равен 0.

Модель склона 2 соответствует толщине скользящего слоя 5 м, при этом коэффициент принимается равным 0.7.

Модель склона 3 соответствует толщине скользящего слоя 7 м, при этом принимается «сухая» модель грунтов, для которой коэффициент равен 0.

Модель склона 4 соответствует толщине скользящего слоя 7 м, при этом коэффициент принимается равным 0.5.

Модель склона 5 соответствует толщине скользящего слоя 1.5 м, при этом принимается «сухая» модель грунтов, для которой коэффициент обводнённости равен 0.

Модель склона 6 соответствует толщине скользящего слоя 1.5 м с коэффициентом m равным 1.

Для заданных моделей и параметров оценивалось критическое ускорение согласно (3). Если полученное значение оказывалось меньше $0.01g$, то критическое ускорение принудительно фиксировалось на уровне $0.01g$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены результаты нормирования кумулятивного смещения Ньюмарка для вероятностей превышения 10 % и 5 %. Практически для всех моделей склона и референтных вероятностей получены нормативные смещения, которые не превышают 10 см. В рамках таких моделей склон следует считать устойчивым. Исключение составляет оценка устойчивости склона для модели 2, в которой учитывается обводненность грунтов. В этом случае максимальное нормативное значение кумулятивного смещения Ньюмарка, соответствующее 5 % вероятности превышения, составляет около 21 см. Данное значение попадает в промежуточный диапазон пороговых смещений (10–30 см). Однако оно не превышает верхний порог, составляющий 30 см.

На рис. 4 представлена сводка зависимостей вероятности превышения от значения кумулятивного смещения Ньюмарка для разных моделей склона. На этом же рисунке показана средняя кривая опасности, учитывающая различные возможные реализации материальных параметров, которые определяют критическое ускорение. Оценка нормативного смещения (другими словами нормирование) осуществляется путем поиска пересечения кривой опасности и линии, соответствующей заданной референтной вероятности. Для средней кривой опасности нормативное смещение, соответствующее 5 % референтной вероятности, составляет чуть менее 10 см.

Апробированная методика следует идеологии сбалансированного оценивания опасности, основан-

Таблица 2. Физико-механические параметры склона, критическое ускорение и вычисленные нормативные смещения для вероятностей превышения 10 % и 5 %.

Модель склона	Тип грунтов	c' , кПа	α , гр.	γ , кН/м ³	γ_w , кН/м ³	ϕ' , гр.	z , м	m , отн. ед.	Вес модели	a_c , g	$d_{10\%}$, см	$d_{5\%}$, см
1	ИГЭ-2 сухой	9.7	23	19.894	9.8	32.4	5	0	0.2	0.291	< 0.001	< 0.001
2	ИГЭ-2 обводненный	9.7	23	19.894	9.8	32.4	5	0.7	0.2	0.01*	12.222	20.768
3	ИГЭ-3 сухой	20.1	23	18.816	9.8	29.7	7	0	0.2	0.287	< 0.001	< 0.001
4	ИГЭ-3 обводненный	20.1	23	18.816	9.8	29.7	7	0.5	0.2	0.024	7.192	12.222
5	ИГЭ-1 сухой	30.4	23	18.718	9.8	20.1	1.5	0	0.1	1.029	0.001	0.001
6	ИГЭ-1 обводненный	30.4	23	18.718	9.8	20.1	1.5	1	0.1	0.692	0.001	0.001

Примечание. * – фиксированное значение.

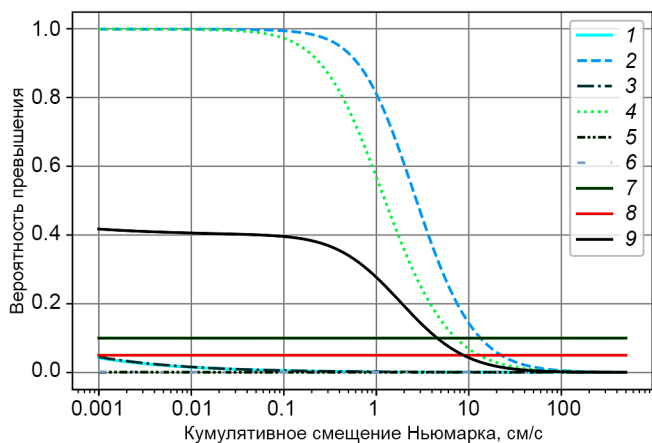


Рис. 4. Кривые опасности для нормируемой величины смещения оползневой массы:

1–6 – индивидуальная кривая опасности согласно номеру модели, приведенной в табл. 2, 7 – 10 % референтная вероятность, 8 – 5 % референтная вероятность, 9 – средняя кривая опасности с учетом весов моделей.

ной на вероятностном подходе. Мы использовали неопределенности в положении возможных очагов землетрясений в ближайшие 50 лет в окрестностях исследуемого склона, магнитуде события (событий) и генерируемого каждым событием уровне сейсмического воздействия. Мы также учли неопределенности некоторых физико-механических параметров склона, определяющих критическое ускорение, и неопределенность соответствующего эмпирического соотношения между кумулятивным смещением Ньюмарка, уровнем сейсмического воздействия и критическим ускорением.

Для нормирования кумулятивного смещения мы рекомендуем использовать референтную вероятность 5 %, которая в инженерной практике соответствует нормам проектирования ответственных объектов. Также, по мнению авторов статьи, следует увеличить расчетный срок эксплуатации склона (или объектов) с 50 до 100 лет. Однако в этом случае необходимо снизить статистическое рассеяние в моделях затухания сейсмических воздействий за счет привлечения дополнительных данных о геосреде и очаге землетрясения.

Кроме того, пространственная и сезонная вариации физико-механических параметров склона должны серьезным образом учитываться при подготовке и проведении инженерных изысканий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе для оценки устойчивости склона под сейсмической нагрузкой предложена методика нормирования кумулятивного смещения Ньюмарка на основе вероятностно-стохастического под-

хода. Методика апробирована на хорошо изученном участке западного склона горы Большевик (юг о. Сахалин).

Обобщение и интерпретация результатов инженерно-геофизических и инженерно-геологических изысканий позволили построить несколько моделей склона. Модели протестированы на превышение порогового смещения оползневой массы с вероятностью 5 % и 10 % в течение 50 лет. В качестве нижнего (консервативного) порога, при котором склон можно считать устойчивым, принято значение 10 см в соответствии с международной практикой.

Практически для всех моделей склона и пороговых вероятностей превышения получены нормативные значения кумулятивного смещения Ньюмарка менее 10 см. В рамках таких моделей склон следует считать устойчивым. Исключение составляют некоторые модели, в которых учитывается обводненность грунтов.

Сбалансированная оценка нормативного смещения, учитывающая неопределенности выбора границы скольжения и степени водонасыщенности грунтов, составляет чуть менее 10 см для вероятности превышения 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): Автореф. дис. д-ра. геол.-минер. наук. 2013.
2. Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Аптикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
3. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. Slope Stability and Stabilization Methods (2nd Edition). John Wiley & Sons, Inc., New York. 2001.
4. Baker R., Shukha R., Operstein V., Frydman S. Stability Charts for Pseudo-Static Slope Stability Analysis // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2006. V. 26. P. 813–823. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.01.023>.
5. Blake T.F., Hollingsworth R.A., Stewart J.P. Recommended Procedures for Implementation of DGM Special Publication 117 Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California. ASCE and Southern California Earthquake Center publication. 2002. Available online: <http://www.scec.usc.edu/resources/catalog/LandslideProceduresJune02.pdf> (accessed on 27 March 2024).
6. Burgess J., Fenton G.A., Griffiths D.V. Probabilistic Seismic Slope Stability Analysis and Design // Can. Geotech. J. 2019. V. 56. P. 1979–1998. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0544>.

7. Cornell C.A. Engineering Seismic Risk Analysis // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1968. V. 58. P. 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>.
8. Cui F., Xiong C., Wu Q., Xu C., Li N., Wu N., Cui L. Dynamic response of the Daguangbao landslide triggered by the Wenchuan earthquake with a composite hypocenter // *Geomatics, Nat. Hazards Risk.* 2021. V. 12. Iss. 1. P. 2170–2193. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1944916>.
9. Del Gaudio V., Pierri P., Wasowski J. An Approach to Time-Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Landslide Hazard // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003. V. 93. P. 557–569. <https://doi.org/10.1785/0120020016>.
10. Feng T., Meng, L. A High-Frequency Distance Metric in Ground-Motion Prediction Equations Based on Seismic Array Backprojections // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. Iss. 21. P. 11, 611–612, 621. <https://doi.org/10.1029/2018GL078930>.
11. Gusev A.A. Descriptive Statistical Model of Earthquake Source Radiation and Its Application to an Estimation of Short-Period Strong Motion // *Geophys. J. Int.* 1983. V. 74. P. 787–808. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb01904.x>.
12. Hsieh S.Y., Lee C.T. Empirical Estimation of the Newmark Displacement from the Arias Intensity and Critical Acceleration // *Eng. Geol.* 2011. V. 122. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.12.006>.
13. Jibson R.W. Predicting earthquake-induced landslide displacement using Newmark's sliding block analysis // *Transportation Res. Record.* 1993. V. 1411. P. 9–17.
14. Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps, an Example from the Los Angeles, California, Area. 1998. <https://doi.org/10.3133/ofr98113>.
15. Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps // *Eng. Geol.* 2000. V. 58. P. 271–289. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00039-9).
16. Jibson R.W. Regression Models for Estimating Coseismic Landslide Displacement // *Eng. Geol.* 2007. V. 91. P. 209–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.013>.
17. Jibson R.W., Michael J.A. Maps Showing Seismic Landslide Hazards in Anchorage, Alaska // *USGS Sci. Investig. Map 3077.* 2009. P. 1–11.
18. Jibson R.W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes – A retrospective. *Eng. Geol.* 2011. V. 122. Iss. 1-2. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017>.
19. Kang K., Zerkal O.V., Fomenko I.K., Pavlenko O.V. The Accelerogram-Based Probabilistic Analysis of Slope Stability // *Soil Mech. Found. Eng.* 2019. V. 56. P. 71–76. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09572-z>.
20. Khalaj S., BahooToroody F., Mahdi Abaei M., BahooToroody A., De Carlo F., Abbassi R. A Methodology for Uncertainty Analysis of Landslides Triggered by an Earthquake // *Comput. Geotech.* 2020. V. 117. 103262. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103262>.
21. Keefer D.K., Wilson R.C. Predicting Earthquake-Induced Landslides, with Emphasis on Arid and Semi-Arid Environments // *Landslides a semi-arid Environ.* 1989. V. 2. P. 118–149.
22. Kononov A., Gensiorovskiy Y., Lobkina V., Muzychenko A., Stepnova Y., Muzychenko L., Stepnov A., Mikhalyov M. Earthquake-Induced Landslide Risk Assessment: An Example from Sakhalin Island, Russia // *Geosciences.* 2019. V. 9.
23. Kononov A., Gensiorovskiy Y., Stepnov A. Hazard-Consistent Earthquake Scenario Selection for Seismic Slope Stability Assessment // *Sustainability.* 2020. V. 12.
24. Kononov A.V., Stepnov A.A. Next Generation Detailed Seismic Zoning Maps for Southern Sakhalin Island // *Dokl. Earth Sci.* 2020. V. 494. P. 726–729. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2009010X>.
25. Kononov A., Orlin I., Stepnov A., Stepnova Y. Physically Based and Empirical Ground Motion Prediction Equations for Multiple Intensity Measures (PGA, PGV, Ia, FIV3, CII, and Maximum Fourier Acceleration Spectra) on Sakhalin Island // *Geosci.* 2023. V. 13. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070201>.
26. Kwag S., Hahm D. Development of an earthquake-induced landslide risk assessment approach for nuclear power plants // *Nuclear Eng. Tech.* 2018. V. 50. Iss. 8. P. 1372–1386. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.07.016>.
27. Lee C.T. Statistical Seismic Landslide Hazard Analysis // *An Ex. from Taiwan.* 2014. V. 182. P. 201–212.
28. Li L., Chu X. Failure Mechanism and Factor of Safety for Spatially Variable Undrained Soil Slope // *Adv. Civ. Eng.* 2019. 8575439. <https://doi.org/10.1155/2019/8575439>.
29. Li X.J., Xu W.J., Gao M.T. Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake // *Acta Seismologica Sinica.* 2021. V. 43. Iss. 6. P. 768–786. <https://doi.org/10.11939/jass.20200180>.
30. Ma S., Xu C. Assessment of Co-Seismic Landslide Hazard Using the Newmark Model and Statistical Analyses: A Case Study of the 2013 Lushan, China, Mw6.6 Earthquake // *Nat. Hazards.* 2019. V. 96. P. 389–412. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3548-9>.
31. Martino S., Battaglia S., Delgado J., Esposito C., Martini G., Missori C. Probabilistic Approach to Provide Scenarios of Earthquake-Induced Slope Failures (PARSIFAL) Applied to the Alcoy Basin (South Spain) // *Geosciences.* 2018. V. 8.
32. Newmark N.M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments // *Geotechnique.* 1965. V. 15. P. 139–160.
33. Nowicki Jessee M.A., Hamburger M.W., Allstadt K., Wald D.J., Robeson S.M., Tanyas H., Hearne M., Thompson E.M. A Global Empirical Model for Near-Real-Time Assessment of Seismically Induced Landslides // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2018. V. 123. P. 1835–1859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2017JF004494>.
34. Pan Q., Leung Y.F., Hsu S. Stochastic seismic slope stability assessment using polynomial chaos expansions combined with relevance vector machine // *Geosci. Frontiers.* V. 12. Iss. 1. P. 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.016>.
35. Rathje E.M., Saygili G. Probabilistic Seismic Hazard Analysis for the Sliding Displacement of Slopes: Scalar and Vector Approaches // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2008. V. 134. P. 804–814. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:6\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:6(804)).
36. Rathje E.M., Cho Y. Probabilistic assessment of the earthquake-induced displacements of a slope using finite element analysis. *Proceedings of the 7th international conference on earthquake geotechnical engineering, Rome, Italy.* 2019. P. 209–220.
37. Rollo F., Rampello S. Probabilistic Assessment of Seismic-Induced Slope Displacements: An Application in Italy // *Bull. Earthq. Eng.* 2021. V. 19. P. 4261–4288.

- <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01138-5>.
38. Romeo R. Seismically Induced Landslide Displacements: A Predictive Model // *Eng. Geol.* 2000. V. 58. P. 337–351. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00042-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00042-9).
 39. Somerville P., Irikura K., Graves R., Sawada S., Wald D., Iwasaki Y., Kagawa T., Smith N., Kowada A. Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion // *Seismol. Res. Lett.* 1999. V. 70. P. 59–80. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.59>.
 40. Tang K., Wang J., Li L. A Prediction Method Based on Monte Carlo Simulations for Finite Element Analysis of Soil Medium Considering Spatial Variability in Soil Parameters // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2020. 7064640. <https://doi.org/10.1155/2020/7064640>.
 41. Tanyas H., Rossi M., Alvioli M., van Westen C.J., Marchesini I. A Global Slope Unit-Based Method for the near Real-Time Prediction of Earthquake-Induced Landslides // *Geomorphology* 2019. V. 327. P. 126–146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.022>.
 42. Uzielli M., Lacasse S., Nadim F., Phoon K.K. Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice. 2007.
 43. Wang K.L., Lin M.L. Development of shallow seismic landslide potential map based on Newmark's displacement: the case study of Chi-Chi earthquake // *Taiwan Env. Earth Sci.* 2010. V. 60. P. 775–785. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0215-1>.
 44. Wang L., Zhang X., Tinti S. Large deformation dynamic analysis of progressive failure in layered clayey slopes under seismic loading using the particle finite element method // *Acta Geotech.* 2021. V. 16. P. 2435–2448. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01142-8>.
 45. Wang T., Liu J., Shi J., Gao M., Wu S. Probabilistic Seismic Landslide Hazard Assessment: A Case Study in Tianshui, Northwest China // *J. Mt. Sci.* 2020. V. 17. P. 173–190. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5618-1>.
 46. Wieczorek G.F., Wilson R.C., Harp E.L. Earthquakes in San Mateo County California. Investigations Map I-1257-E, scale 1:62 500. Map Showing Slope Stability During U.S. Geological Survey Miscellaneous. 1985. Available online: <https://pubs.usgs.gov/imap/1257e/plate-1.pdf> (accessed on 27 March 2024).
 47. Williams J.N., Werner M.J., Goda K., Wedmore L.N.J., De Risi R., Biggs J., Mdala H., Dulanya Z., Fagereng Å., Mphepo F., Chindandali P. Fault-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis in Regions with Low Strain Rates and a Thick Seismogenic Layer: A Case Study from Malawi // *Geophys. J. Int.* 2023. V. 233. P. 2172–2207. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad060>.
 48. Yiğit A. Prediction of Amount of Earthquake-Induced Slope Displacement by Using Newmark Method // *Eng. Geol.* 2020. V. 264. 105385. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105385>.
 49. Youd T.L. Ground failure displacement and earthquake damage to buildings: American Society of Civil Engineers Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, 2d, Knoxville. Tenn. 1980. V. 2. P. 7-6-2 to 7-6-26.
 50. Yuan R., Deng Q., Cunningham D., Han Z., Zhang D., Zhang B. Newmark Displacement Model for Landslides Induced by the 2013 Ms 7.0 Lushan Earthquake, China // *Front. Earth Sci.* 2016. V. 10. P. 740–750. <https://doi.org/10.1007/s11707-015-0547-y>.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком,

А.В. Гребенниковым

после доработки 28.03.2024 г.

принята к печати 15.04.2024 г.

A.V. Konovalov, Yu.V. Gensirovskiy

Slope stability assessment based on stochastic nature of site-specific ground shaking level and uncertainty of critical acceleration

Assessing a possibility of landslide occurrence induced by intensive seismic loading is an important task of engineering geology. In this paper we suggest a method of standardizing internal slope deformations based on a stochastic approach. The cumulative Newmark displacement is taken as a standard error expressed as an empirical ratio of accumulated displacement to seismic impact and critical acceleration defined by the slope material parameters. The proposed method takes into account the uncertainties associated with possible earthquake epicenter locations in the next 50 years in the vicinity of the studied slope, with magnitude of the event (events) and seismic impact. It also considers the uncertainties associated with physical and mechanical parameters of the slope. Landslide displacements are estimated in accordance with the probability of the exceedance (10 % and 5 %). The computed values are compared with the threshold values and then, based on the result, the slope stability under seismic loading is assessed. The threshold value, at which a slope can be considered stable, is 10 cm. This method was successfully tested in the well-studied area of the western slope of Mount Bolshevik (in the south of Sakhalin Island). Balanced assessment of standard displacement for 5 % exceedance probability showed less than 10 cm. The paper also provides recommendations to improve the method.

Key words: seismically-induced landslide, Newmark displacement, probabilistic analysis, slope stability, uncertainty, stochastic simulation, Sakhalin Island.